

**REGIME DE ESCOAMENTO E RECARGA
SUBTERRÂNEA DE NASCENTES NA REGIÃO
DO ALTO RIO GRANDE - MG**

LUCAS ALVES DA SILVA

2009

LUCAS ALVES DA SILVA

**REGIME DE ESCOAMENTO E RECARGA
SUBTERRÂNEA DE NASCENTES NA REGIÃO DO
ALTO RIO GRANDE - MG**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Engenharia de Água e Solo, para a obtenção do título de “Mestre”.

Orientador
Prof. Dr. Antônio Marciano da Silva

LAVRAS
MINAS GERAIS - BRASIL
2009

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da
Biblioteca Central da UFLA**

Silva, Lucas Alves da.

Regime de escoamento e recarga subterrânea de nascentes na
região do Alto Rio Grande -MG / Lucas Alves da Silva. – Lavras:
UFLA, 2009.

134 p. : il.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2009.

Orientador: Antônio Marciano da Silva.

Bibliografia.

1. Recarga hídrica de nascentes. 2. Aquífero superficial. 3.
Nascentes. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 551.49

LUCAS ALVES DA SILVA

**REGIME DE ESCOAMENTO E RECARGA
SUBTERRÂNEA DE NASCENTES NA REGIÃO DO
ALTO RIO GRANDE – MG**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Engenharia de Água e Solo, para a obtenção do título de “Mestre”.

APROVADA em 06 de março de 2009

Prof. Dr. Benedito Cláudio da Silva UNIFEI

Prof. Dr. Carlos Rogério de Mello UFLA

Pesq. Dr. Gilberto Coelho UFLA

Prof. Dr. Antônio Marciano da Silva
UFLA
(Orientador)

LAVRAS
MINAS GERAIS – BRASIL

A minha querida mamãe, Lidia, por sua grandiosidade e por ser esta
pessoa tão especial;

A minha segunda mãe, Lourdes, pelo carinho que tem por mim;

E as minhas irmãs Priscila e Paulina, por estarem sempre ao meu lado.

OFEREÇO

A água não deve ser desperdiçada, nem poluída, nem envenenada. De maneira geral, sua utilização deve ser feita com consciência e discernimento para que não se chegue a uma situação de esgotamento ou de deterioração da qualidade das reservas atualmente disponíveis.

Organização das Nações Unidas.

Declaração Universal dos Direitos da água.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Lavras, em especial ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realização do curso.

À FAPEMIG, pela concessão de bolsas e apoio financeiro ao projeto GAG 1617/06 e a CEMIG/ANEEL, pelos recursos disponibilizados por meio do projeto P&D 076 e 176.

Ao professor Antônio Marciano da Silva, pela orientação fundamental para o desenvolvimento deste trabalho e também por sua amizade e confiança.

Ao professor Carlos Rogério de Mello, pelos ensinamentos e colaboração expressiva no desenvolvimento deste trabalho.

Ao pesquisador Gilberto Coelho, pelos ensinamentos, amizade, confiança, disponibilidade e sugestões para a melhoria do trabalho.

Aos professores do Departamento de Engenharia, pelo convívio e ensinamentos.

A todos os meus amigos, pelo estímulo e apoio.

Enfim, a todos aqueles que de alguma forma colaboraram para que este trabalho alcançasse seus objetivos.

BIOGRAFIA

LUCAS ALVES DA SILVA, filho de Lidia Maria Alves Silva, nasceu em Lavras, MG, em 27 de maio de 1983.

Em março de 2002 iniciou o Curso de Engenharia Agrícola na Universidade Federal de Lavras, em Lavras, MG. Durante a graduação foi bolsista do Programa Especial de Treinamento (PET), participando de projetos de pesquisa, extensão e ensino ligados à área de Engenharia Agrícola. Também participou de diversos estágios extracurriculares nas áreas de topografia, geoprocessamento, irrigação e recursos hídricos na Universidade Federal de Lavras, em Lavras, MG. Graduou-se Engenheiro Agrícola em março de 2007.

Em março de 2007, iniciou o curso de Mestrado em Engenharia Agrícola na Universidade Federal de Lavras, em Lavras, MG, área de concentração em Recursos Hídricos e Meio Ambiente, concluindo-o em março de 2009.

SUMÁRIO

RESUMO GERAL	iv
GENERAL ABSTRACT	v
CAPÍTULO 1	1
1 Introdução Geral	1
2 Referencial Teórico.....	3
2.1 O Ciclo Hidrológico.....	3
2.2 A Bacia Hidrográfica	7
2.3 Água Subterrânea.....	10
2.4 Nascentes	11
2.5 Recarga dos aquíferos subterrâneos.....	16
2.5.1 Tipos de recarga subterrânea	19
2.5.2 Métodos de estimativa da recarga subterrânea	20
2.6 Sistemas de Informações Geográficas (SIGs).....	28
3 Material e Métodos Geral	30
3.1 Localização e caracterização das áreas de estudo.....	30
3.2 Base cartográfica utilizada.....	35
3.3 Delimitação das sub-bacias hidrográficas e áreas de recarga das nascentes	36
3.4 Mapas de declividade.....	38
3.5 Monitoramento hidrológico das nascentes.....	38
3.5.1 Monitoramento das vazões das nascentes.....	39
3.5.2 Monitoramento da precipitação	40
3.5.3 Monitoramento do nível do aquífero não confinado.....	40
3.6 Curvas características de retenção de água no solo	41
4 Referências Bibliográficas.....	43

CAPÍTULO 2: Caracterização hidrológica de nascentes em dois ambientes distintos na região do Alto Rio Grande – MG	52
Resumo	52
Abstract.....	53
1 Introdução	54
2 Material e Métodos	55
2.1 Caracterização das nascentes e morfometria das áreas de recarga	55
2.1.1 Características morfométricas.....	57
2.1.2 Características do relevo	58
2.2 Modelagem das vazões das nascentes.....	60
3 Resultados e Discussão	61
3.1 Situação atual das nascentes	61
3.1.1 Mapas de uso e ocupação do solo das áreas de recarga	62
3.2 Análise morfométrica das áreas de recarga das nascentes	70
3.3 Modelagem das vazões das nascentes.....	80
3.4 Rendimento específico das nascentes	88
3.5 Deflúvio das nascentes.....	92
4 Conclusões	94
5 Referências Bibliográficas.....	95
CAPÍTULO 3: Estimativa da recarga subterrânea em nascentes do Alto Rio Grande - MG.....	97
Resumo	97
Abstract.....	98
1 Introdução	99
2 Material e Métodos	101
2.1 Poços de observação do aquífero não confinado	101
2.2 Recarga subterrânea direta.....	105
2.3 Recarga profunda.....	108

3 Resultados e Discussão.....	109
3.1 Variações do nível d'água subterrâneo.....	109
3.2 Estimativa do rendimento específico.....	115
3.3 Estimativa da recarga direta.....	117
3.4 Avaliação da variação do armazenamento subterrâneo.....	117
3.5 Estimativa da recarga profunda.....	118
4 Conclusões.....	121
5 Referências Bibliográficas.....	122
ANEXOS.....	125

RESUMO GERAL

SILVA, Lucas Alves da. **Regime de escoamento e recarga subterrânea de nascentes na região do Alto Rio Grande - MG**. 2009. 134 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola, Engenharia de Água e Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.*

A água é um recurso natural indispensável às atividades humanas e deve ser manejada adequadamente, principalmente nos locais onde ocorre seu afloramento, de forma a manter sua qualidade e quantidade. As nascentes são fontes primárias de água proveniente dos recursos hídricos subterrâneos. Neste trabalho caracterizou-se hidrologicamente 10 nascentes representativas de duas sub-bacias hidrográficas, a do Ribeirão Lavrinha (nascentes L1; L2; L3; L4 e L5) localizada na cidade de Bocaina de Minas-MG e a do Ribeirão Marcela (nascentes M1; M2; M3; M4 e M5), localizada na cidade de Nazareno-MG, ambas na Bacia do Alto Rio Grande-MG. As vazões das nascentes foram monitoradas em intervalos aproximadamente quinzenais e quantificadas pelo método direto e através do medidor WSC flume e modeladas pela “Fórmula de Maillet”. Caracterizou-se também a morfometria das áreas de recarga das nascentes e o uso e ocupação do solo. Em quatro destas nascentes (L1; L5; M3 e M5), sendo duas em cada uma das sub-bacias estudadas, foram perfurados poços de observação do aquífero, nos quais se monitorou os níveis do lençol superficial durante o ano de 2008, visando estimar-se a recarga do aquífero. Utilizou-se o método de flutuação das superfícies livres (Water Table Fluctuation - WTF) para estimar a recarga direta, e posteriormente um balanço hídrico subterrâneo para estimar a recarga profunda. Verificou-se que existem relações importantes entre as condições de uso e ocupação do solo, características topográficas, características morfométricas e manejo do solo com a capacidade de manutenção do fluxo d’água ao longo do ano (α), rendimento específico médio mensal e o deflúvio anual das nascentes. A estimativa da recarga direta através do método WTF foi de 341,6; 183,8; 148,3; 139,2 (mm/ano) para as áreas L1, L5, M3 e M5, respectivamente. Evidenciou-se a necessidade da continuidade do monitoramento do nível do aquífero no intuito de se obter resultados mais conclusivos.

*Comitê Orientador: Prof. Dr. Antônio Marciano da Silva - UFLA, Prof. Dr. Carlos Rogério de Mello – UFLA e Pesq. Dr. Gilberto Coelho - UFLA.

GENERAL ABSTRACT

SILVA, Lucas Alves da. **Surface flow and groundwater recharge at springs from Alto Rio Grande region - MG.** 2009. 134 p. Dissertation (Master Science Program in Agricultural Engineering, Soil and Water Engineering) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.*

Water is a natural resource very important for human activities and must be managed adequately, specially around springs, in order to maintain its quality and quantity. Springs are primary sources of water from groundwater resources. At this research, 10 springs were characterized at two watersheds, one at Lavrinha creek (springs L1, L2, L3, L4 and L5) at Bocaina de Minas county, in Minas Gerais State, and other at Marcela creek (springs M1, M2, M3, M4 and M5), at Nazareno county, both at Alto Rio Grande main watershed. The flow rate was monitored every two weeks, quantified by the direct method and through use of WSC flume, fitted to Maillet model. The form of watershed areas and soil occupation was also registered. On four springs (L1, L5, M3 and M5), observation wells were perforated to monitor the water table during 2008, in order to estimate aquifer recharge. The water table fluctuation method (WTF) was used to estimate the direct recharge, and a groundwater balance calculated to estimate the base flow. It could be verified that important relations exist between the soil conditions and soil utilization, landscape, watershed form and soil management with water flow maintenance along the year (α), month average specific yield and annual flow. The recharge estimate by WTF method was 341.6, 183.8, 148.3 and 139.2 mm/year for L1, L5, M3 and M5, respectively. Watertable must be monitored in order to obtain more conclusive results.

*Guidance Committee: Antônio Marciano da Silva - UFLA, Carlos Rogério de Mello – UFLA and Gilberto Coelho - UFLA.

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO GERAL

A água é um recurso natural de valor inestimável, sendo vital para qualquer atividade que o homem desenvolva. Mais que um insumo indispensável à produção é um recurso estratégico para o desenvolvimento econômico. Ela é o componente fundamental na análise do ciclo hidrológico e conseqüentemente essencial para a manutenção do equilíbrio dos ecossistemas. É ainda, uma referência cultural e um bem social indispensável à adequada qualidade de vida da população. A importância da água no contexto geopolítico atual faz dela elemento de pesquisas no intuito de conservar a sua quantidade e qualidade e melhorar as condições de uso e aproveitamento da mesma em um determinado sistema.

As nascentes de água vêm sendo alvo de muitos estudos hidrológicos, onde diversos pesquisadores contrastam o uso e ocupação do solo nas áreas de recarga das nascentes com a disponibilidade hídrica destas. Devido à grande importância das nascentes no contexto hidrogeológico, há um grande interesse em preservar a quantidade e a qualidade de suas águas.

A conservação da quantidade e qualidade da água depende das condições naturais e antrópicas das bacias hidrográficas onde ela se origina, circula, percola ou fica estocada. A exploração desordenada dos recursos naturais, como por exemplo, o uso e ocupação dos solos nas bacias hidrográficas, principalmente nas áreas de recarga das nascentes e regiões ribeirinhas, associados às ações antrópicas e aos sistemas de produção inseridos nestas, tem provocado alterações expressivas na dinâmica da água nestes locais, proporcionando, especialmente, diminuição da quantidade e qualidade da água e perdas de solo, devido ao manejo inadequado nestes sistemas, comprometendo assim, a recarga dos aquíferos e produzindo assoreamento de cursos d'água.

O manejo adequado de bacias hidrográficas, notadamente em regiões ambientalmente frágeis, é de suma importância para a manutenção do escoamento subterrâneo da mesma, sendo este fundamental na perenização dos cursos d'água.

A estimativa da recarga de aquíferos é fator determinante em estudos hidrogeológicos e do gerenciamento das explorações de água subterrânea, tendo em vista a sustentabilidade, em longo prazo, da quantidade e da qualidade da água do aquífero, sendo preocupação crescente das instituições gestoras dos recursos hídricos no Brasil.

O conhecimento do comportamento hidráulico dos recursos hídricos, em especial os subterrâneos, é de suma importância para o estabelecimento de medidas preventivas e ou corretivas na sustentabilidade destes recursos. Servem também como parâmetro para subsidiar os órgãos de gestão dos recursos hídricos em suas atividades de gerenciamento, elaboração e implantação de planos de gestão.

Considerando a importância dos recursos hídricos subterrâneos objetivou-se, com este trabalho, estudar o comportamento hidrológico de nascentes associado ao uso atual do solo e as características morfométricas locais, em áreas de recarga de dez nascentes de duas sub-bacias hidrográficas do Alto Rio Grande-MG. A estimativa da recarga do aquífero em quatro destas áreas também foi objeto de análise e caracterização.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 O Ciclo Hidrológico

Uma das características dos recursos hídricos é sua distribuição irregular no tempo e no espaço, sendo a dinâmica da água na natureza marcada por vários componentes e fases. Essa dinâmica da água é conhecida e caracterizada como ciclo hidrológico, sendo este de fundamental importância para o entendimento de todos os fenômenos relacionados à água, em todos seus estados.

O ciclo hidrológico é o processo cíclico e contínuo de transporte das águas no planeta, interligando atmosfera, continentes e oceanos. É um processo complexo, impulsionado fundamentalmente pela energia solar. O intercâmbio entre as circulações da água na superfície terrestre (abrangendo esta, os continentes e oceanos) e na atmosfera ocorrem tanto no sentido superfície-atmosfera, em que o fluxo de água se dá fundamentalmente na forma de vapor, em decorrência dos fenômenos de evaporação e transpiração, como no sentido atmosfera-superfície, em que a transferência de água ocorre mais significativamente na forma de precipitações de chuva em bacias hidrográficas tropicais (Silveira, 2007), sendo este ciclo o responsável pela renovação da água na Terra.

O ciclo hidrológico por ser um processo dinâmico e contínuo, não tem começo nem fim (a água inicia seu caminho, indo de um estado inicial até retornar a sua posição primitiva), porém a dinâmica da água entre os vários componentes e fases no ciclo hidrológico é, principalmente irregular, tanto no tempo como no espaço. Assim, o ciclo da água envolve vários e complexos processos hidrológicos: precipitação, interceptação, infiltração, percolação, evapotranspiração, escoamento superficial, etc., não que as ações antrópicas no meio ambiente interferem diretamente no ciclo hidrológico.

No ciclo, a água é evaporada da superfície terrestre e se torna parte constituinte da atmosfera. O vapor d'água presente na atmosfera passa por complexos fenômenos de resfriamento do ar e na presença de núcleos higroscópicos pode sofrer aglutinação, formando uma grande quantidade de gotas, com volume tal que seu peso seja superior às forças que as mantêm em suspensão, e sob condições atmosféricas favoráveis essas gotas vêm a precipitar. O componente de entrada do ciclo hidrológico de maior peso em regiões tropicais e subtropicais é a precipitação na forma de chuva (Mello, 2003), sendo, por meio desse fenômeno, que a água entra numa bacia hidrográfica. Conforme Johnson (1969) a precipitação que cai sobre a superfície do solo é a origem de todos os nossos suprimentos de água potável. Dela depende a reposição da quantidade que é retirada dos lagos, cursos superficiais e poços para os numerosos usos do homem.

À medida que as chuvas caem, ela se dispersa de várias formas. Uma parcela sofre interceptação pela vegetação (tão intensa quanto mais densa for a esta) e a outra se infiltra no solo (Mello, 2003).

O processo de infiltração definido por Libardi (2005), como a entrada de água no solo através da interface solo-atmosfera, é dependente da intensidade da precipitação, das características físicas do solo e da umidade antecedente do solo. Este processo é o fator determinante da disponibilização de água para as culturas, da recarga e abastecimento dos aquíferos subterrâneos, da ocorrência e magnitude do escoamento superficial e do manejo do solo e da água. Na medida em que o solo vai sendo saturado a maiores profundidades, a infiltração decresce até uma taxa residual, com o excesso não infiltrado da precipitação gerando o escoamento superficial direto (Silveira, 2007).

A parcela que infiltra no solo pode ser dividida em duas componentes: uma retida pela matriz do solo, sendo o reservatório de água disponível para as plantas, objeto de frequentes estudos, principalmente associados à irrigação

(Mello, 2003) e a outra, que irá drenar abaixo da zona das raízes, constituindo-se na recarga dos aquíferos freáticos e artesianos, sendo normalmente denominada pelo termo percolação.

A parcela da precipitação que infiltra abaixo da zona das raízes (percolação) continua a mover-se para baixo, alcançando o reservatório de água subterrânea, e ao juntar-se à massa da água subterrânea, a água infiltrada move-se através dos poros da matéria do subsolo, podendo reaparecer na superfície em elevações de nível inferior ao em que penetrou no aquífero (Johnson, 1969). A descarga da água subterrânea ocorre quando a água emerge do subsolo. A maior parte das descargas naturais ocorre como fluxo para elementos de água superficial, tais como cursos d'água, lagos e oceanos, sendo o que fluxo para a superfície aparece como uma nascente (Tood, 1959). A água subterrânea que descarrega naturalmente auxilia a manutenção dos cursos d'água, principalmente nos períodos de estiagem quando o escoamento superficial direto (“surface runoff”) é baixo ou inexistente (Johnson, 1969). Os cursos d'água, carreando as águas de escoamento superficial e a descarga natural das águas subterrâneas, as fazem retornar ao oceano, entretanto parte é evaporada no percurso e outra parte eventualmente é captada para atender as necessidades antrópicas.

A evaporação da água do solo, córregos, rios e lagos e da superfície dos vegetais e a transpiração das plantas ocorrem simultaneamente na natureza, transferindo para atmosfera grandes volumes de água na forma de vapor, sendo difícil distinguir os dois processos. Assim, o termo evapotranspiração é utilizado para descrever o processo total de transferência de água do sistema solo-planta para a atmosfera (Chow et al., 1988; Pereira et al., 1997; Allen et al., 1998; Tucci et al., 2007). Righetto (1998) relata que a evapotranspiração corresponde a aproximadamente 50 a 60% do ciclo hidrológico.

Das etapas do ciclo hidrológico, talvez a mais importante para o engenheiro seja o escoamento superficial, que é a fase que trata da ocorrência e

transporte da água na superfície do solo, sendo muito importante seu conhecimento no dimensionamento de obras hidráulicas e manejo de bacias hidrográficas. O escoamento superficial pode ser dividido em duas componentes: escoamento superficial direto (“surface runoff”) e o escoamento base ou subterrâneo (Mello & Silva, 2008). O primeiro é gerado pelo excesso ou alta intensidade de precipitação, que ultrapassa a capacidade de infiltração do solo (Pruski et al., 2002). A sua importância está diretamente associada a dimensionamentos de obras hidráulicas, como barragens, terraços, bacias de contenção e outros (Mello & Silva, 2008), sendo também de grande importância o conhecimento desta parcela do ciclo hidrológico para conservação do meio ambiente, pois o escoamento superficial direto, além de ocasionar perda de água, promove o transporte de sedimentos através da erosão laminar. O escoamento de base ou subterrâneo é aquele produzido pelo fluxo de água do aquífero livre, sendo importante do ponto de vista ambiental, uma vez que refletirá a produção de água na bacia durante as estações secas (Mello & Silva, 2008).

O conhecimento e entendimento dos processos envolvidos no ciclo hidrológico são de extrema importância, pois estes se constituem na base para subsidiar o planejamento, a gestão e a execução de ações conservacionistas ambientais.

No intuito de se fazer um manejo conservacionista da água e do solo, deve-se utilizar-se de técnicas de preparo e manejo do solo que minimizem a compactação, remoção e queima de palhada, mantenham conservadas as matas em áreas de APP's e reservas legais, e de técnicas de conservação do solo por meio de dimensionamentos de terraço e implantação de cobertura vegetal no intuito de reduzir a parcela do escoamento superficial direto e a erosão laminar a um mínimo tolerável, e conseqüentemente, favorecer a infiltração da água no solo e a recarga de aquíferos. Com isso há redução das vazões máximas

(enchentes) e aumento das mínimas, pela maior contribuição do escoamento base, reduzindo assim o impacto ocasionado pelo uso do solo.

2.2 A Bacia Hidrográfica

A bacia hidrográfica pode ser delimitada por dois tipos de divisores de água: divisor geológico e divisor topográfico. O divisor topográfico consiste numa linha imaginária que acompanha as maiores cotas do terreno a partir de um ponto de controle num curso d'água, não podendo assim, haver contribuição de escoamento superficial de bacias adjacentes. Qualquer ponto da superfície terrestre faz parte de uma bacia hidrográfica. Desde os menores vales até a grande bacia amazônica, sempre existe uma discreta área de terreno que capta a água da chuva, perde água por evaporação, e produz o restante como deflúvio ou escoamento superficial (Lima, 2006).

Quando a bacia é delimitada pelo divisor geológico, esta é conhecida como bacia hidrogeológica, sendo esta não tão facilmente reconhecida e delimitada como as bacias hidrográficas, em função de fatores como: (1) não serem observáveis na superfície do terreno; (2) sistemas de fluxos subterrâneos de diferentes magnitudes podem ser sobrepostos uns aos outros; (3) os divisores hidrogeológicos não são fixos, podendo mover-se em resposta as condições de superexploração do aquífero; e (4) o nível freático comumente não acompanha a superfície do terreno, fazendo com que os limites dos sistemas de fluxo subterrâneos rasos definidos com base na topografia, não apresentem os reais limites dos sistemas de fluxos (Winter et al., 2003). Como normalmente não há coincidência entre esses dois tipos de divisores, em estudos hidrológicos, por ser de mais fácil identificação, prevalece o divisor topográfico.

Dentro de uma determinada malha hídrica, os conceitos de bacia e sub-bacia se relacionam a ordens hierárquicas (Fernandes & Silva, 1994). Cada bacia hidrográfica se interliga com outra de ordem hierárquica superior, constituindo,

em relação à última, uma sub-bacia (Souza & Fernandes, 2000). Portanto, os termos bacia e sub-bacias hidrográficas são relativos.

A subdivisão de uma bacia hidrográfica de maior ordem em seus componentes (sub-bacias) permite a pontualização de problemas difusos, tornando mais fácil a identificação de focos de degradação de recursos naturais, da natureza dos processos de degradação ambiental instalados e o grau de comprometimento da produção sustentada existente (Fernandes & Silva, 1994).

Por constituírem ecossistemas com o predomínio de uma única saída, as bacias hidrográficas possibilitam a realização de uma série de experimentos (Valente & Castro, 1983). Nestes ambientes, podem-se monitorar todos os componentes do ciclo hidrológico e conseqüentemente, inferir sobre o comportamento de cada um. Conforme Silva (1995), o balanço hídrico nestes locais é primordial para implementação de estudos ambientais visando ao manejo sustentável.

O cuidado com a bacia hidrográfica é essencial para a vida de uma comunidade, pois segundo Cristofolletti (1981) para que um rio exista e funcione, deve sempre haver uma área que lhe garanta o abastecimento, constituindo-se a sua bacia de drenagem. A mesma condição é válida para o surgimento de nascentes.

O comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica é função de suas características morfológicas (área, forma, topografia, rede de drenagem, etc.), geológicas, unidades pedológicas (Righetto, 1998; Goldenfum et al., 2003; Resende et al., 2007) e do uso e ocupação do solo. As características morfológicas de uma bacia possuem importante papel nos processos do ciclo hidrológico, influenciando, dentre outros, a infiltração e o escoamento superficial. A fim de entender as inter-relações existentes entre esses fatores de forma e os processos hidrológicos de uma bacia hidrográfica, torna-se necessário expressar as características da bacia em termos quantitativos (Santos, 2001).

As características morfológicas de uma bacia constituem elementos de grande importância para avaliação de seu comportamento hidrológico, pois, ao estabelecerem-se relações e comparações entre elas e dados hidrológicos conhecidos, podem-se obter indiretamente valores hidrológicos em locais nos quais os dados são escassos (Villela & Mattos, 1975), além de serem informações fundamentais para a elaboração e instalação de projetos de infraestrutura. Segundo Viola et al. (2007) a quantificação morfométrica da bacia hidrográfica constitui a base do processo de caracterização hidrológica, assim como de parametrização da bacia, visando à simulação hidrológica. Os Sistemas de Informações Geográficas (SIG's), constituem-se em uma ferramenta que possibilita a aquisição automatizada destas informações.

Um dos grandes problemas em estudo numa bacia hidrográfica é a elevada variabilidade espacial e temporal de suas características. Assim, na delimitação de uma bacia o importante é que o conceito adotado para sua delimitação garanta que a área escolhida seja integradora de todos os processos envolvidos no objetivo da análise e que apresente certo grau de homogeneidade, de forma que estratégias, ações e conclusões gerais possam ser estabelecidas para toda a área delimitada (Machado, 2002). Em trabalhos de pesquisa, observa-se maior flexibilidade nos critérios de delimitação de bacias, muito mais vinculados aos objetivos do trabalho do que as definições e conceitos pré-estabelecidos. Exemplos são trabalhos de Hamlett et al. (1992) e Machado (2002), que utilizam Sistemas de Informações Geográficas para definir áreas potencialmente poluidoras, devido à atividade agrícola na Pensilvania, E.U.A., considerando áreas de drenagem de milhares de hectares; ou o de Moldan & Cerny (1994), que consideram que a microbacia hidrográfica, visando estudos biogeoquímicos, não deve ultrapassar 500 ha. Mello (2003) em estudos hidrológicos em microbacia hidrográfica com regime de escoamento efêmero na região de Lavras/MG monitorou diversos componentes do ciclo hidrológico em

uma microbacia de 1,03 ha. Oleriano et al. (2007) relata que bacias de pequenas dimensões servem como palco para experimentos que levem solução para problemas encontrados nas de maior porte.

2.3 Água Subterrânea

O solo é constituído por uma matriz porosa composta partículas sólidas e por vazios. Esses vazios podem ou não estar preenchidos com água. Sob o ponto de vista de ocorrência de água, o solo pode ser dividido em zona saturada e zona não saturada, conforme descrito a seguir (Cabral et al., 2003).

A zona não saturada do solo, também chamada de zona de aeração, os vazios entre as partículas do solo são preenchidos por água e ar. Nesta zona ocorre a ligação entre as águas subterrâneas, que caracterizam a zona saturada do solo, e a atmosfera.

A zona saturada do solo é onde todos os vazios são preenchidos com água, caracterizando a existência do chamado lençol subterrâneo, ou aquífero. Essa região saturada, segundo Calheiros (2004), pode situar-se próxima à superfície ou a grandes profundidades e a água ali presente estar ou não sob pressão. Segundo o mesmo autor, quando a região saturada se localiza sobre uma camada impermeável e possui uma superfície livre sem pressão, a não ser a atmosférica, tem-se o chamado lençol freático ou aquífero não confinado. Nestas condições, o nível d'água do lençol freático é o limite superior da zona de saturação de água do solo e este tipo de lençol possui uma maior interação com os cursos d'água. Quando o lençol se localiza entre camadas relativamente impermeáveis, em condições especiais que façam a água movimentar-se sob pressão, tem-se o lençol artesianos ou aquífero confinado. Os aquíferos confinados encontram-se relativamente melhor protegidos da deterioração ambiental desde que sejam atendidas algumas condições como as camadas serem relativamente impermeáveis, espessas e contínuas e que não sejam

estabelecidas intercomunicações com os aquíferos vizinhos caso estes estejam poluídos (Cabral et al., 2003).

Os aquíferos confinados são geralmente os de grande produção, enquanto os aquíferos não confinados são os mais explorados devido ao fácil acesso (Calheiros, 2004).

Cabral et al. (2003) citam que a importância da zona não saturada também está relacionada com a avaliação do potencial de recarga ou reabastecimento dos aquíferos a partir da água da precipitação que penetra no solo. O mesmo autor relata que a zona não saturada além de determinar as características de recarga dos aquíferos serve como filtro para as substâncias lançadas na superfície do solo, determinando se as mesmas vão ou não alcançar os aquíferos com potencial poluidor.

Os topos dos morros são considerados pontos estratégicos para o abastecimento do depósito de água subterrânea, tanto dos aquíferos freáticos quanto dos artesianos, e por isso são considerados áreas de recarga. As matas de topo de morro propiciam uma maior e melhor infiltração e percolação das águas das chuvas, fazendo com que o solo absorva grande parte desta água, favorecendo a recarga dos lençóis subterrâneos (Martins & Dias, 2001). A descarga dos aquíferos subterrâneos pode ocorrer quando a água aflora do subsolo, na forma de nascentes. Sendo assim, a água subterrânea é a fonte primária de água doce em todo o mundo.

2.4 Nascentes

As nascentes também conhecidas por olhos d'água, fio d'água, mina d'água e fonte, são pontos na superfície do solo, de onde aflora naturalmente água proveniente de aquíferos subterrâneos, principalmente os freáticos, mesmo que de forma intermitente (Pinto et al., 2004). Calheiros (2004) define a nascente como sendo o afloramento do aquífero freático, que vai dar origem a

uma fonte de água de acúmulo (represa), ou cursos d'água (ribeirões, córregos e rios).

A água que drena de uma nascente formará o ribeirão que irá contribuir para o volume de outro curso d'água, e assim, sucessivamente formando os grandes cursos d'água (sendo basicamente as responsáveis pela existência dos cursos d'água nas bacias hidrográficas) essenciais aos abastecimentos urbanos, rurais, geração de energia, dentre outras finalidades (Alvarenga, 2004). Portanto, o desaparecimento de uma nascente resultará na redução da vazão nos cursos d'água e conseqüentemente na disponibilidade de água para diversos fins (Castro, 2001). Conforme Calheiros (2004), a nascente ideal é aquela que fornece água de boa qualidade, abundante e contínua localizada próxima do local de uso e de cota topográfica elevada, possibilitando sua distribuição por gravidade, sem gasto de energia.

Calheiros (2004) ressalta ainda que, além da quantidade de água produzida pela nascente, é desejável que tenha boa distribuição no tempo, ou seja, a variação da vazão situe-se dentro de um mínimo adequado ao longo do ano. Para que boas vazões aconteçam nos cursos d'água ao longo do ano, são necessárias boas nascentes, e como estas têm origem nos aquíferos subterrâneos, é necessário que estes sejam bem abastecidos durante os períodos chuvosos. Assim, as vazões das nascentes dependem da quantidade de água armazenada nos aquíferos subterrâneos, que por sua vez, depende da quantidade de água da chuva que infiltra e percola até eles (Valente & Dias, 2001). Assim as áreas de recarga de aquíferos subterrâneos devem absorver boa parte da precipitação pluvial através do solo, ter boa capacidade de percolação no perfil do solo, armazená-la no aquífero subterrâneo e cedê-la, aos poucos, aos cursos d'água através das nascentes, mantendo a vazão destas, sobretudo durante os períodos de seca. A manutenção das vazões nas nascentes é fundamental tanto para o uso

econômico e social da água (bebedouros, irrigação e abastecimento público), como para a manutenção do regime hídrico do curso d'água principal.

A quantidade e a qualidade das águas em nascentes de uma bacia hidrográfica podem ser alteradas por diversos fatores, destacando-se a declividade do terreno, o tipo de solo e seu uso, respondendo estes diretamente às ações antrópicas, principalmente nas áreas de recarga das nascentes, pois influenciam no armazenamento da água subterrânea (Pinto et al., 2004). Assim a conservação da água não pode ser conseguida independentemente da conservação dos outros recursos naturais, presentes nas bacias hidrográficas.

Castro (2001) relata que as nascentes podem ser classificadas quanto ao regime de escoamento, em perenes, sendo aquelas que produzem fluxo de água contínuo o ano todo, inclusive na estação seca, mas com vazões variando ao longo do ano; intermitentes, aquelas que apresentam produção de água durante a estação das chuvas e secam nas estiagens e em efêmeras, sendo aquelas que produzem fluxo somente em resposta direta à precipitação, ocorrendo apenas durante ou após a ocorrência de chuvas. A perenidade de uma nascente é resultante da manutenção do nível do aquífero subterrâneo e da sua recarga, e quando suas áreas de acumulação venham sofrer intervenções de impacto, a qualidade e a quantidade de água podem ser comprometidas (Pinto, 2003).

Conforme citado em Davide et al. (2002), as nascentes podem ser classificadas em pontuais e difusas. A nascente pontual ocorre devido à inclinação da camada impermeável ser menor que a da encosta, ocasionando o encontro delas em um determinado ponto do terreno, que constitui a nascente, apresentando assim a ocorrência de água em um único ponto do terreno, ocorrendo geralmente em grotas e regiões montanhosas. A nascente difusa é formada quando a camada impermeável do solo situa-se paralela à parte mais baixa e plana do terreno e, devido à proximidade com a superfície, o fluxo d'água resultará em um aumento no nível do lençol freático, fazendo com que este

nível atinja a superfície do solo, propiciando desta maneira o surgimento de um grande número de pequenas nascentes espalhadas por todo o terreno. Estas ocorrem principalmente nos brejos e matas localizadas nas partes baixas do terreno.

Valente & Gomes (2003) classificam as nascentes, quanto à origem, podendo ser formadas tanto por aquíferos freáticos quanto artesianos, podendo surgir por contato das camadas impermeáveis com a superfície, por afloramento dos lençóis em depressões do terreno, por falhas geológicas ou por canais e galerias formadas em rochas cársticas (rochas carbonatadas). Os autores ressaltam que o mais importante é diferenciar nascentes freáticas de nascentes artesianas, devido ao seu abastecimento. Em nascentes freáticas os lençóis são abastecidos em áreas próximas, enquanto que nascentes artesianas podem estar sendo abastecidas por áreas distantes do ponto de emergência e por vezes de difícil identificação. Um fato bem característico é que as nascentes freáticas têm reações mais rápidas ao regime de chuvas ou ao uso do solo em áreas próximas ao local de sua ocorrência.

Nos aquíferos freáticos as vazões das nascentes apresentam grande variabilidade temporal ao longo do ano, enquanto que em aquíferos artesianos não há variação significativa da vazão ao longo do ano (Junqueira Júnior, 2006).

Como os escoamentos das nascentes são alimentados pela drenagem dos aquíferos, constituindo o chamado de fluxo de base, que por sua vez depende da quantidade de água armazenada nos aquíferos e de suas propriedades de transmissão de água, decrescendo exponencialmente ao longo do tempo (Cabral et al., 2003), como representado pela Equação 01, conhecida como “Fórmula de Maillet” (Castany, 1967).

$$Q_t = Q_{t_0} \cdot \exp^{-\alpha t} \quad (01)$$

em que Q_t é a vazão da nascentes num instante t (L^3T^{-1}); Q_{t_0} é a vazão da nascente no primeiro dia do monitoramento (L^3T^{-1}); α é o coeficiente de

recessão, representa a taxa de decaimento da vazão com o tempo (T^{-1}) (sendo função da permeabilidade do solo e das características do fluido) e t é o intervalo de tempo decorrido entre t_0 e t (T).

Os fluxos de base que sustentam as nascentes, provenientes dos aquíferos subterrâneos, têm grande importância não só espacial, mas também temporal, pois são capazes de possibilitar a produção de água nos períodos de estiagem.

Toda intervenção em nascente (o mesmo se aplica para córregos, rios e lagos) deve ser precedida de consulta e respectiva autorização por parte dos órgãos competentes de controle, orientação e fiscalização das atividades de uso e exploração dos recursos naturais.

Segundo a Lei Federal nº 4.771 de 15 de setembro de 1965, alterada pela Lei nº 7.803 de 7 de julho de 1986 e a Medida Provisória nº 2.166-67, de 24 de agosto de 2001,

Consideram-se de preservação permanente, pelo efeito de Lei, as áreas situadas nas nascentes, ainda que intermitentes e nos chamados “olhos d’água”, qualquer que seja a sua situação topográfica, devendo ter um raio mínimo de 50 (cinquenta) metros de largura (Brasil, 1965, 1989, 2001).

Segundo os Artigos 2º e 3º da Lei Federal nº 4.771

área de preservação permanente: a área protegida pode ser coberta ou não por vegetação nativa, com a função ambiental de preservar os recursos hídricos, a paisagem, a estabilidade geológica, a biodiversidade, fluxo gênico de fauna e flora, proteger o solo e assegurar o bem-estar das populações humanas (Brasil, 1965).

Não são apenas as áreas de preservação permanente relacionadas aos cursos d’água que asseguram a qualidade e quantidade de água drenada pela bacia hidrográfica. Deve-se atentar também, em relação à proteção das áreas de recarga, de modo a assegurar uma maior quantidade de infiltração de água no solo e, conseqüentemente, um maior abastecimento dos aquíferos subterrâneos. Tais áreas estão, em alguns casos, incluídas no artigo 3º da Resolução CONAMA nº 303, de 20 de março de 2002, que

constitui Área de Preservação Permanente (APP) a área situada: a) no topo de morros e montanhas, em áreas delimitadas a partir da curva de nível correspondente a dois terços da altura mínima da elevação em relação à base; b)

nas linhas de cumeada, em área delimitada a partir da curva de nível correspondente a dois terços da altura, em relação à base, do pico mais baixo da cumeada, fixando-se a curva de nível para cada segmento da linha de cumeada equivalente a mil metros; c) em encosta ou parte desta, com declividade superior a cem por cento ou quarenta e cinco graus na linha de maior declive (Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA, 2002).

Ressalta assim a importância da manutenção e preservação das áreas de recarga no intuito de assegurar a recarga dos aquíferos, qualidade e continuidade das vazões das nascentes e, conseqüentemente a contribuição destas para a formação dos cursos d'água de maior porte. Neste sentido a legislação ambiental tem o intuito de assegurar a sustentabilidade dos recursos naturais.

2.5 Recarga dos aquíferos subterrâneos

As reservas hídricas subterrâneas ao longo da história vêm sendo um tema bastante questionado e discutido e atualmente esse tema tem se tornando prioritário para os órgãos gestores dos recursos hídricos, uma vez que a demanda por esses recursos vem aumentando consideravelmente (Formaggio, 2007). A quantificação de reservas hídricas subterrâneas é uma questão crucial no âmbito social e econômico, que passa, fundamentalmente, por questões técnicas, ou seja, é imprescindível que sistemas aquíferos sejam detalhadamente estudados por profissionais especializados, a fim de se conhecer e quantificar de maneira mais precisa os recursos passíveis de exploração visando uma questão apropriada à realidade socioeconômica de diversos locais. Segundo Paralta et al. (2003) os estudos de recarga aquífera são fundamentais para a estimação do volume de recursos hídricos subterrâneos anualmente renováveis e têm implicações diretas no planejamento e gestão integrada dos recursos hídricos regionais. A quantificação da recarga das águas subterrâneas é um pré-requisito básico para um eficiente manejo dos recursos hídricos e é particularmente vital em regiões semiáridas e áreas onde há superexploração, já que tais recursos são frequentemente a chave do desenvolvimento econômico (Barreto, 2006).

O reabastecimento da água subterrânea, ou seja, sua recarga é fundamental para que este recurso natural se mantenha em quantidades adequadas. Uma correta avaliação da recarga aquífera é fundamental no cálculo das disponibilidades hídricas para abastecimento público, industrial e para agricultura, em especial em zonas de conflito de interesses, em períodos de estiagens ou em anos consecutivos de seca.

A área por onde ocorre o abastecimento do aquífero é denominada área de recarga. Em geral, a recarga das águas subterrâneas vem sendo definida como o fluxo de água que alcança o aquífero, constituindo uma adição ao reservatório de água subterrânea (Lerner et al., 1990; Vries & Simmers, 2002). Pode ainda ser conceituada, como apresentado por Paralta et al. (2003), como a quantidade de água que, em determinado tempo, entra na zona saturada (aquífero), preferencialmente a partir da percolação vertical proveniente da zona não saturada, mas também do escoamento lateral a partir das fronteiras do sistema. Ainda pode ser conceituada como um processo de movimento de água que atinge a zona saturada sob forças gravitacionais, ou em uma direção específica por condicionamento hidráulico (Vasconcelos, 2005).

A principal fonte de recarga dos aquíferos é a chuva, que pode penetrar o solo diretamente e percolar para a zona de águas subterrânea (Fazal et al., 2005). Paiva (2006) explica que alguns eventos de chuva de pouca intensidade e duração, não provocam contribuições diretas à recarga de águas subterrâneas. A água efetivamente infiltrada não é, necessariamente, o resultado de um único evento de chuva, mas pode representar uma série de eventos precedentes de chuva. Dependendo das características do aquífero, parte da água infiltrada pode provocar uma elevação no nível freático, e conseqüentemente um aumento no gradiente de descarga. Segundo o mesmo autor, a recarga de aquíferos também pode ocorrer pela infiltração de rios, canais e lagos e por fenômenos induzidos por atividades humanas, como irrigação e a urbanização.

Informações sobre uso e ocupação do solo são importantes na avaliação da recarga. Segundo Maziero (2005), a recarga dos aquíferos está diretamente relacionada com a cobertura da superfície do solo. Nas regiões de relevo acidentado, sem cobertura vegetal, sujeitas a práticas de uso e ocupação que favorecem as enxurradas, a recarga ocorre mais lentamente e de maneira limitada. A textura do solo e sua permeabilidade também são importantes na avaliação da recarga, devido ao fato de que solos de granulação grosseira geralmente resultam em taxas de recarga maiores que solos de granulação fina (Paiva, 2006).

Scanlon et al. (2002), relatam que a quantificação da recarga é fortemente influenciada pelas condições climáticas, regiões de clima úmido são normalmente caracterizadas por uma superfície freática rasa, rios efluentes e recarga difusa. As taxas de recarga nestas regiões são frequentemente limitadas pela capacidade do aquífero transmitir e armazenar água, processos que são fortemente influenciados pela geologia subssuperficial. Por outro lado, regiões de clima seco apresentam, normalmente, uma superfície freática profunda, rios influentes e recarga concentrada. As taxas de recarga são limitadas em grande parte pela água disponível na superfície do terreno, que é controlada por fatores climáticos, como a precipitação e evapotranspiração e pelas características geomorfológicas superficiais (topografia, tipo de solo e cobertura vegetal).

Quando se compara bacias hidrográficas com bacias hidrogeológicas, uma diferença significativa pode ser observada quanto à área de recarga. Tipicamente as áreas de recarga de bacias hidrográficas estão associadas a regiões topograficamente elevadas da bacia. Já no contexto hidrogeológico, a definição das áreas de recarga pode ser bastante complicada, como no caso das bacias associadas à aquíferos não confinados, onde a localização da área de recarga pode ser fortemente variável a depender de fatores como a distribuição

da precipitação, permeabilidade do meio e configuração da superfície do terreno (Winter et al., 2003).

2.5.1 Tipos de recarga subterrânea

De forma geral, segundo Vries & Simmers (2002), três tipos de recarga aquífera podem ser distinguidos, dependendo da fonte:

- Recarga direta: é um processo que acontece abaixo do ponto de impacto da precipitação por movimento vertical através da zona não-saturada. A recarga direta pode ser definida como a parcela da precipitação que vence a zona não-saturada e soma-se à reserva subterrânea;
- Recarga indireta: descreve os processos em que a recarga ocorre por características introduzidas pelo homem através de atividades de irrigação e urbanização, assim como por rios e depressões de superfícies topográficas (reservatórios, lagos, etc.);
- Recarga localizada: é um processo pontual de recarga, em que a água move-se em curtas distâncias lateralmente antes da infiltração.

Levando em consideração o fator tempo, Balek (1998) e Barreto (2006), identificou quatro tipos de recarga:

- Recarga curta: que ocorre após grandes eventos de chuva;
- Recarga sazonal: que ocorre durante o degelo em regiões de clima temperado ou em períodos chuvosos em regiões com estações secas e chuvosas bem definidas;
- Recarga perene: que ocorre nos trópicos úmidos onde existe fluxo contínuo de água;
- Recarga histórica: aquela que ocorreu há um longo tempo atrás e que foi responsável pela formação dos recursos hídricos existentes.

Os estudos de estimativa de recarga baseados em dados da zona superficial e da não-saturada proporcionam estimativas da recarga potencial, enquanto que os estudos que se fundamentam em dados da zona saturada proporcionam, geralmente, estimativas da recarga real (Scanlon et al., 2002).

As medidas de flutuações do nível d'água em piezômetros e em poços de observação são bases importantes de muitos estudos de água subterrânea. No entanto, oscilações no nível d'água podem resultar de uma variedade de fenômenos hidrológicos, alguns naturais (evapotranspiração, pressão atmosférica, variações na temperatura, ventos, terremotos, etc.) e alguns induzidos pelo homem (cargas externas, bombeamento de poços, etc.), que podem conduzir a flutuações do nível d'água e não representarem a verdadeira recarga subterrânea (Freeze & Cherry, 1979). Em muitos casos, pode haver mais do que um mecanismo operando simultaneamente, e para que as medidas sejam interpretadas corretamente é importante o conhecimento e o entendimento dos vários fenômenos atuantes. De acordo com Paiva (2006) para aplicação de qualquer método de estimativa de recarga, todos os fatores e fatos citados acima devem ser considerados, ou ao menos previstos.

2.5.2 Métodos de estimativa da recarga subterrânea

Existe uma diversidade de métodos para estimativa da recarga. Tais métodos produzem estimativas ao longo de várias escalas de tempo e espaço e podem ser usados em uma gama de complexidades e adversidades (Healy & Cook, 2002). Barreto (2006) relata que apesar da maioria dos métodos fornecerem valiosas informações sobre recarga, eles nem sempre são diretamente aplicáveis. Para Xu & Beekman (2003), os métodos baseados em relações entre precipitação e variações da superfície piezométrica têm um maior potencial de prever a recarga subterrânea. Esses métodos são iterativos e envolve refinamentos contínuos da taxa de recarga quando dados adicionais são

coletados. Embora vários métodos de estimativa da recarga aquífera sejam descritos na literatura, este estudo apresenta uma junção de dois métodos para a estimativa da recarga: o método do balanço hídrico e o método da flutuação da superfície livre.

a) **Método do Balanço Hídrico**

As etapas do ciclo hidrológico, ocorridas dentro de regiões de interesse, podem ser contabilizadas por meio de um balanço hídrico, tendo este grande variabilidade espacial. O balanço hídrico envolve a quantificação dos componentes do sistema visando ao melhor entendimento do seu comportamento e a utilização racional dos recursos hídricos e baseia-se no princípio de conservação de massa e troca de energia dos sistemas envolvidos, no tempo e no espaço (Zakia, 1987; Tucci et al., 2007). A conservação de massa, para certo volume de controle, significa que a taxa de variação de massa armazenada seja igual à diferença entre o somatório das quantidades de água que entra e que sai de um elemento de volume de solo, num dado intervalo de tempo (Mendonça, 2003). A bacia hidrográfica, quando utilizada como volume de controle, é o elemento fundamental para a análise do ciclo hidrológico.

O balanço hídrico (Figura 1) para um determinado volume de controle hidrológico pode ser descrito como:

$$P + Q_e = ET + Q_s + \Delta S + I \quad (02)$$

em que P é a precipitação (e pode incluir também a irrigação); Q_e e Q_s são os fluxos de água que entra e sai do sistema, respectivamente; ET é a evapotranspiração; ΔS é a variação do armazenamento da água no solo, e I é a interceptação (Barreto, 2006). O intervalo de tempo das variáveis é adotado de acordo com o interesse e a disponibilidade dos dados (Mello, 2003).

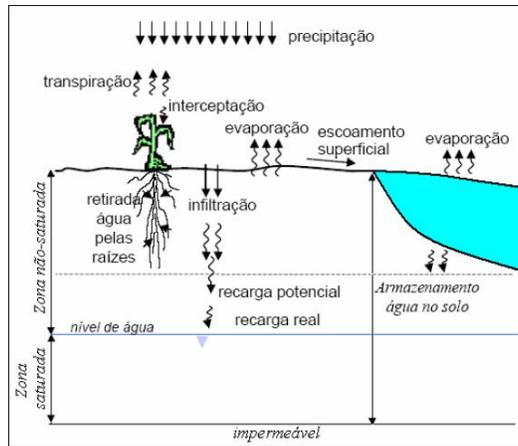


FIGURA 1 Componentes do ciclo hidrológico para o balanço hídrico (Barreto, 2006).

Os componentes do ciclo hidrológico a serem representados na equação de balanço hídrico dependem dos limites estabelecidos, da mesma forma que as grandezas representativas de tais componentes devem ser empregadas em unidades compatíveis, sejam elas volumétricas (L^3), de descarga (L^3T^{-1}), ou lâminas (L).

As ações antrópicas que alteram os componentes básicos que determinam o balanço hídrico influenciam na disponibilidade dos recursos hídricos de uma bacia hidrográfica. O uso do solo com remoção da cobertura vegetal e implantação de agricultura sem controle da erosão, por exemplo, degrada os recursos hídricos, pelo aumento do escoamento superficial direto que promove assoreamento de rios, lagos e represas (Salati et al., 1999).

Conforme Barreto (2006) dividindo-se o volume de controle (subsolo) em subcomponentes, é possível reescrever a equação do balanço hídrico diferenciando a zona saturada (z_s) e a zona não-saturada (z_{ns}). Então os componentes Q_e , Q_s , ET e ΔS podem ter subcomponentes nas duas regiões.

O balanço hídrico subterrâneo de um aquífero requer a quantificação de todos os fluxos de entrada e saída do sistema aquífero e as mudanças no

armazenamento para um dado período de tempo. Para a zona saturada, a equação pode ser escrita como (Schicht & Walton, 1996; Scanlon et al., 2002)

$$R = \Delta S^{zs} + q_b + ET^{zs} - Q_s^{zs} + Q_e^{zs} \quad (03)$$

em que R é a recarga; ΔS^{zs} é a variação do armazenamento na zona saturada; q_b é o fluxo de base drenado pelo efluente; ET^{zs} é a evapotranspiração subterrânea, e $Q_s^{zs} - Q_e^{zs}$ é o fluxo subsuperficial da área de estudo e inclui efeitos de bombeamento. Todas as variáveis são expressas como taxa (mm/ano).

A maior vantagem do método de balanço hídrico reside no fato da utilização de dados, geralmente, disponíveis (precipitação, escoamento superficial e níveis d'água) (Wendland et al., 2007). Porém, segundo Scanlon et al. (2002), a maior limitação do método do balanço hídrico é que a precisão da estimativa de recarga depende da precisão com que os componentes da equação foram medidos ou estimados. Deve-se atentar que em qualquer processo que envolva a quantificação de informações, a precisão dos dados coletados é um requisito desejável e necessário, sendo a designação feita por Scanlon et al. (2002) não uma limitação e sim um requisito, para uma boa estimativa da recarga pelo método do balanço hídrico.

b) Método da Flutuação da Superfície Livre

O Método da Flutuação da Superfície Livre (WTF – Water Table Fluctuation) também conhecido como método de variação do nível d'água (VNA), é a técnica mais amplamente usada para a estimativa da recarga (Maziero, 2005). O método WTF só é aplicável aos aquíferos livres e requer o conhecimento do rendimento específico da formação geológica e das variações nos níveis d'água ao longo do tempo (Barreto, 2006). Segundo Bertol (2007), os melhores resultados são obtidos em áreas com nível d'água raso, possibilitando rápidas elevações com a precipitação, já que níveis profundos tendem a não apresentar grande variação. A acuidade das medidas é de grande importância, pois a lâmina da água precipitada em cada evento pode compreender algumas

dezenas de milímetros e seu efeito sobre o nível d'água é pequeno (Wahnfried & Hirata, 2005).

Segundo Wahnfried & Hirata (2005), a maior vantagem da avaliação da recarga pelo modelo WTF é a sua simplicidade, pois não é necessário levar em conta os mecanismos de transporte que regem a passagem de água na zona não-saturada, o que permite desconsiderar, por exemplo, a existência de caminhos preferenciais de fluxo. Porém, para usar esse modelo, é preciso levar em consideração alguns aspectos, já que diversos fenômenos relacionados às alterações naturais (clima) e as atividades antrópicas (uso e ocupação do solo) ao longo de décadas causam oscilação do nível d'água ao longo do tempo.

O método WTF parte da premissa de que as elevações nos níveis d'água em aquíferos não-confinados devem-se à água (recarga subterrânea) que chega à superfície livre do aquífero. A recarga é calculada da seguinte forma (Healy & Cook, 2002; Scanlon et al., 2002; Wahnfried & Hirata, 2005):

$$R = S_y \cdot \frac{dh}{dt} = S_y \cdot \frac{\Delta h}{\Delta t} \quad (04)$$

em que R é a recarga (LT^{-1}), S_y é o rendimento específico do aquífero; h é o nível freático (L), e t é o tempo (T).

O rendimento específico de um aquífero livre é virtualmente igual ao coeficiente de armazenamento, sendo da ordem da porosidade útil do meio (Barreto, 2006). A porosidade útil pode ser entendida como a razão entre o volume de água drenável por gravidade de um solo inicialmente saturado com água, em um tempo infinito, e o volume total do solo. Na equação 04 assume-se que a água que atinge o nível freático entra imediatamente em armazenamento e que todas as outras componentes do balanço hídrico subterrâneo (evapotranspiração subterrânea, fluxo de base, entrada e saída de fluxo subssuperficial) são nulos durante o período de recarga (Wendland et al., 2007).

Healy & Cook (2002) definiram que a aplicação da equação 04 para todas as elevações individuais do nível de água determina uma estimativa da recarga total, sendo que Δh é igual à diferença entre o pico de subida e o ponto mais baixo da curva de recessão antecedente extrapolada até o instante do pico. A curva de recessão antecedente é o traço que o nível do poço de observação teria seguido na ausência da elevação do nível d'água (Figura 2). Essa extrapolação é subjetiva e tenta acomodar a defasagem entre o início da precipitação e o conseqüente início da variação de nível, resultante do processo natural de escoamento através da zona não-saturada (Barreto, 2006).

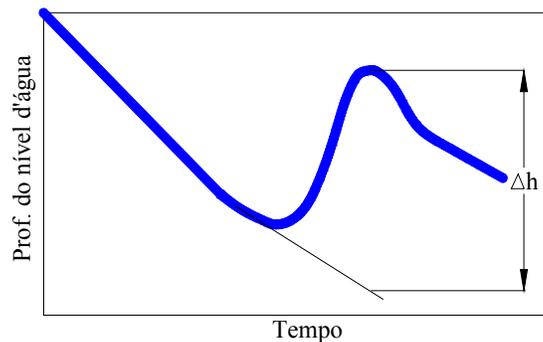


FIGURA 2 Extrapolação da curva de recessão do nível d'água para estimativa da recarga total (Barreto, 2006).

O método WTF pode ser visto como uma aproximação integrada e não como uma medida pontual quando comparado com os métodos aplicados na zona não-saturada (Healy & Cook, 2002). No entanto, tem as seguintes limitações:

- É mais bem aplicado a níveis freáticos rasos que exibem súbitas elevações e declínios do nível d'água. Aquíferos profundos podem não exibir súbitas variações, resultado de frentes de umidade que tendem a dispersar-se ao percorrer longas distâncias (Healy & Cook, 2002; Scanlon et al., 2002).

- As taxas de recarga variam substancialmente dentro de uma bacia, devido a diferenças na topografia, geologia, declividade da superfície do terreno, vegetação, e outros fatores. A maior dificuldade está na locação dos piezômetros, de forma que representem espacialmente as fontes de recarga (Healy & Cook, 2002).
- O nível da água subterrânea sobe e desce em resposta a muitos fenômenos diferentes e as flutuações nem sempre são indicativas de recarga ou descarga de água subterrânea (Healy & Cook, 2002).
- Geralmente, níveis d'água subterrânea flutuam de acordo com as características dos eventos de precipitação (quantidade, duração e intensidade) e de variáveis hidrogeológicas (topografia, espessura da zona não-saturada e composição dos materiais da zona saturada e não-saturada) (Moon et al., 2004).
- A incerteza gerada por este método está relacionada à precisão com que o rendimento específico pode ser determinado e até que ponto as suposições inerentes ao método são válidas (Healy & Cook, 2002).

No Brasil, Wahnfried & Hirata (2005) utilizaram uma combinação de três técnicas de estimativa de recarga para avaliar a recarga de águas subterrâneas em uma planície aluvionar da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê, no campus da USP em São Paulo. Estes autores utilizaram o método da flutuação da superfície livre (WTF), o método do balanço hídrico e a estimativa darcyniana, encontrando os menores valores para a recarga estimada pelo método do balanço hídrico (48 mm) e os maiores para a recarga estimada pelo método da flutuação da superfície livre (187 mm), ficando a recarga estimada pela Lei de Darcy com um valor intermediário a estes dois apresentados (66 mm). O total precipitado no ano 2003, ano de realização deste estudo, foi de 908

mm, o que dá uma variação da recarga de 5,3% a 20,6% do total precipitado em 2003 para as condições de estudo.

Maziero & Wendland (2005), utilizaram o método da flutuação da superfície livre na determinação da recarga de água subterrânea de bacias urbanas no município de São Carlos-SP e encontraram valores com grande variabilidade espacial, entre 130 mm (8,2% da precipitação anual de 1596,5 mm) e 540 mm (34% desta mesma precipitação).

Cutrim & Rebouças (2004) também utilizando o método WTF utilizaram dados de vários poços de monitoramento do nível d'água instalados no aquífero Furnas, localizado no município de Rondonópolis-MT, e encontraram valores de recarga que variaram de 150 mm a 240 mm, correspondendo, respectivamente a 8% e 14% da precipitação média anual da área, que é de 1700 mm.

Bertol (2007) em estudos sobre a recarga anual no aquífero Bauru no município de Araguari-MG, utilizando o método WTF para o ano hidrológico 2003/2004, encontrou um valor de 470 mm de recarga anual do aquífero.

Paiva (2006) estimou a recarga em uma unidade dentrítica de uma micro-bacia do Rio Piranga, no município de Paulo Cândido-MG (zona da mata Mineira) e encontrou um valor de recarga subterrânea anual de 183,3 mm utilizando o método WTF.

Outro estudo realizado no Brasil utilizando o método da flutuação da superfície livre foi realizado por Barreto (2006), no qual foi estimada a recarga direta na bacia hidrográfica do Ribeirão da Onça (zona de afloramento do sistema aquífero Guarani), localizada na região do município de Brotas-SP, no ano de 2005, que apresentou um valor entre 313 e 407 mm, correspondente a 22 e 29%, respectivamente, da precipitação total (1410 mm). A recarga profunda, obtida de um balanço hídrico, indicou um valor de 49 mm para um rendimento

específico de 13%, correspondendo a 3,5% da precipitação total no período analisado.

2.6 Sistemas de Informações Geográficas (SIGs)

Um Sistema de Informações Geográficas (SIG) tem como principais características a capacidade de inserir e integrar, numa única base de dados, informações espaciais provenientes de dados cartográficos, dados censitários e cadastro urbano e rural, imagens de satélite, redes e modelos numéricos de terreno; oferecer mecanismos para combinar as várias informações, através de algoritmos de manipulação e análise, bem como para consultar, recuperar, visualizar e plotar o conteúdo da base de dados georreferenciados (Câmara & Medeiros, 1996). Segundo Felgueiras (1987), os SIGs são sistemas que automatizam tarefas realizadas manualmente e facilitam a realização de análises complexas, através da integração de dados geo codificados.

Um SIG pode ser considerado um instrumento para mapear e indicar respostas às várias questões sobre planejamento urbano e regional, meio rural e levantamento dos recursos renováveis, descrevendo os mecanismos das mudanças que operam no meio ambiente e auxiliando no planejamento e manejo dos recursos naturais de regiões específicas (Ferreira, 1997).

A utilização de técnicas de geoprocessamento constitui-se em instrumento de grande potencial para o estabelecimento de planos integrados de conservação do solo e da água. Nesse contexto, os SIGs se inserem como uma ferramenta capaz de manipular as funções que representam os processos ambientais em diversas regiões de uma forma simples e eficiente, permitindo economia de recursos e tempo (Santos, 2007). O resultado destas manipulações, geralmente, é apresentado sob a forma de mapas temáticos com as informações desejadas (Mendes, 1997).

Os fenômenos reais do mundo podem ser observados de três modos distintos (Berry & Baker, 1968): espacial, temporal e temático. O modo espacial trata da variação de lugar para lugar. O modo temporal trata da variação de tempo para tempo (de uma época para outra). O modo temático trata da variação de uma característica para outra (de uma camada para outra).

Neste sentido, a utilização de um SIG neste trabalho teve como objetivo automatizar certas tarefas, espacializar dados geográficos e facilitar a interpretação do comportamento espacial destes por meio de mapas temáticos, utilizando-se o SIG ArcGIS® version 9.2.

3 MATERIAL E MÉTODOS GERAL

3.1 Localização e caracterização das áreas de estudo

O trabalho foi desenvolvido em duas sub-bacias hidrográficas inseridas na Unidade de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos do Alto Rio Grande (UPGRH-GD1) em Minas Gerais, escolhida com base em estudos hidrológicos prévios (Silva et al., 2005). A localização destas sub-bacias hidrográficas no estado de Minas Gerais é apresentada na Figura 3.

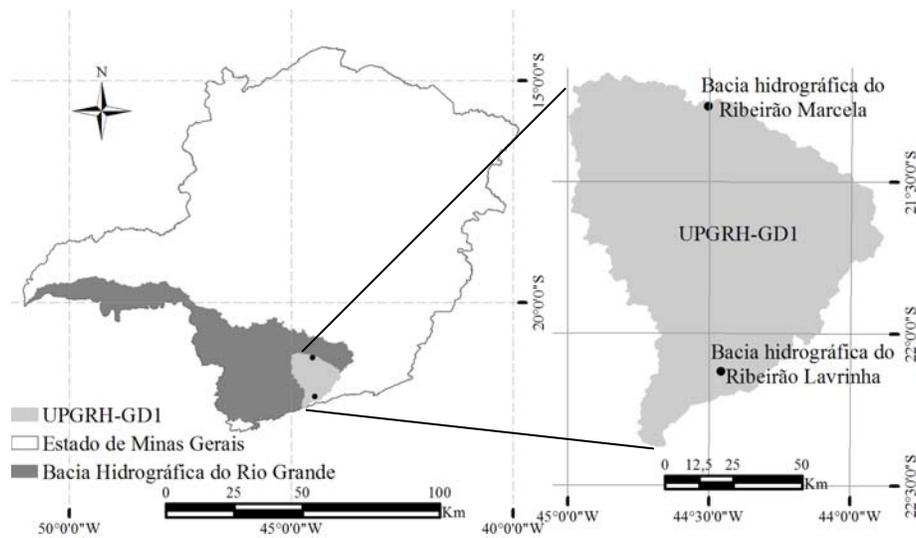


FIGURA 3 Mapa de situação das sub-bacias hidrográficas estudadas.

A primeira área de estudo corresponde a sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha, o qual deságua diretamente no Rio Grande, localizada na cidade de Bocaina de Minas-MG, compreendida entre as coordenadas N 7554424 m, E 553831 m e N 7551361 m, E 557856 m, fuso 45°WGr, no sistema de projeção UTM e Datum SAD69, estando ao sul da UPGRH-GD1, na Serra da Mantiqueira. Esta sub-bacia possui área de 676 ha, com altitudes variando de 1144 m a 1738 m, sendo sua altitude média de 1375 m e a declividade média de 38,5%.

Segundo Junqueira Júnior (2006), o clima na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha é do tipo Cwb conforme a classificação de Köppen, caracterizado como mesotérmico de verões brandos e suaves e estiagem de inverno. Conforme registros da estação meteorológica localizada na sub-bacia a precipitação média anual é de 1860 mm e a temperatura média anual está em torno de 17,5°C, com ocorrência de temperaturas máxima e mínima diária ao longo do ano de 32 e 2,7°C respectivamente, com ocorrência de geadas anualmente.

A Figura 4 representa o mapa de classes de declividade da sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha com as delimitações das áreas de recarga das nascentes monitoradas, sendo o fatiamento das classes de declividade conforme o proposto pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA (1979) onde se verifica grande variabilidade espacial do relevo nesta sub-bacia. As classes de declividade de maior relevância do relevo em termos de área correspondem ao relevo fortemente ondulado (20 a 45% de declividade) e montanhoso (45 a 75% de declividade) correspondendo a 43,4 e 29,7% da área total da bacia, respectivamente. Pela distribuição espacial do relevo esta sub-bacia é caracterizada como uma região de relevo bastante movimentado.

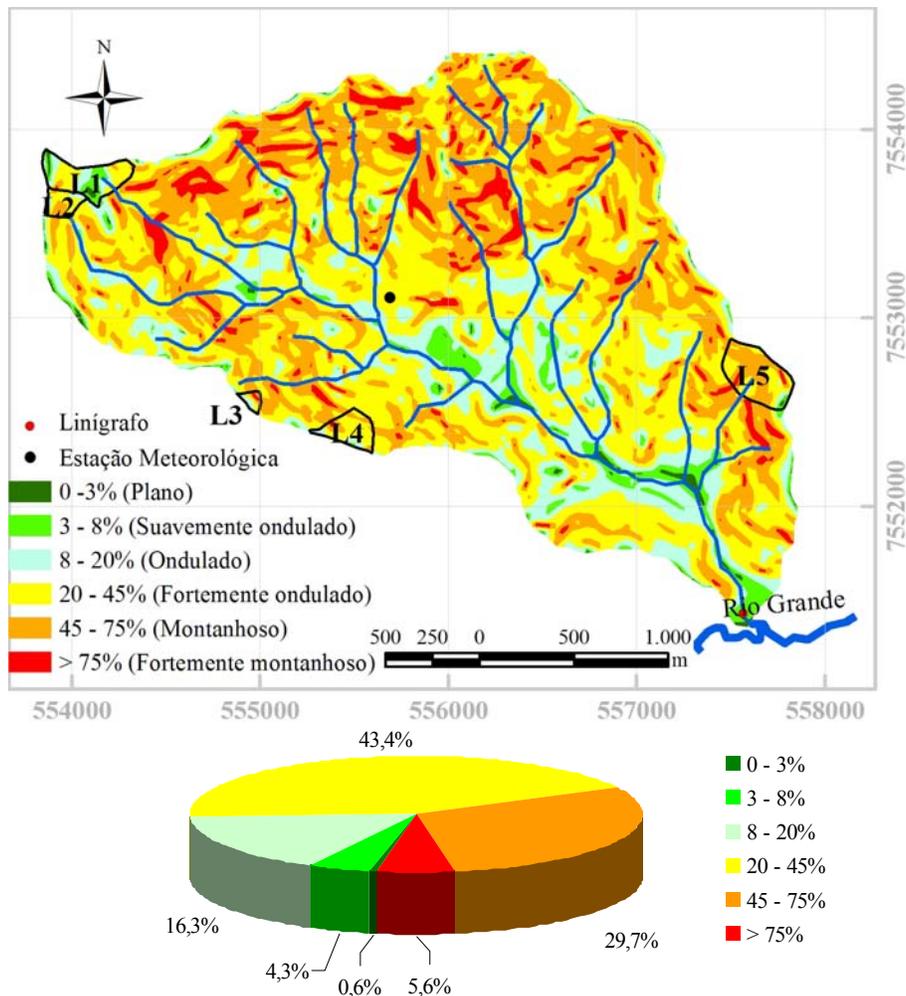


FIGURA 4 Mapa de classes de declividade da sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha e distribuição percentual dessas classes em relação à área da sub-bacia hidrográfica.

Segundo Menezes (2007) esta sub-bacia apresenta baixa capacidade de recarga de aquíferos do ponto de vista pedológico (92,7% da área composta por Cambissolos) e elevadas declividades, porém os excedentes hídricos são consideravelmente elevados, contribuindo para o escoamento subterrâneo na região.

A segunda área de estudo corresponde a sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, a qual deságua no Córrego Jaguará, que deságua diretamente no reservatório da UHE de Camargos/CEMIG, localizada na cidade de Nazareno-MG. A sub-bacia está compreendida entre as coordenadas N 7651088 m, E 550202 m e N 7648410 m, E 552724 m, fuso 45°WGr, no sistema de projeção UTM e Datum SAD69, estando mais ao norte da UPGRH-GD1. A sub-bacia do Ribeirão Marcela possui área de 470 ha, com altitudes variando de 955 m a 1059 m, sendo sua altitude média de 1007 m e a declividade média de 12,3%.

O clima, conforme a classificação de Köppen é do tipo Cwa, caracterizado como temperado com verões quentes e úmidos e invernos secos (Gomes, 2005). Conforme registros da estação meteorológica localizada na sub-bacia do Ribeirão Marcela, a precipitação média anual é de 1300 mm e a temperatura média anual está em torno de 19,7°C, com ocorrência de temperaturas máxima e mínima diária ao longo do ano de 36,2 e 2,6°C respectivamente.

Na Figura 5 apresenta-se o mapa de classes de declividade da sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela com as delimitações das áreas de recarga das nascentes monitoradas, sendo o fatiamento das classes de declividade conforme o proposto pela EMBRAPA (1979), onde se verifica menor variabilidade espacial do relevo quando comparado com a primeira sub-bacia. As classes de maior relevância do relevo, em termos de área, correspondem ao relevo suavemente ondulado (3 a 8% de declividade) e ondulado (8 a 20% de declividade) correspondendo a 27,1 e 46,2% da área total da bacia respectivamente. Pela distribuição espacial do relevo na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela pode-se caracterizá-la como uma sub-bacia de relevo suave.

A área M5 corresponde a área de recarga de uma nascente que se encontra fora da sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, drenando diretamente para o Córrego Jaguara. Devido às suas características hidrológicas, esta também encontra-se sob monitoramento hidrológico.

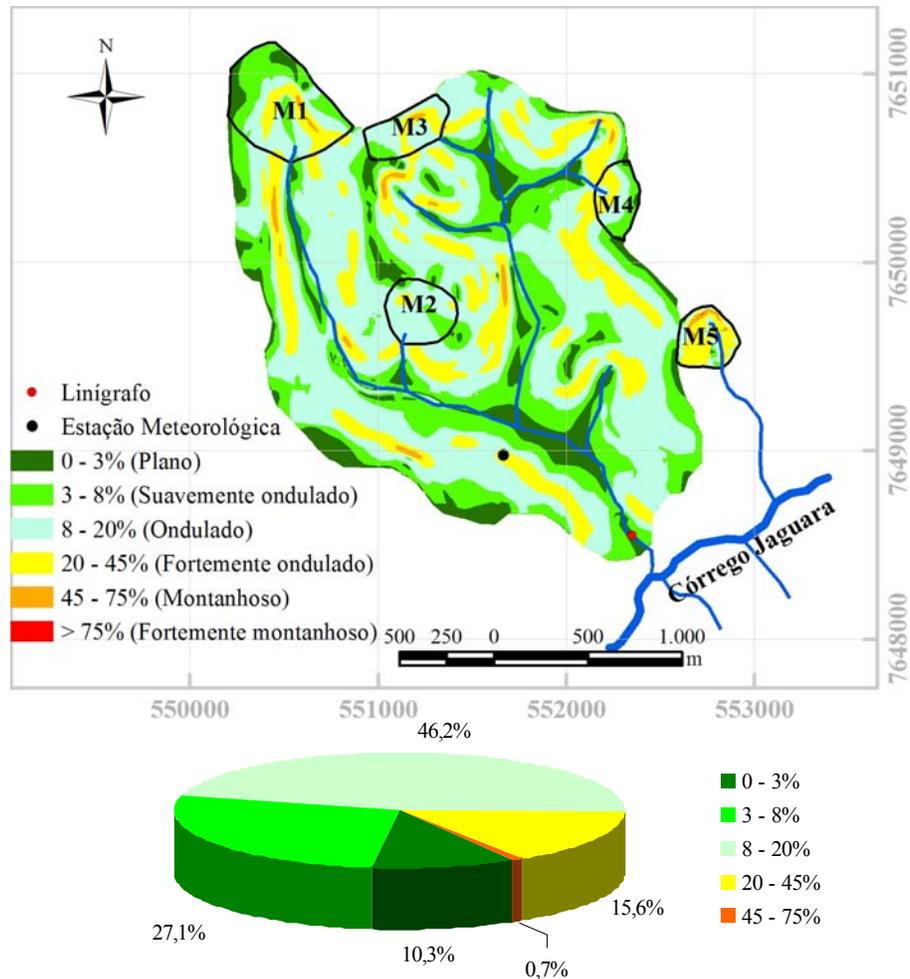


FIGURA 5 Mapa de classes de declividade da sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela e distribuição percentual dessas classes em relação à área da sub-bacia hidrográfica.

Segundo Gomes (2005) a sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela foi escolhida com base em estudo hidrológico prévio, como representativa para

estudos hidrológicos, associados à produção de água subterrânea, tendo sido relatada como uma sub-bacia com boas condições de recarga de aquíferos subterrâneos, do ponto de vista pedológico.

As duas sub-bacias estudadas estão em dois ambientes fisiográficos distintos, os quais são: sub-bacia do Ribeirão da Lavrinha, representando o domínio de Cambissolos, o relevo mais acentuado e uso do solo basicamente de florestas nativas e pastagens, localizada nas proximidades da nascente do Rio Grande, na Serra da Mantiqueira e a sub-bacia do Ribeirão Marcela, representando o domínio de Latossolos e agricultura mais tecnificada, localizada na parte norte da região do Alto Rio Grande.

3.2 Base cartográfica utilizada

A base cartografia utilizada para delimitação das bacias foi extraída das cartas topográficas vetoriais do mapeamento sistemático publicadas pelo IBGE, na escala 1:50.000, disponibilizadas no site do Instituto. Utilizou-se a carta SF-23-2-A-II-1 (Bocaina de Minas) para a delimitação da sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha e as cartas SF-23-X-C-I-2 (Nazareno), SF-23- X-C-II-1 (São João Del Rei), SF-23-X-C-I-4 (Itutinga), SF-23-X-C-II-3 (Madre de Deus) para a delimitação da sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela.

Foram obtidos com um receptor GPS modelo 76CSx marca Garmin os pontos referentes aos linígrafos, estação meteorológica e aos pontos de afloramento das nascentes.

Nas nascentes L1, L5, M3 e M5 foram feitos levantamentos topográfico planialtimétrico georreferenciado, onde se detalhou e delimitou de forma minuciosa toda área de recarga destas nascentes. Utilizou-se para tal uma estação total modelo 305 marca Trimble para o levantamento topográfico do local e um par de receptores GPS modelo Hiper® Lite marca Topcon para o transporte das coordenadas geodésicas locais, conforme metodologia descrita em

Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária - INCRA (2003). Na Figura 6 pode-se verificar uma ilustração dos equipamentos utilizados.



FIGURA 6 Equipamentos utilizados nos levantamentos topográficos; a) estação total marca Trimble modelo 305 e b) receptor GPS marca Topcon modelo Hiper® Lite.

As nascentes foram selecionadas segundo dois critérios: a) estar sob domínio de uma mesma unidade pedológica; b) possuir diferentes ocupações do solo nas áreas de recarga (L5 e M5 ocupadas com mata nativa e L1 e M3 ocupadas por pastagem).

Toda a etapa de processamento das informações cartográficas foi realizada utilizando o SIG (Sistema de Informações Geográficas) ArcGIS® version 9.2.

3.3 Delimitação das sub-bacias hidrográficas e áreas de recarga das nascentes

Com o propósito de gerar um modelo digital de elevação (MDE) com valores representativos do relevo, foi realizada a interpolação linear entre os valores altimétricos das curvas de nível e os pontos cotados das cartas do IBGE. Posteriormente à interpolação, deu-se início à eliminação das distorções da grade de interpolação, que consisti na correção da imagem gerada, por meio do preenchimento das depressões espúrias ou eliminação de picos gerados por erros na interpolação. Estes foram corrigidos atribuindo a eles um valor baseado nos

valores médios das células da vizinhança, fazendo haver coincidência entre a drenagem derivada numericamente e a drenagem mapeada (Ribeiro, 2003), conforme demonstra a Figura 7, obtendo-se assim um modelo digital de elevação hidrológicamente consistente (MDEHC).

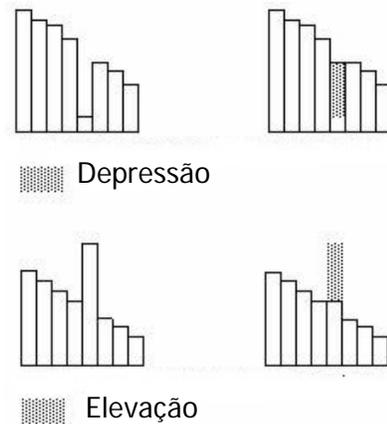


FIGURA 7 Esquema representando a eliminação das distorções das grades de interpolação (Santos, 2001).

A partir do MDEHC e de ferramentas específicas do software ArcGIS® version 9.2 foi possível delimitar as sub-bacias hidrográficas de forma automatizada, conforme descrito em Santos (2007).

A área de recarga é fundamental para definir a potencialidade hídrica de armazenamento e captação da bacia hidrográfica, sendo esta, a área acumulada de drenagem em planta (projeção horizontal), acima da cota altimétrica da seção de controle e inclusa entre seus divisores topográficos (divisor de águas). A delimitação das áreas de recarga das nascentes (L2, L3, L4, M1, M2 e M4) foi determinada levando-se em consideração as linhas de cumeadas (linhas que unem pontos de cotas mais elevadas do terreno) a partir da seção de controle de cada nascente. A partir do MDE, foram geradas curvas de nível com equidistância de 5 m no software ArcGIS® version 9.2, de modo a facilitar a visualização das linhas de cumeadas e de forma manual, no software AutoCAD,

delimitou-se as áreas de recarga. Para verificar a qualidade da delimitação dos divisores de água das áreas de recarga, foi feito em campo a locação dos divisores de água com a utilização de um receptor GPS modelo 76CSx marca Garmin, onde percorreu-se todo o perímetro dos divisores de água de forma a caracterizar melhor estes e verificar se houve alguma inconsistência na sua delimitação. Onde ocorreram inconsistências na delimitação dos divisores de água foram marcados pontos nestes locais e posteriormente foram feitas as devidas correções de forma que as áreas de recargas das nascentes ficassem bem delimitadas.

3.4 Mapas de declividade

A declividade do terreno expressa a variação de altitude entre dois pontos do terreno, em relação à distância que os separa. O modelo digital de elevação (MDE) foi utilizado como fonte de entrada para a geração dos mapas de declividade, que é resultado da função modelagem topográfica onde são inseridos valores mínimos e máximos dentro de uma faixa de declividade. A partir das cotas altimétricas de cada pixel, a declividade será definida pela maior diferença de cotas entre dois pixels vizinhos, dividido pela dimensão linear de cada pixel.

O mapa de declividade foi fatiado em seis classes de declividades conforme sugestão da EMBRAPA (1979): 0-3% (relevo plano), 3-8% (relevo suavemente ondulado), 8-20% (relevo ondulado), 20-45% (relevo fortemente ondulado), 45-75% (relevo montanhoso), e, >75% (relevo fortemente montanhoso).

3.5 Monitoramento hidrológico das nascentes

As nascentes L1, L5, M3 e M5 constituem-se de um caso especial neste trabalho, sendo que nestas foram monitorados: vazão, precipitação e nível do

aquífero não confinado com o intuito de avaliar a recarga do aquífero não confinado nestas áreas. Essas variáveis hidrológicas foram monitoradas com frequência aproximadamente quinzenal, no período de fevereiro de 2008 a janeiro de 2009.

3.5.1 Monitoramento das vazões das nascentes

A vazão das nascentes vem sendo monitorada há alguns anos nestas sub-bacias, sendo que as nascentes já tinham sido escolhidas conforme estudos anteriores. Neste trabalho, estas foram monitoradas mensalmente de abril de 2008 a janeiro de 2009, para compor a base de dados desse trabalho, exceto as nascentes L1, L5, M3 e M5 as quais a frequência de monitoramento foi aproximadamente quinzenal e o período de monitoramento foi de fevereiro de 2008 a janeiro de 2009.

As vazões foram quantificadas utilizando-se de medidor de vazão sob regime crítico (calha) modelo WSC Flume (Figura 8), o qual deve ser instalado no solo em nível no plano horizontal, tanto longitudinalmente quanto transversalmente, onde após estabilização do nível d'água sobre a calha, é realizada a leitura deste, com o auxílio de uma régua e posteriormente convertido em vazão ($L \cdot s^{-1}$), através de uma equação específica para cada calha utilizada, exceto a nascente L3 onde a quantificação da vazão foi feita pelo método direto em três repetições empregando-se recipiente calibrado.



FIGURA 8 Medidor de vazão WSC Flume usado no monitoramento.

3.5.2 Monitoramento da precipitação

Nas duas sub-bacias estudadas, encontra-se instalada uma estação meteorológica compacta completa, da marca Campbell (Figura 9a), com fornecimento de energia por um painel solar, programada para obtenção de dados meteorológicos a cada 30 minutos. Devido a variabilidade espacial da precipitação, para que sua quantificação fosse mais representativa, nas nascentes L1, L5, M3 e M5, foi instalado um pluviômetro, conectado a um reservatório, onde a quantificação do total precipitado era feita com frequência aproximadamente quinzenal.



FIGURA 9 Equipamentos utilizados para monitorar a precipitação; a) estação meteorológica e b) pluviômetro.

3.5.3 Monitoramento do nível do aquífero não confinado

Nas nascentes L1, L5, M3 e M5 foram instalados poços de observação do aquífero não confinado próximo à seção controle, especializados de forma a subsidiar o entendimento do comportamento espacial e temporal do nível do aquífero não confinado nestas nascentes, nas áreas próximas ao afloramento da água subterrânea.

As perfurações dos poços foram feitas com um trado tipo holandês com aproximadamente 50 mm de diâmetro externo, no mês de outubro de 2007, até uma profundidade média de três metros, sendo o poço revestido por um tubo de PVC de 50 mm de diâmetro. O tubo de PVC foi perfurado várias vezes sendo

que a parte superior do tubo encontra-se em torno de 15 cm acima da superfície do solo e possui uma tampa para evitar entrada de materiais estranhos que possam vir a contaminar o lençol freático e entupir os poços.

As leituras dos níveis do lençol freático foram feitas pelo processo de medição direta com uma trena metálica graduada em milímetros acoplada em sua extremidade uma de isopor de 35 mm. Do lado de cada poço, foi instalado um piquete para servir com referência de nível (RN), conforme Figura 10, sendo este georreferenciado no levantamento topográfico.



FIGURA 10 a) Poços de observação do aquífero não confinado e b) leitura do nível do aquífero não confinado.

3.6 Curvas características de retenção de água no solo

Foram determinadas nas nascentes L1, L5, M3 e M5 em quatro pontos nas profundidades de 20, 50 e 100 cm as curvas características de retenção de água no solo (Figura 11) de acordo com o modelo de Mualem-Van Genuchten (Genuchten, 1980). Foram coletados em cada ponto e a cada profundidade amostras de solo indeformadas para determinação das respectivas curvas características, no Laboratório de Relação Água-Solo-Planta (DEG/UFLA).

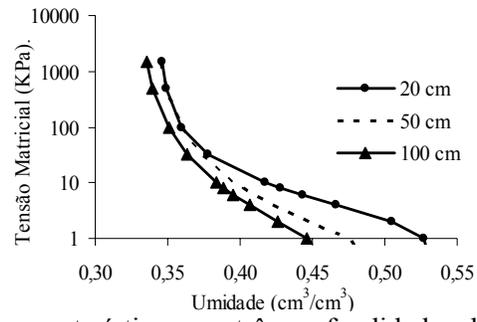


FIGURA 11 Curva característica para três profundidades do solo dominante na área de recarga da nascente M3.

4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R. G.; PERREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration**: guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998. 300 p. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 56).

ALVARENGA, A. P. **Avaliação inicial da recuperação de mata ciliar em nascentes**. 2004. 175 p. Dissertação (Mestrado em Manejo Ambiental) - Universidade Federal de Lavras, Lavras.

BALEK, J. Groundwater recharge concepts. In: SIMMERS, C. (Ed.). **Estimation of natural groundwater recharge**. Dordrecht: Reidel, 1998. p. 3-9.

BARRETO, C. E. A. G. **Balço hídrico em zona de afloramento do sistema aquífero guarani a partir de monitoramento hidrogeológico em bacia representativa**. 2006. 249 p. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Carlos, São Carlos.

BERRY, B. J. L.; BAKER, A. M. Geographic sampling. In: BERRY, B. J. L.; MARBLE, D. F. (Ed.). **Spatial analysis**. New York: Prentice Hall, 1968. p. 91-100.

BERTOL, G. A. **Avaliação da recarga anual no aquífero Bauru no município de Araguari, Minas Gerais**. 2007. 101 p. Dissertação (Mestrado em Geologia Econômica e Aplicada) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

BRASIL. **Lei n. 4.771**, de 15 de setembro de 1965. Institui o novo Código Florestal. Brasília, 1965. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L4771.htm>. Acesso em: 27 out. 2008.

BRASIL. **Lei n. 7.803**, de 15 de setembro de 1965. Altera a redação da Lei n. 4.771, de 15 de setembro de 1965, e revoga as Leis n. 6.535, de 15 de junho de 1978, e 7.511, de 7 de julho de 1986. Brasília, 1989. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L7803.htm>. Acesso em: 27 out. 2008.

BRASIL. **Medida provisória n. 2166-67**, de 24 de agosto de 2001. Altera os arts. 1º, 4º, 14, 16 e 44, e acresce dispositivos à Lei n. 4.771, de 15 de setembro de 1965, que institui o Código Florestal, bem como altera o art. 10 da Lei no 9.393, de 19 de dezembro de 1996, que dispõe sobre o Imposto sobre a Propriedade Territorial Rural - ITR, e dá outras providências. Brasília, 2001. Disponível em: <<http://www.receita.fazenda.gov.br/legislacao/MPs/mp2166-67.htm>>. Acesso em: 27 out. 2008.

CABRAL, J.; KOIDE, S.; SIMÕES, S. J. C.; MONTENEGRO, S. Recursos hídricos subterrâneos. In: PAIVA, J. B. de; PAIVA, E. M. C. D. de. **Hidrologia aplicada a pequenas bacias hidrográficas**. Porto Alegre: ABRH, 2003. cap. 9, p. 237-277.

CALHEIROS, R. de O. **Preservação e recuperação das nascentes**. Piracicaba: Comitê das Bacias Hidrográficas dos Rios PCJ-CTRN, 2004. 40 p.

CÂMARA, G.; MEDEIROS, J. S. **Geoprocessamento para projetos ambientais**. São José dos Campos: INPE, 1996. 45 p.

CASTANY, G. **Traité pratique des eaux souterraines**. 2. ed. Paris: Dunod, 1967. 661 p.

CASTRO, P. S. **Recuperação e conservação de nascentes**. Viçosa, MG: CPT, 2001. 84 p. (Série Saneamento e Meio Ambiente, 26).

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. **Applied hydrology**. New York: McGraw-Hill, 1988. 572 p.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução n. 303, de 20 de março de 2002. Dispõe sobre parâmetros, definições e limites de Áreas de Preservação Permanente. **Diário Oficial [da] União**, Brasília, n. 90, p. 68, 13 maio 2002. Seção 1.

CUTRIM, A. O.; REBOUÇAS, A. C. Estimativa das reservas de água do aquífero Furnas na cidade de Rondonópolis-MT. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO SUL, 1.; SIMPÓSIO DE ÁGUAS DA AUGM, 1., 2004, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: UFSM, 2004. 1 CD-ROM.

DAVIDE, A. C.; PINTO, L. V. A.; MONNERAT, P. F.; BOTELHO, S. A. **Nascente**: o verdadeiro tesouro da propriedade rural: o que fazer para conservar as nascentes nas propriedades rurais. Lavras: UFLA/CEMIG, 2002. 20 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. **Súmula da X reunião técnica de levantamento de solos**. Rio de Janeiro, 1979. 83 p. (EMBRAPA-SNLCS. Micelânea, 1).

FAZAL, M. A.; IMAIZUMI, M.; ISHIDA, S.; TAWACHI, T.; TSUCHIHARA, T. Estimating groundwater recharge using the SMAR conceptual model calibrated by genetic algorithm. **Journal of Hydrology**, London, v. 303, n. 1/4, p. 56-78, Mar. 2005.

FELGUEIRAS, C. A. **Desenvolvimento de um sistema de modelagem digital de terreno para microcomputadores**. 1987. 243 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

FERNANDES, M. R.; SILVA, J. C. **Programa estadual de manejo de sub-bacias hidrográficas: fundamentos e estratégias**. Belo Horizonte: EMATER-MG, 1994. 24 p.

FERREIRA, C. C. M. **Zoneamento agroclimático para implantação de sistemas agroflorestais com eucaliptos, em Minas Gerais**. Viçosa, MG: UVF, 1997. 158 p.

FORMAGGIO, L. F. **Estudo da variabilidade da piezometria dos aquíferos freáticos na bacia do alto Rio Jardim, Distrito Federal**. 2007. 112 p. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade de Brasília, Brasília.

FREEZE, R. A.; CHERRY, J. A. **Groundwater**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1979. 604 p.

GENUCHTEN, M. T. van. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, n. 1, p. 892-898, May 1980.

GOLDENFUM, J. A.; ACIOLI, L. A.; AGRA, S. G.; SILVEIRA, A. L. L. Implantação de um módulo experimental para análise da eficiência de pavimentos permeáveis no controle do escoamento superficial na fonte. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 1., 2003, Curitiba. **Anais...** Porto Alegre: ABRH, 2003. v. 1, p. 1-18.

GOMES, N. M. **Variabilidade espacial de atributos físico-hídricos do solo da sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela na Região do Alto Rio Grande, MG.** 2005. 124 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Universidade Federal de Lavras, Lavras.

HAMLETT, J. M.; MILLER, R. L.; PETERSON, G. W.; BAUMER, G. M.; RUSSO, J. Statewide GIS-based ranking of watershed for agricultural pollution prevention. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v. 47, n. 5, p. 399-404, Nov. 1992.

HEALY, R. W.; COOK, P. G. Using groundwater levels to estimate recharge. **Hydrogeology Journal**, London, v. 10, n. 1, p. 91-109, Feb. 2002.

INSTITUTO NACIONAL DE COLONIZAÇÃO E REFORMA AGRÁRIA. **Norma técnica para georreferenciamento de imóveis rurais.** Brasília: Ministério do Desenvolvimento Agrário, 2003. 42 p.

JOHNSON, E. E. Água subterrânea e poços tubulares. In: _____. **Origem, ocorrência e movimento da água subterrânea.** Curitiba: UFPR, 1969. cap. 2, p. 11-36.

JUNQUEIRA JÚNIOR, J. A. **Escoamento de nascentes associado à variabilidade espacial de atributos físicos e uso do solo em uma bacia hidrográfica de cabeceira do Rio Grande, MG.** 2006. 84 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Lavras, Lavras.

LERNER, D. N.; ISSAR, A. S.; SIMMERS, I. **Groundwater recharge: a guide to understanding and estimating natural recharge.** Verla Heinz Heise: International Association of Hydrogeologist, 1990. 342 p.

LIBARDI, P. L. Infiltração da água no solo. In: _____. **Dinâmica da água no solo.** São Paulo: EDUSP, 2005. cap. 13, p. 209-230.

LIMA, W. P. de. Ciclo hidrológico e balanço hídrico. In: _____. **Introdução ao manejo de bacias hidrográficas.** Piracicaba: ESALQ, 2006. cap. 3, p. 32-49.

MACHADO, R. E. **Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento.** 2002. 154 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba.

MARTINS, S. V.; DIAS, H. C. T. Importância das florestas para a quantidade e qualidade da água. **Ação Ambiental**, Viçosa, MG, v. 4, n. 20, p. 14-16, out./nov. 2001.

MAZIERO, T. A. **Monitoramento de água subterrânea em área urbana: aspectos quantitativos**. 2005. 85 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Carlos, São Carlos.

MAZIERO, T. A.; WENDLAND, E. Avaliação da recarga subterrânea de bacias urbanas no município de São Carlos, SP. In: SIMPÓSIO DE HIDROGEOLOGIA DO SUDESTE, 2.; ENCONTRO NACIONAL DE PERFURADORES DE POÇOS, 14., 2005, Ribeirão Preto. **Anais...** Ribeirão Preto: USP, 2005. 1 CD-ROM.

MENDES, C. A. B. **Planejamento nacional de recursos hídricos baseado no uso de técnicas de geoprocessamento**. Porto Alegre: UFRGS, 1997. 9 p.

MENDONÇA, A. S. Balanço hídrico. In: PAIVA, J. B. de; PAIVA, E. M. C. D. de. **Hidrologia aplicada a pequenas bacias hidrográficas**. Porto Alegre: ABRH, 2003. cap. 6, p. 165-168.

MENEZES, M. D. de. **Levantamentos de solos em sub-bacias hidrográficas como apoio para avaliação do uso da terra e da potencialidade de recarga dos aquíferos**. 2007. 107 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras.

MELLO, C. R. de. **Estudo hidrológico em microbacia hidrográfica com regime de escoamento efêmero**. 2003. 133 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras.

MELLO, C. R. de; SILVA, A. M. da. **Hidrologia de superfície: escoamento superficial**. Lavras: UFLA, 2008. 48 p. Apostila.

MOLDAN, B.; CERNY, J. Small catchments research. In: MOLDAN, B.; CERNY, J. **Biogeochemistry of small catchments: a tool for environmental research**. Chicester: J. Wisley, 1994. p. 1-29.

MOON, S.; WOO, N. C.; LEE, K. S. Statistical analysis of hydrographs and water-table fluctuation to estimate groundwater recharge. **Journal of Hydrology**, London, v. 292, n. 1/4, p. 198-209, June 2004.

OLERIANO, E. dos S.; DIAS, H. C. T. A dinâmica da água em microbacias hidrográficas reflorestadas com eucalipto. In: SEMINÁRIO DE RECURSOS HÍDRICOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO PARAÍBA DO SUL: O EUCALIPTO E O CICLO HIDROLÓGICO, 1., 2007, Taubaté. **Anais...** Taubaté: IPABHi, 2009. p. 215-222.

PAIVA, G. P. **Estimativa da recarga em uma unidade dentrítica de uma micro-bacia do Rio Piranga (MG)**. 2006. 129 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

PARALTA, E. A.; OLIVEIRA, M. M.; LUBCZYNSKI, M. W.; RIBEIRO, L. F. Avaliação da recarga do sistema aquífero dos Gabros de Beja segundo critérios múltiplos: disponibilidades hídricas e implicações agro-ambientais. In: SIMPÓSIO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS DOS PAÍSES DE LÍNGUA OFICIAL PORTUGUESA, 6., 2003, Cabo Verde. **Anais...** Cabo Verde: APRH/INGRH/ABRH/AMCT, 2003. p. 501-516.

PEREIRA, A. R.; VILLA-NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G. C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183 p.

PINTO, L. V. A. **Caracterização física da bacia hidrográfica do Ribeirão Santa Cruz, Lavras, MG, e propostas de recuperação de suas nascentes**. 2003. 171 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras.

PINTO, L. V. A.; BOTELHO, S. A.; DAVIDE, C. A.; FERREIRA, E. Estudo das nascentes da bacia hidrográfica do ribeirão Santa Cruz, Lavras, MG. **Scientia Florestalis**, Piracicaba, v. 65, n. 1, p. 197-206, jun. 2004.

PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D.; TEIXEIRA, A. F.; SILVA, J. M. A.; CECÍLIO, R. A.; SILVA, D. F. Plúvio 1.3: chuvas intensas para o Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 31., 2002, Salvador. **Anais...** Salvador: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 2002. 1 CD-ROM.

RESENDE, M.; CURTI, N.; RESENDE, S. B. de; CORREA, G. F. **Pedologia**: base para distinção de ambientes. 5. ed. rev. Lavras: UFLA, 2007. 322 p.

RIBEIRO, C. A. A. S. **Tópicos avançados em sistemas de informações geográficas**. Viçosa, MG: UFV, 2003. 22 p.

RIGHETTO, A. M. **Hidrologia e recursos hídricos**. São Carlos: EESC/USP, 1998. 840 p.

SALATI, E.; LEMOS, H. M. de; SALATI, E. Água e o desenvolvimento sustentável. In: REBOUÇAS, A. C.; BRAGA, B.; TUNDISI, J. G. **Águas doces no Brasil**. São Paulo: USP, 1999. p. 7-17.

SANTOS, A. R. dos. **ArcGIS 9.1 total**: aplicações para dados espaciais. Vitória: FUNDAGRES, 2007. 226 p.

SANTOS, A. R. dos. **Caracterização morfológica, hidrológica e ambiental da bacia hidrográfica do Rio Turvo Sujo, micro-região de Viçosa, MG**. 2001. 125 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

SCANLON, B. R.; HEALY, R. W.; COOK, P. G. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. **Hydrogeology Journal**, London, v. 10, n. 1, p. 18-39, Feb. 2002.

SCHICHT, R. J.; WALTON, W. C. Hidrologic budgets three small watersheds in Illinois. **Journal of Hydrology**, London, v. 176, n. 1/4, p. 57-77, Mar. 1996.

SILVA, A. M. **Princípios básicos de hidrologia**. Lavras: UFLA, 1995. 104 p.

SILVA, A. M.; MELLO, C. R. de; CORREA, M. R.; CURI, N. **Estudos hidrológicos sobre o regime de escoamento de bacias de drenagem para o reservatório da UHE de Camargos/CEMIG**. Belo Horizonte: CEMIG/ANEEL, 2005. 90 p.

SILVEIRA, A. L. da. Ciclo hidrológico e bacia hidrográfica. In: TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4. ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2007. cap. 2, p. 35-51.

SOUZA, E. R. de; FERNANDES, M. R. Sub-bacias hidrográficas: unidades básicas para o planejamento e a gestão sustentáveis das atividades rurais. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 21, n. 207, p. 15-20, nov./dez. 2000.

TOOD, D. K. Introdução. In: _____. **Hidrologia de águas subterrâneas**. São Paulo: E. Blücher, 1959. cap. 1, p. 1-13.

TUCCI, C. E. M.; BELTRAME, L. F. S. Evaporação e evapotranspiração. In: TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4. ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2007. cap. 2, p. 253-287.

VALENTE, O. F.; CASTRO, P. S. A bacia hidrográfica e a produção de água. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 9, n. 100, p. 54-56, 1983.

VALENTE, O. F.; DIAS, H. C. T. A bacia hidrográfica como unidade básica de produção de água. **Ação Ambiental**, Viçosa, MG, v. 4, n. 20, p. 8-9, out./nov. 2001.

VALENTE, O. F.; GOMES, M. A. As nascentes e os rios. **Ação Ambiental**, Viçosa, MG, v. 4, n. 24, p. 11-13, mar./abr. 2003.

VASCONCELOS, S. M. S. Avaliação da recarga subterrânea através da variação do nível potenciométrico no Aquífero Dunas/Paleodunas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Fortaleza, v. 10, n. 1, p. 49-56, jan./mar. 2005.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1975. 245 p.

VIOLA, M. R.; MELLO, C. R. de; COELHO, G.; DURÃES, M. F.; ÁVILA, L. F. Caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do Rio Grande utilizando sistemas de informações geográficas. In: CONGRESSO DE PÓS-GRADUAÇÃO DA UFLA, 16., 2007, Lavras. **Anais...** Lavras: APG/UFLA, 2007. 1 CD-ROM.

VRIES, J. J. de; SIMMERS, I. Groundwater recharge: an overview of processes and challenges. **Hydrogeology Journal**, London, v. 10, n. 1, p. 5-17, Feb. 2002.

XU, Y.; BEEKMAN, H. E. (Ed.). **Groundwater recharge estimation in Southern Africa**. Paris: UNESCO, 2003. 206 p. (UNESCO IHP Series, 64).

WAHNFRIED, I.; HIRATA, R. Comparação dos métodos de estimativa de recarga de aquíferos em uma planície aluvionar na bacia hidrográfica do Alto Tietê (São Paulo). **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 10, n. 1, p. 15-25, jan./mar. 2005.

WENDLAND, E.; BARRETO, C.; GOMES, L. H. Water balance in the Guarani aquifer outcrop zone based on hydrogeologic monitoring. **Journal of Hydrology**, London, v. 342, n. 3/4, p. 213-346, Sept. 2007.

WINTER, T. C.; ROSENBERRY, D. O.; LABAUGH, J. W. Where does the groundwater in small watersheds come from? **Ground Water**, Dublin, v. 41, n. 7, p. 989-1000, Mar. 2003.

ZAKIA, M. J. B. **O balanço hídrico, levando-se em conta o sistema solo-planta-atmosfera, de quatro tipos de coberturas vegetais na região de Grão Mogol, MG.** 1987. 136 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba.

CAPÍTULO 2

Caracterização hidrológica de nascentes em dois ambientes distintos na região do Alto Rio Grande – MG

RESUMO

As nascentes cada vez mais vêm sendo alvo de estudos, devido a sua enorme importância no contexto hidrológico, havendo grande interesse em preservar a quantidade e qualidade de suas águas. Estas são provenientes do afloramento de aquíferos subterrâneos, sendo fontes primárias de água doce e responsável pela manutenção das vazões dos cursos d'água. Estudos das características hidrológicas das nascentes associados à dinâmica local têm se mostrado um instrumento importante na caracterização deste recurso hídrico. Visando caracterizar as áreas de recarga das nascentes e compreender o comportamento sazonal de suas vazões, foram feitas a caracterização morfométrica das áreas de recarga, a modelagem hidrológica das vazões e mapas de uso e ocupação do solo, em dez nascentes das sub-bacias hidrográficas dos Ribeirões Lavrinha e Marcela, sendo cinco em cada sub-bacia. As vazões foram mensuradas ao longo do tempo pelos métodos direto e medidor WSC flume e modeladas através da Fórmula de Maillet. Verificou-se grande variabilidade espacial e temporal das vazões das nascentes ao longo do ano de 2008, as duas sub-bacias hidrográficas monitoradas apresentaram grande diferença em termos de produção de água em suas nascentes, podendo estas diferenças ser atribuídas ao regime pluviométrico de cada localidade e verificou-se que existem relações importantes entre as condições de uso e ocupação do solo, características topográficas, características de forma e manejo do solo com a capacidade de manutenção do fluxo de água ao longo do ano (α), rendimento específico médio mensal e o deflúvio anual das nascentes.

ABSTRACT

Hydrologic characterization of springs at two environments at Alto Rio Grande Region – MG

Water springs are being studied more intensively due to its importance at hydrology, as water quality and quantity must be maintained. Water springs come from groundwater, being the primary source of water and responsible to maintain the flow at rivers. Hydrology characterization of springs associated with the local dynamics has shown itself as an important tool for water resources studies. In order to characterize the recharge areas and better understand the seasonal behavior of flow rates, morfometric characterization of recharge areas were performed as well as hidrological modeling of flow rates and soil use maps, at 10 springs located at Lavrinha and Marcela creeks' watersheds. Flow rates were measured through direct method and also using the WSC flume, lately modeled through Maillet equation. High spatial and temporal variability on flow rate values were observed during 2008. Both watersheds monitored revealed large difference on water production by their springs, being this difference attributed to rain differences at each location together with important relations from soil conditions, soil use, landscape, form and soil management, that affect the water flow along the year (α), monthly specific yield and annual flow regime.

1 INTRODUÇÃO

A intervenção humana de maneira exploratória e inconsequente, altera a dinâmica da água dentro do espaço territorial das bacias hidrográficas, causando impactos ambientais nos cursos d'água que drenam suas terras. O estudo das águas, em nível qualitativo e quantitativo, serve de indicativo do grau de degradação e/ou conservação dos solos drenados a montante.

A quantificação da disponibilidade hídrica serve de base para projetos e planejamento no uso dos recursos hídricos. Para tanto, é preciso expressar quantitativamente todas as características de forma, de processos e de suas inter-relações.

As características físicas de uma bacia constituem elementos de grande importância para avaliação de seu comportamento hidrológico. De acordo com Alves & Castro (2003) e Lima (2006), para entender o funcionamento de uma bacia hidrográfica, torna-se necessário expressar quantitativamente as manifestações de forma (a área da bacia, sua forma geométrica, etc.), de processos (escoamento superficial, deflúvio, etc.) e suas inter-relações. Assim Tonello et al. (2006), ressaltam que é importante reconhecer que nenhum desses parâmetros deve ser entendido como capaz de simplificar a complexa dinâmica da bacia hidrográfica, a qual inclusive tem magnitude temporal. Desse modo, características fisiográficas de uma microbacia possuem importante papel nos processos do ciclo hidrológico, influenciando, dentre outros, a infiltração, a quantidade de água produzida como deflúvio, a evapotranspiração e os escoamentos superficial e sub-superficial.

Segundo Tonello et al. (2006) a área da bacia hidrográfica tem influência sobre a quantidade de água produzida como deflúvio, no entanto, sua forma, relevo e cobertura vegetal, atuam sobre a taxa ou sobre o regime dessa produção de água, assim como a taxa de sedimentação.

Através do estudo das características fisiográficas das bacias associados as suas disponibilidades hídricas, pode-se entender fenômenos passados, avaliar impactos e ações antrópicas na fase de escoamento superficial da água e elaborar correlações entre vazões e características fisiográficas. Esses parâmetros podem revelar indicadores físicos específicos para determinado local, de forma a qualificarem as alterações ambientais (Alves & Castro, 2003).

Em nascentes, é desejável que suas vazões tenham boa distribuição no tempo, ou seja, que a variação de vazão situe dentro de um mínimo adequado ao longo do ano. Isto quer dizer que a bacia não deve funcionar como um recipiente impermeável, com escoamento em curto espaço de tempo de toda a água recebida durante uma precipitação. A água deve ser absorvida em parte, por infiltração no solo, armazenada no aquífero subterrâneo e drenada gradativamente, para os cursos d'água, mantendo a vazão, inclusive, durante os períodos de seca, o que é fundamental tanto para o uso econômico como para a manutenção do regime hídrico do curso d'água principal.

Diante do exposto, o objetivo deste estudo compreendeu a obtenção e análise de características morfométricas, uso e ocupação do solo e disponibilidade hídrica em áreas de recarga de 10 nascentes, sendo 5 nascentes na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha, e 5, na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, com o intuito de entender o comportamento hidrológico nestes locais.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Caracterização das nascentes e morfometria das áreas de recarga

As nascentes foram caracterizadas conforme as proposições citadas em Castro & Lopes (2001), David et al. (2002) e Valente & Gomes (2003) e também quanto ao atendimento à legislação ambiental vigente no país.

Para cada nascente foi confeccionado um mapa de uso e ocupação do solo com base em um levantamento topográfico expedito feito com um receptor GPS modelo 76CSx Marca Garmin, exceto nas nascentes L1, L5, M3 e M5 onde o mapa foi feito a partir de um levantamento topográfico.

Os parâmetros morfométricos usados na caracterização das áreas de recarga das nascentes (microbacias hidrográficas) encontram-se descritos na Tabela 1.

TABELA 1 Características primárias e índices calculados para as áreas de recarga das nascentes.

Características morfométricas	
Área (A)	Fator de forma (K_f)
Perímetro (P)	Índice de conformação (I_c)
Coeficiente de compacidade (K_c)	
Características do relevo	
Altitude máxima	Declividade máxima
Altitude média (E)	Declividade média ($I_{\%}$)
Altitude mediana	Declividade mediana
Altitude mínima	Declividade mínima
Curva hipsométrica	Curva de distribuição de declividade

Todas as equações de caracterização morfométrica utilizadas encontram-se descritas em Christofolletti (1969), Villela & Mattos (1975), Porto et al. (1999), Santos (2001) e Politano & Pissarra (2003). A etapa de caracterização morfométrica das áreas de recarga das nascentes foi feita com base no MDE com a utilização do software ArcGIS® version 9.2. Neste trabalho o termo microbacia hidrográfica é correspondente a áreas de recargas de nascentes delimitadas pelo relevo superficial, sendo esta integradora de todos os processos envolvidos no objetivo da análise proposta.

2.1.1 Características morfométricas

A área (A) constitui a medida de uma superfície projetada em plano horizontal delimitada a partir da seção controle seguindo uma linha referente aos pontos de cotas mais elevadas do terreno (divisor de águas), sendo fundamental para definir a potencialidade hídrica da microbacia hidrográfica. A área de recarga de uma nascente em termos hidrológicos representa a menor área da paisagem capaz de englobar todos os processos envolvidos no ciclo hidrológico. É o elemento básico para o cálculo de diversos índices morfométricos.

O perímetro da bacia (P) constitui o comprimento de uma linha imaginária ao longo do divisor de águas.

A forma de uma microbacia é uma das características físicas mais difíceis de ser expressa em termos quantitativos, sendo determinada por índices que a relacionam com formas geométricas conhecidas.

O coeficiente de compacidade (K_c) relaciona o perímetro da microbacia com o perímetro de um círculo de área igual a da microbacia. Este coeficiente é um número adimensional que varia com a forma da microbacia, independente de seu tamanho. Quanto mais irregular for a microbacia, maior será o coeficiente de compacidade. Como o círculo é a figura geométrica que comporta uma dada área com menor perímetro, este coeficiente nunca será menor que 1. Assim por meio de manipulação matemática, pode-se chegar à seguinte equação:

$$K_c = 0,28 \cdot \frac{P_{BH}}{\sqrt{A_{BH}}} \quad (01)$$

em que A_c é a área do círculo igual a da microbacia (A_{BH}); P_c é o perímetro do círculo; P_{BH} é o perímetro da microbacia e D é o diâmetro do círculo de área igual da microbacia.

O fator de forma (K_f) também conhecido como índice de Gravelius é expresso como sendo a razão entre a largura média da microbacia e seu comprimento axial. Este coeficiente também é um número adimensional. O

comprimento axial é medido a partir da seção controle da microbacia estendendo-se no sentido de seu maior comprimento. A largura média é obtida pela média das larguras da microbacia perpendiculares ao seu comprimento axial, tendo o perímetro da microbacia como seu extremo. O fator de forma (K_f) é determinado pela Equação 02:

$$K_f = \frac{\bar{L}}{L_{ax}} \quad (02)$$

em que \bar{L} é a largura média e L_{ax} é o comprimento axial da microbacia.

O índice de conformação (I_c) relaciona a área da microbacia com a área de um quadrado de lado igual ao comprimento axial da microbacia. Este também é adimensional e pode assumir valores maiores ou menores que 1. Se a microbacia possuir a forma de um retângulo, por exemplo, e o comprimento axial for correspondente ao menor lado deste retângulo, o índice poderá ser menor que 1. O índice de conformação (I_c) é expresso por:

$$I_c = \frac{A_{BH}}{L_{ax}^2} \quad (03)$$

em que A_{BH} é a área da microbacia e L_{ax} é o comprimento axial da microbacia.

2.1.2 Características do relevo

As altitudes máxima, média, mediana e mínima das microbacias foram extraídas do MDE, sendo a altitude mínima correspondendo à seção controle e a altitude máxima correspondendo ao ponto de maior cota do divisor de águas.

A altitude média (E) foi obtida através da relação entre o somatório do produto da altitude média entre duas curvas de nível consecutivas e da área entre essas curvas, dividido pela área da microbacia, expresso pela Equação 04:

$$E = \frac{\sum_{i=1}^n (e_i \cdot a_i)}{A_{BH}} \quad (04)$$

em que E é a altitude média; e_i é a altitude média entre duas curvas de nível consecutivas; a_i é a área entre as curvas de nível e A_{BH} é a área da microbacia.

A curva hipsométrica constitui a representação gráfica do relevo médio de uma bacia hidrográfica mostrando a variação da altitude com a subárea da bacia de cotas iguais ou superiores àquela em questão. Esta curva é obtida acumulando-se as áreas que estão acima ou abaixo de determinada altitude. Para a determinação das curvas hipsométricas das microbacias, foram utilizados os mapas de classes de relevo (classes de relevo de 5 em 5 metros, exceto as nascentes L1, L5, M3 e M5 onde as classes de relevo foram de 1 em 1 metro) e o número de ocorrência de cada uma destas classes. Baseado nos resultados obtidos foi possível gerar as curvas hipsométricas das microbacias, visualizando nestas as altitudes mínima, média, mediana e máxima das microbacias.

As curvas de distribuição de declividade do terreno foram determinadas por meio do mapa de classes de declividade, construído a partir do MDE, com classes variando de 1 em 1% e do número de ocorrência de cada classe de declividade. Essas curvas representam a variação da declividade do terreno com a subárea da bacia hidrográfica de declividade igual ou superior àquela em questão. Com os resultados, foi possível gerar a curva de distribuição de declividade visualizando nestas as declividades mínima, média, mediana, e máxima das microbacia.

A declividade média ($I_{\%}$) foi obtida por meio da relação entre o somatório do produto da declividade média entre duas classes de declividade consecutivas e da área entre essas classes, dividido pela área da microbacia, expresso pela equação abaixo:

$$I_{\%} = \frac{\sum_{i=1}^n (d_i \cdot a_i)}{A_{BH}} \quad (05)$$

em que $I_{\%}$ é a declividade média; d_i é a declividade média entre duas classes de declividade consecutivas; a_i é a área entre essas classes e A_{BH} é a área da microbacia.

2.2 Modelagem das vazões das nascentes

O monitoramento das vazões das nascentes é essencial para que se possa entender o comportamento de sua produção de água no período de tempo observado. A partir dos dados monitorados ajustou-se um modelo exponencial conforme “Fórmula de Maillet” (Castany, 1967) para representar o comportamento temporal da vazão das nascentes, sendo o ajuste feito conforme o método de Newton Raphson, utilizando-se de forma complementar, o coeficiente de determinação (R^2) para verificar a qualidade do ajuste.

Desta forma com os valores de vazões observados ($L \cdot s^{-1}$) foram gerados gráficos das vazões em função do tempo (sendo o tempo contado a partir do primeiro dia de monitoramento da vazão, ou seja, t_0 correspondendo a Q_{t_0}) e posteriormente ajustado o modelo exponencial (Fórmula de Maillet) considerando para ajuste apenas o período de depleção da vazão das nascentes, conforme Equação 06:

$$Q_t = Q_{t_0} \cdot \exp^{-\alpha \cdot t} \quad (06)$$

em que Q_t é a vazão da nascentes num instante t ($L \cdot s^{-1}$); Q_{t_0} é a vazão da nascente no primeiro dia do monitoramento ($L \cdot s^{-1}$); α é o coeficiente de recessão, representa a taxa de decaimento da vazão com o tempo (dia^{-1}) e t é o intervalo de tempo decorrido entre t_0 e t (dias). Esta equação só deve ser aplicada em condições de depleção continuada do aquífero, pois, a ocorrência de recarga quebra a continuidade do processo de depleção, tornando incorreto o emprego da mesma.

O coeficiente de recessão (α) corresponde à inclinação da curva de recessão em gráfico semilogaritmico (Bertol, 2007). Segundo Rosa Filho (1993)

o coeficiente de recessão é uma constante que representa as propriedades que afetam a descarga de um aquífero. Considerando que os demais parâmetros são constantes quanto maior for a extensão horizontal do aquífero, a porosidade do meio e a viscosidade do fluido, maior será o tempo necessário para que ocorra o esgotamento do mesmo; nesses casos α decresce com o aumento desses parâmetros. Quanto maior for a densidade do fluido e a permeabilidade específica do aquífero, menor será o tempo necessário para que ocorra o esgotamento do aquífero e maior serão os valores de α .

Integrando-se a Equação 06 obtém-se o deflúvio em volume, no período de análise, conforme Equação 07.

$$VE = 86400 \cdot \frac{1}{\alpha} \cdot Q_{t_0} \cdot (1 - \exp^{-\alpha \cdot t}) \quad (07)$$

em que, VE é o deflúvio superficial (volume escoado – [L]); α é o coeficiente de recessão [dia⁻¹]; Q_{t_0} é a vazão da nascente no primeiro dia do monitoramento [L·s⁻¹] e t é o intervalo de tempo decorrido entre t_0 e t [dia]. Quando o valor do produto αt resulta em valores elevados VE tende ao valor de Q_{t_0}/α .

O deflúvio quantificado no período de depleção do aquífero (período de seca) representa o volume de água subterrânea que foi drenado, implicando, na necessidade de sua reposição no período subsequente, que é o período de recarga (período de chuva). Uma forma de caracterizar o comportamento das nascentes visando a promover comparações entre elas, em termos de capacidade de produção de água é por intermédio de seu rendimento específico, vazão por unidade de área (L³T⁻¹L⁻²).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Situação atual das nascentes

O regime de escoamento de todas as nascentes estudadas neste trabalho foi caracterizado como perene, segundo a classificação proposta por Castro &

Lopes (2001). Conforme a classificação citada em Davide et al. (2002), as nascentes L1, L2, L3 e L4 são classificadas como pontuais, sendo as demais classificadas como difusas. Pela classificação de Valente & Gomes (2003) as nascentes estudadas são todas nascentes freáticas, pois apresentam grande variabilidade temporal das vazões ao longo do ano (Junqueira Júnior, 2006).

Quanto ao atendimento à legislação, em todas as nascentes monitoradas, existe alguma forma de intervenção que altera as características físicas das APP's, não atendendo, portanto, a legislação vigente no país. Durante as etapas de campo, pode-se perceber que as principais e mais frequentes formas de intervenção constituem-se na utilização destas áreas para pastagem e dessedentação do gado (sendo caracterizado pela presença do pisoteio e estrume) e a substituição da cobertura do solo por pastagem sem práticas de conservação de solo. Acresça-se ainda que as áreas de recarga das nascentes sejam manejadas por seus proprietários com práticas frequentes de capina e até mesmo queimadas nas vertentes acima do local de afloramento d'água.

3.1.1 Mapas de uso e ocupação do solo das áreas de recarga

As Figuras de 11 a 20 apresentam os mapas de uso e ocupação do solo das áreas de recarga das nascentes monitoradas e sua distribuição percentual.

A área de recarga da nascente L1 (Figura 12) é ocupada por pastagem em 92,9% da área total e os demais percentuais são 6,9% correspondendo à samambaia silvestre e 0,2% correspondendo à mata. No entorno do ponto de afloramento d'água encontram-se pequenos arbustos e foi construído pelo proprietário uma cerca de arame num raio médio de 5 metros. Por ser o único ponto de acesso à água no local, este nascente é explorada pelo gado para dessedentação.

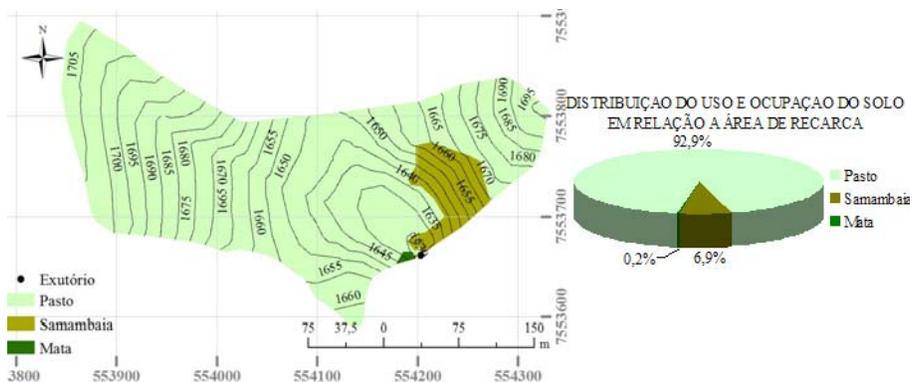


FIGURA 12 Mapa de uso e ocupação do solo da área de recarga da nascente L1.

A área de recarga da nascente L2 (Figura 13) constitui-se em 67,1% de mata nativa e 32,9% de pasto. Devido ao ponto de afloramento encontrar-se em uma região de relevo íngreme e numa área de mata fechada, esta não é explorada de forma direta, porém a vegetação de mata nativa na vertente acima do ponto de afloramento vem sofrendo freqüentemente o processo de roçagem dando espaço à pastagem.

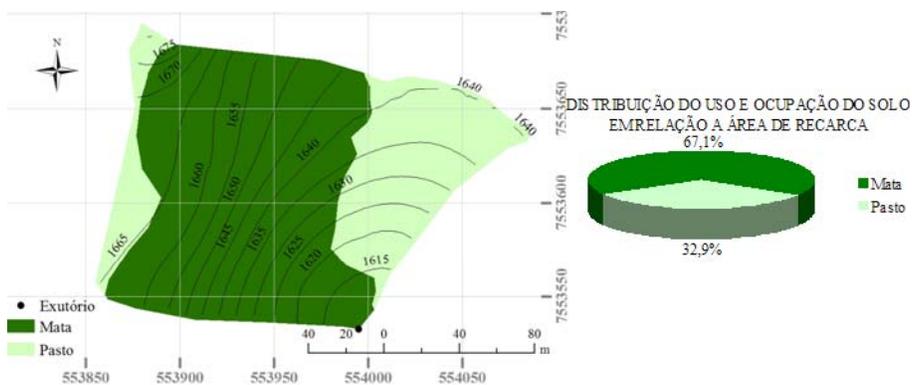


FIGURA 13 Mapa de uso e ocupação do solo da área de recarga da nascente L2.

O uso e ocupação atual do solo da área de recarga da nascente L3 (Figura 14) apresentam-se basicamente por pastagem, correspondendo a 99% da área total. Num raio aproximado de 5 metros no entorno da nascente, correspondendo a 1% da sua área de recarga, tem-se poucos e pequenos arbustos e o tributário é desviado de seu curso original. Além disso, esta área de recarga

apresenta indícios de queimadas regulares e o manejo da samambaia silvestre é constante.

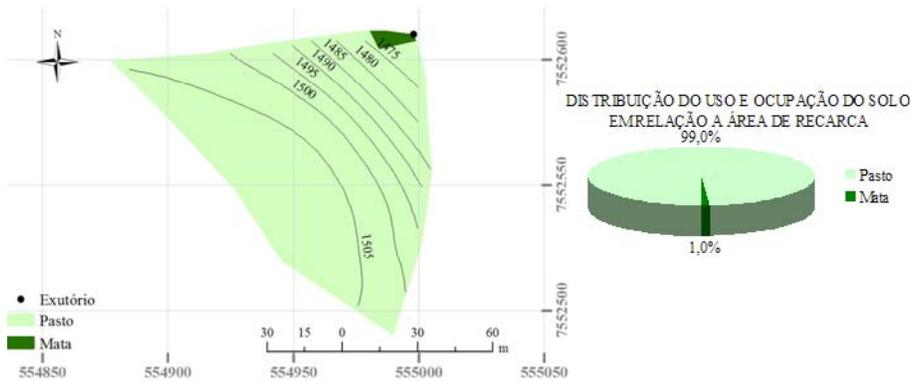


FIGURA 14 Mapa de uso e ocupação do solo da área de recarga da nascente L3.

Na área de recarga da nascente L4 (Figura 15) encontra-se 45,4% de pastagem; 31,4% de mata nativa e 23,2% de eucalipto, sendo que, em muitos locais encontram-se bastantes rochas expostas. Mesmo esta área estando em relevo muito acidentado, na sua maioria, o uso e ocupação do solo é de pastagem e o gado intervém constantemente no local. A cultura do eucalipto foi implantada de forma totalmente irregular no topo do morro e sem a adoção de práticas de manejo conservacionista do solo, como por exemplo, o plantio em nível.

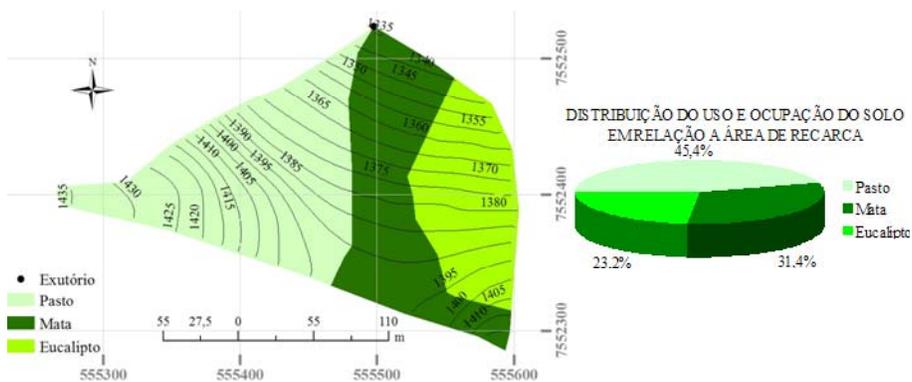


FIGURA 15 Mapa de uso e ocupação do solo da área de recarga da nascente L4.

Na área de recarga da nascente L5 (Figura 16) a pastagem ocupa 68,7% da área; 28,7% de samambaia silvestre; 2,1% de mata e de 0,5% de brejo correspondendo aos locais de afloramento d'água. Nesta área, a exploração da pecuária é feita de forma intensiva e logo abaixo do brejo, onde se inicia o curso d'água, é utilizado como bebedouro para o gado.

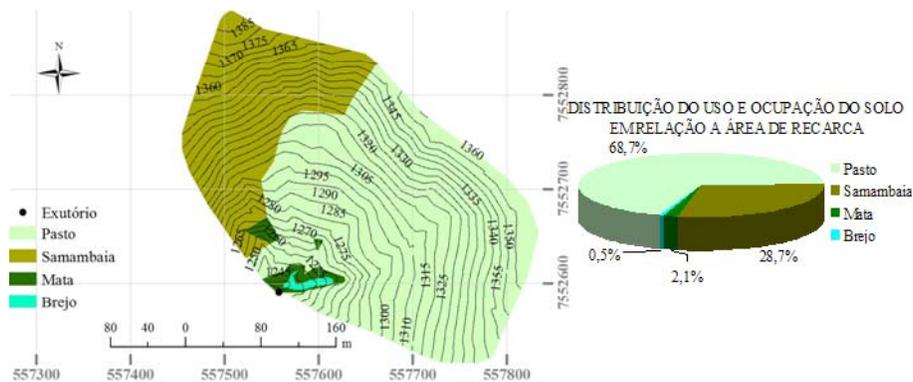


FIGURA 16 Mapa de uso e ocupação do solo da área de recarga da nascente L5.

Dentre as áreas de recarga analisadas na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha, a área de recarga da nascente L2 é a que se encontra em melhores condições ponto de vista ambiental, pois, a vegetação nativa esta presente em 67,1% de sua área e não ocorrem intervenções diretamente no ponto de afloramento d'água devido a suas condições de inacessibilidade local, assim esta se encontra menos antropizada que as demais.

Na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela a área de recarga da nascente M1 (Figura 17) é caracterizada tendo como uso e ocupação do solo 65,5% de sua área com a exploração intensiva da cultura do Milho; 13,9% outros, correspondendo à rodovia BR 265 que corta a área de recarga da nascente, as áreas de domínio da rodovia e as estradas vicinais locais; 8,4% a uma área onde a vegetação encontra-se em processo de regeneração natural; 7,2% a mata nativa e 4,9% a uma área de várzea. Na nascente M1 todo ano, no período seco, há ocorrência de queimadas nas áreas de mata nativa, regeneração

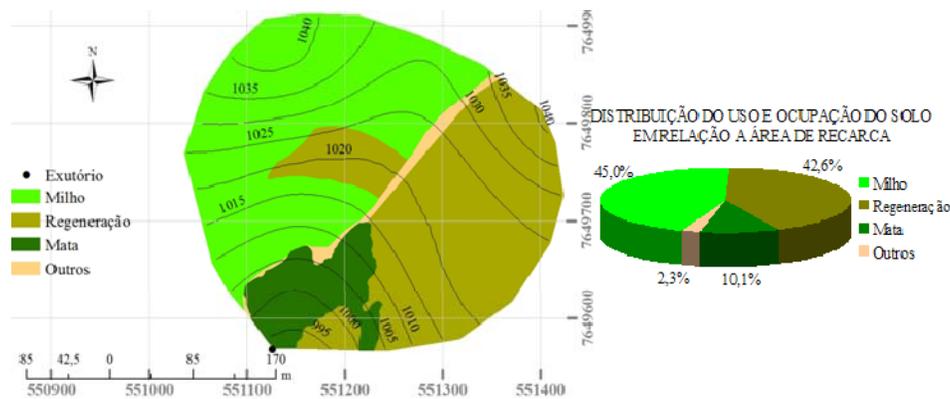


FIGURA 18 Mapa de uso e ocupação do solo da área de recarga da nascente M2.

A área de recarga da nascente M3 (Figura 19) é ocupada por 66,7% de pastagem; 22,4% de milho; 7,8% outros, correspondendo à área de domínio da rodovia BR 265; 2,9% por uma várzea onde se inicia a drenagem do aquífero formando o tributário e 0,2% por uma área de mata nativa, sendo esta muito rala e esparsa. Não existe nesta nascente nenhum tipo de proteção nos locais de afloramentos d'água contra o pisoteio do gado e logo abaixo do exutório desta microbacia existe um pequeno barramento para dessedentação de animais. Na nascente M3 anualmente no período seco há ocorrência de queimadas.

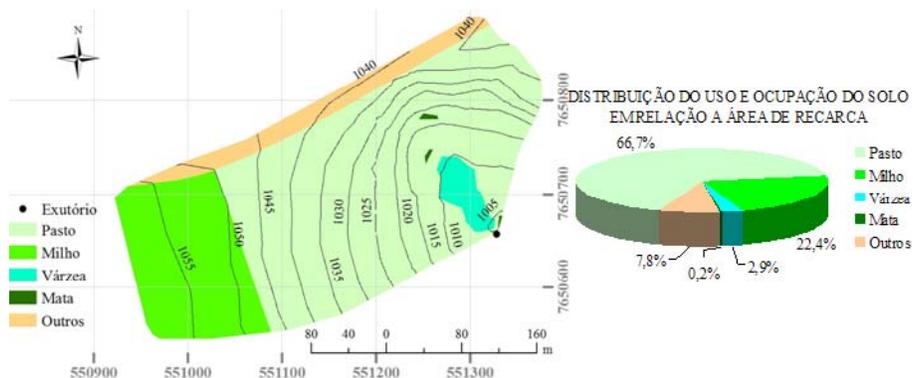


FIGURA 19 Mapa de uso e ocupação do solo da área de recarga da nascente M3.

A área de recarga da nascente M4 (Figura 20) é composta em 47,2% por uma área de regeneração natural; em 37,1% por pastagem e em 15,7% de mata nativa. Existe uma vala para caracterizar a divisa de propriedades rurais bem no

centro desta microbacia vegetada com mata, sendo bem caracterizada e separando as duas vertentes desta, onde após a ocorrência da precipitação, a vala atua como um dreno e carrega sedimentos diretamente para os locais de afloramento d'água, com tendência de assoreamento. Existe no entorno dos locais de afloramento d'água uma cerca de modo a evitar a entrada do gado, minimizando assim o pisoteio do gado nestes locais.

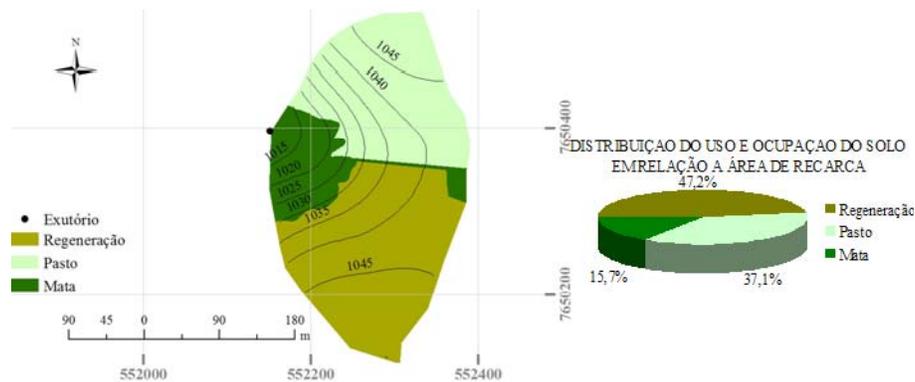


FIGURA 20 Mapa de uso e ocupação do solo da área de recarga da nascente M4.

A área de recarga da nascente M5 (Figura 21) é caracterizada com o percentual de 48,5% de ocupação com mata nativa; 33,2% por pastagem; 10,2% pela cultura do milho; 6,0% por várzea e 2,2% outros, sendo estes carreadores para manejo e escoamento da produção do milho. Da mesma forma que na nascente M3 na nascente M5 não existe nenhuma forma de proteção nos locais de afloramentos d'água contra o pisoteio do gado, e logo abaixo do exutório desta microbacia existe um pequeno barramento para dessedentação de animais e anualmente nos períodos mais seco há ocorrência de queimadas nas áreas de pastagem.

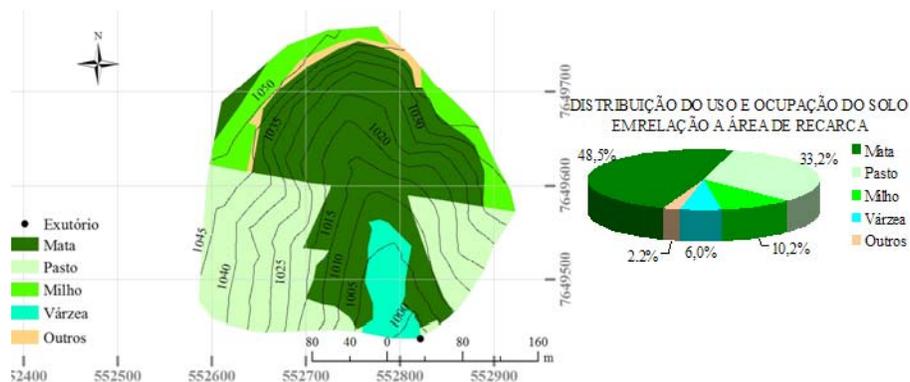


FIGURA 21 Mapa de uso e ocupação do solo da área de recarga da nascente M5.

Dentre as áreas de recarga analisadas na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, do ponto de vista ambiental a área de recarga da nascente M5 é a que se encontra em melhores condições de cobertura vegetal, sendo que em todas as áreas de recargas analisadas nesta sub-bacia, existe alguma forma de intervenção direta no entorno das APP's e nos locais de afloramento d'água.

Comparando-se as duas sub-bacias estudadas, as áreas de recarga de nascentes da sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela encontram-se mais antropizadas que as da sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha, podendo este fato estar relacionado com o tipo de exploração agrícola que ocorre nestes locais, sendo que a pecuária leiteira extensiva, a atividade dominante na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha e na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, a atividade mais relevante é a agropecuária mais tecnicada e intensiva.

A cobertura vegetal das áreas de recarga de nascentes por florestas, segundo Junqueira Júnior (2006), pode ser considerada como fator importante para o suprimento de água para os aquíferos e conseqüentemente para ciclo anual da vazão da nascente. Segundo Tabai et al. (2002), as matas de topos de morros funcionam como verdadeiras esponjas, absorvendo grande parte da água das chuvas e liberando-a lentamente para o solo, propiciando a infiltração e a

percolação no perfil. Desta forma, as florestas favorecem a recarga dos aquíferos, pela melhoria das condições de infiltração e percolação da água no solo. A presença da cobertura florestal propicia aumento no teor de matéria orgânica e da porosidade total do solo, e conseqüentemente, diminuição da densidade do solo, como o verificado por Junqueira Júnior (2006).

Na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha, através dos mapas de uso e ocupação do solo das áreas de recarga de nascente e das observações feitas nas campanhas de campo, ficou evidente que a mata atlântica naquela região vem sendo substituída pela pastagem e esta implantada sem práticas conservacionistas do solo, favorecendo o escoamento superficial direto e potencializando as perdas de água e solo. Situação esta, extremamente indesejável por se tratar de uma sub-bacia hidrográfica de cabeceira.

A preservação das áreas de recarga no entorno das nascentes, além de estar assegurada na legislação ambiental do país, retornaria certamente, em benefícios para os próprios agricultores destas microbacias na forma de estabilidade da capacidade de produção de água pelas nascentes em qualidade e quantidade.

3.2 Análise morfométrica das áreas de recarga das nascentes

Na Tabela 2 apresenta-se um quadro resumo com todos os parâmetros morfométricos calculados para caracterizar as áreas de recarga das nascentes estudadas.

Estes parâmetros podem revelar indicadores físicos específicos para um determinado local, de forma a qualificarem as alterações ambientais (Alves & Castro, 2003).

TABELA 2 Características morfométricas das áreas de recarga das nascentes estudadas.

Ident. nascentes	L1	L2	L3	L4	L5	M1	M2	M3	M4	M5
Características morfométricas										
Área (A) (ha)	7,24	2,43	0,87	5,14	8,74	26,37	10,47	9,14	7,20	8,45
Perímetro (P) (m)	1326,7	650,8	403,4	1008,8	1513,2	1965,8	1169,7	1248,6	1052,0	1073,9
Coefficiente de compacidade (Kc)	1,38	1,17	1,21	1,25	1,43	1,07	1,01	1,16	1,10	1,03
Fator de forma (Ff)	0,38	0,68	1,01	1,10	1,27	0,65	0,88	1,48	1,25	0,76
Índice de conformação (Ic)	0,40	0,61	0,98	1,07	1,23	0,63	0,82	1,85	1,16	0,73
Características do relevo										
Altitude máx. (m)	1707,5	1680,6	1510,0	1436,5	1394,6	1059,2	1041,4	1059,6	1050,0	1054,5
Altitude méd. (m)	1668,4	1644,6	1499,3	1384,3	1321,6	1035,4	1021,5	1035,2	1037,8	1026,8
Altitude mediana (m)	1666,7	1643,1	1502,6	1385,6	1322,5	1040,8	1022,4	1037,0	1040,9	1026,6
Altitude mín. (%)	1627,6	1610,3	1470,2	1334,4	1242,9	998,8	991,9	1004,4	1009,8	998,1
Declividade máx. (%)	218,5	70,3	86,5	82,5	148,5	58,0	22,5	72,4	35,2	285,3
Declividade média (I%) (%)	28,7	33,9	38,5	37,1	54,2	12,1	13,2	17,0	13,0	25,4
Declividade mediana (%)	28,2	32,4	30,8	37,2	55,0	8,7	14,3	15,6	10,9	24,5
Declividade mín. (%)	0,5	3,5	3,3	1,8	0,5	0,1	0,3	0,5	0,1	0,4

As dimensões das áreas de recarga das nascentes estudadas variaram muito em função da topografia local, situando-se entre 0,87 e 26,37 ha, o que poderá refletir na possibilidade de obtenção de resultados finais mais conclusivos e confiáveis em função da avaliação de ambientes distintos com relação a sua área.

O perímetro das áreas de recarga variou de 403,4 m correspondendo à menor área de recarga da nascente (nascente L3) a 1965,8 m correspondendo a maior área de recarga da nascente (nascente M1).

As características morfométricas obtidas, coeficiente de compacidade (K_c), fator de forma (K_f) e índice de conformação (I_c), mostram que as áreas de recarga de nascentes não possuem uma regularidade em suas formas e nem apresentam tendência a formatos semelhantes a figuras geométricas conhecidas.

A forma superficial de uma bacia hidrográfica é importante na determinação do tempo de concentração, ou seja, o tempo necessário para que toda a bacia contribua para a sua saída após uma precipitação. Quanto maior o tempo de concentração, menor a vazão máxima de cheia, se mantidas constantes as outras características (Villela & Mattos, 1975). Assim para um maior tempo de concentração maior será o tempo de oportunidade para que a água que infiltrou no solo percole e venha a recarregar o aquífero subterrâneo.

O maior tempo de concentração esta relacionado com os índices morfométricos de uma bacia, sendo que, quando o coeficiente de compacidade (K_c) apresentar o valor afastado da unidade e o fator de forma (K_f) exibir valor baixo (próximo a zero), este índices estarão indicando que a bacia não possui formato semelhante ao de uma circunferência, correspondendo, portanto, a uma bacia alongada. Tal fato pode, ainda, ser comprovado pelo índice de conformação (I_c), cujo valor deve estar acima ou abaixo da unidade.

Nas áreas de recarga de nascentes da sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha predominam altitudes variando entre 1242,9 e 1707,5 m, enquanto que

áreas de recarga de nascentes da sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela predominam altitudes variando entre 991,9 a 1059,6 m. As curvas hipsométricas das áreas de recarga das nascentes estudadas encontram-se em anexo (Gráfico 1A e 3A), e baseado nestas curvas, pode-se observar a porcentagem da área de drenagem que existe acima ou abaixo das várias altitudes em cada área de recarga estudada.

De acordo com Castro & Lopes (2001), a altitude média influencia a quantidade de radiação que a bacia recebe e, conseqüentemente, influencia também a evapotranspiração, temperatura e precipitação. Quanto maior a altitude da bacia, menor a quantidade de energia solar que o ambiente recebe e, portanto, menos energia estará disponível para esse fenômeno. Além do balanço de energia, a temperatura também varia em função da altitude, grandes variações na altitude ocasionam diferenças significativas na temperatura, que, por sua vez, também causa variações na evapotranspiração.

Na Tabela 2 pode-se verificar que as áreas de recarga de nascentes da sub-bacia hidrografia do Ribeirão Lavrinha encontram-se numa altitude média bem superior à das áreas recarga de nascentes da sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, estando esta diferença em torno de 500 m.

A declividade das áreas de recarga das nascentes tem uma relação importante e complexa com a infiltração, o escoamento superficial, a umidade do solo e a contribuição de água subterrânea ao escoamento do curso d'água. Tem relação direta com o tempo de oportunidade para que a precipitação possa vir a infiltrar, percolar e conseqüentemente abastecer os aquíferos subterrâneos. Áreas com declividades elevadas aceleram as enxurradas e dificultam a infiltração de água no solo. Assim verificou-se que as declividades médias das áreas de recarga das nascentes estudadas variam na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha de 28,7 a 54,2% e na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela variam de 12,1 a 25,4%. As curvas de distribuição de declividade

possibilitam observar a porcentagem da área de drenagem que existe acima ou abaixo das várias declividades das áreas de recarga, estando estas em anexo (Gráfico 2A e 4A).

As características da declividade nas áreas de recarga das nascentes podem ser observadas nas Figuras 22 a 31, sendo apresentado conjuntamente um gráfico referente às informações quantitativas do percentual de área correspondente a cada classe de declividade em relação à área total de recarga das nascentes.

Verifica-se pela Figura 22 que em sua maioria a área de recarga da nascente L1 é constituída por relevo fortemente ondulado, representando 67,2% da área total, estando presente nas vertentes: norte, leste e oeste, sendo que a vertente Leste é caracterizada também pela presença de relevo montanhoso. O percentual de área para as demais classes de declividade são 19,5; 10,9; 1,6; 0,7; 0,1% para relevo ondulado, montanhoso, suavemente ondulado, plano e fortemente montanhoso, respectivamente.

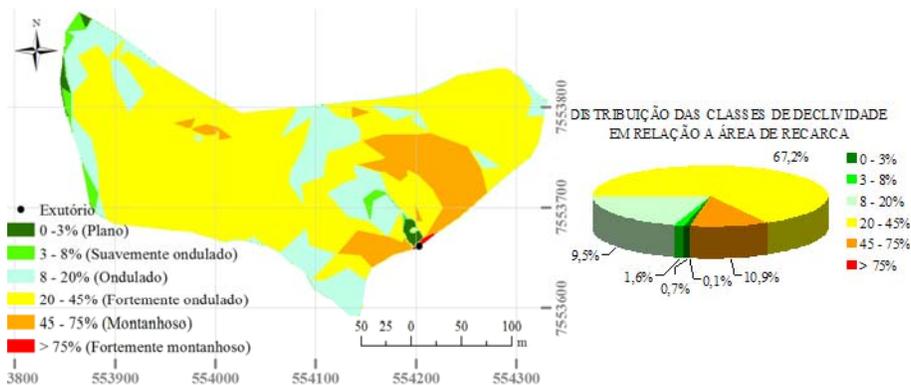


FIGURA 22 Mapa de classes de declividade da área de recarga da nascente L1.

Pela Figura 23 verifica-se a distribuição espacial das classes de declividade na área de recarga da nascente L2 onde há 57,3% de relevo fortemente ondulado, 24,0% de sua área de relevo montanhoso; 17,2% de relevo ondulado e 1,5% de relevo suavemente ondulado.

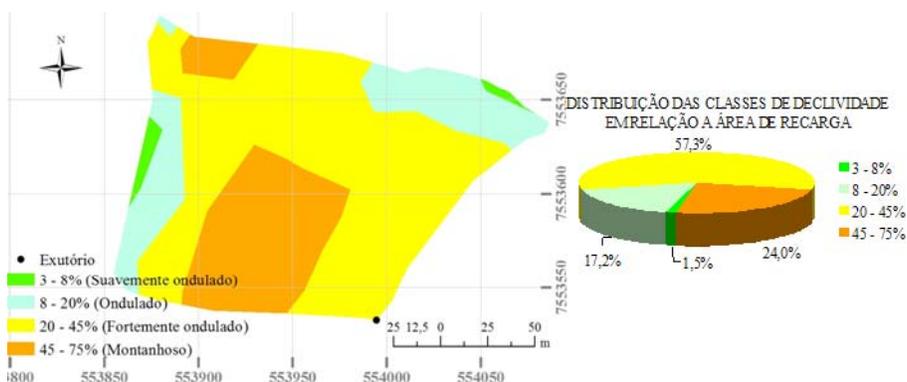


FIGURA 23 Mapa de classes de declividade da área de recarga da nascente L2.

Na área de recarga da nascente L3 verifica-se pela Figura 24 que esta é constituída de 29,9% por relevo fortemente ondulado; 28,8% por relevo ondulado; 23,8% relevo montanhoso; 11,6% por relevo fortemente montanhoso; 5,3% por relevo suavemente ondulado e 0,5% por relevo plano.

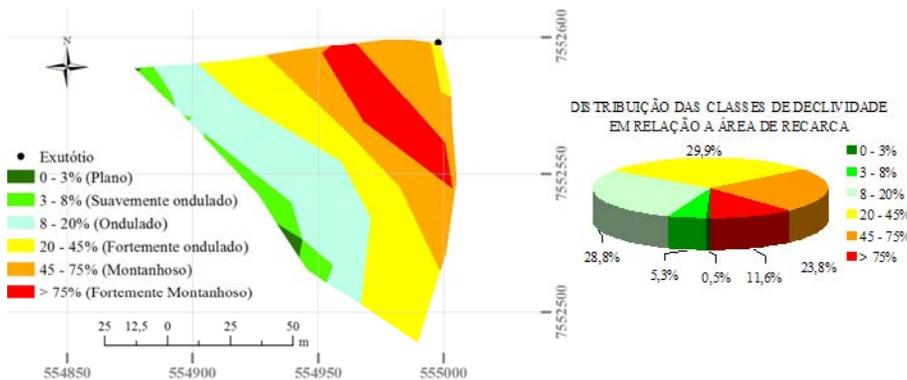


FIGURA 24 Mapa de classes de declividade da área de recarga da nascente L3.

A área de recarga da nascente L4 é constituída por 62,1% de relevo fortemente ondulado; 20,8% por relevo montanhoso; 13,0% por relevo ondulado; 2,6% por relevo fortemente ondulado; 1,4% por relevo suavemente ondulado e 0,2% por relevo plano, como pode ser visualizado na Figura 25.

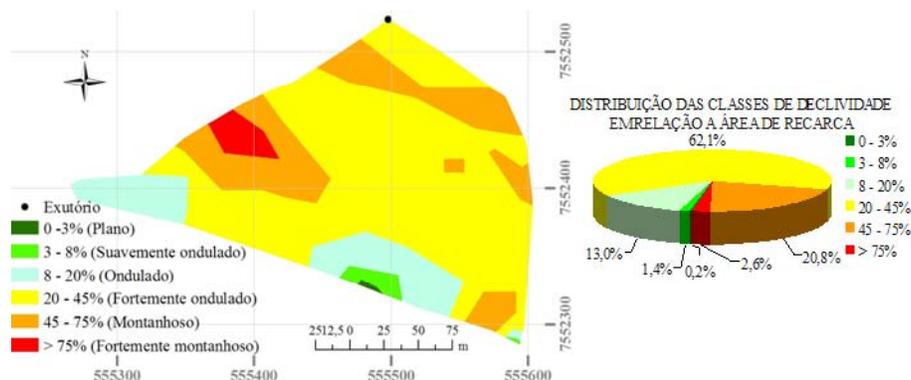


FIGURA 25 Mapa de classes de declividade da área de recarga da nascente L4.

A área de recarga da nascente L5 (Figura 26) apresenta em sua maioria relevo montanhoso correspondendo a 54,5% da área total e verifica-se também que o relevo nesta área é bastante movimentado e desuniforme. Os outros percentuais são 29,8% relevo fortemente ondulado; 12,5% de relevo fortemente montanhoso; 2,8% de relevo ondulado; 0,2% de relevo suavemente ondulado e 0,1% de relevo plano.

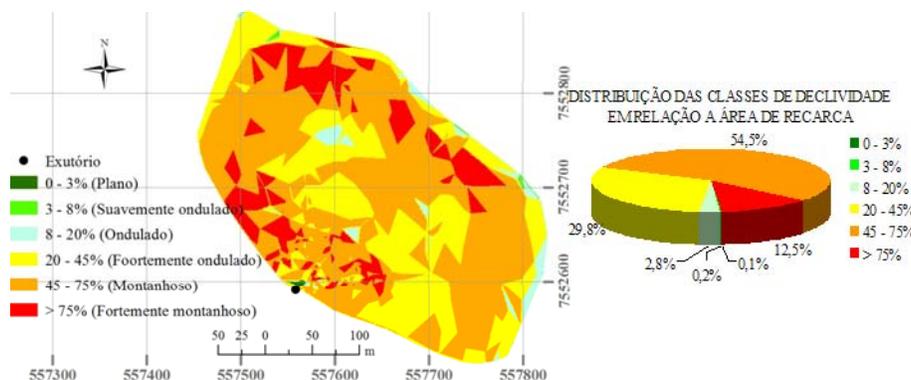


FIGURA 26 Mapa de classes de declividade da área de recarga da nascente L5.

A área de recarga da nascente M1 como pode ser visualizada pela Figura 27 é composta em 34,4% por relevo suavemente ondulado e outros 34,4% por relevo ondulado; 18% por relevo fortemente ondulado; 11,7% por relevo plano e 1,5% por relevo montanhoso.

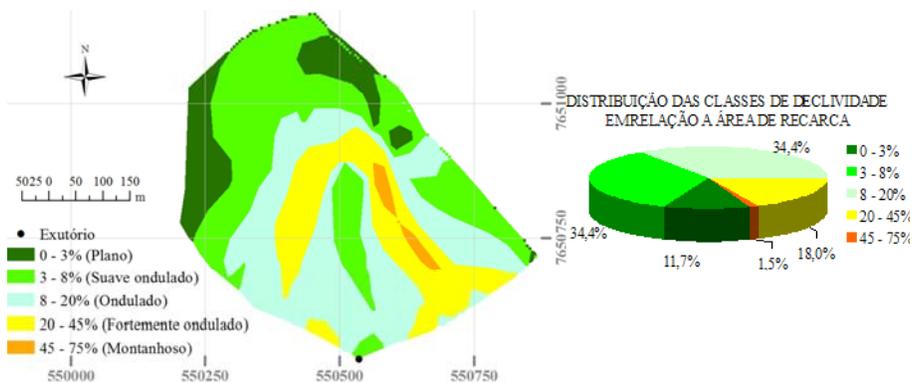


FIGURA 27 Mapa de classes de declividade da área de recarga da nascente M1.

O relevo da área de recarga da nascente M2 (Figura 28) é na sua maioria ondulado, correspondendo a 76,1% da área total; outros 16,4% correspondem a relevo suavemente ondulado; 6,3% a relevo fortemente ondulado e 1,2% a relevo plano.

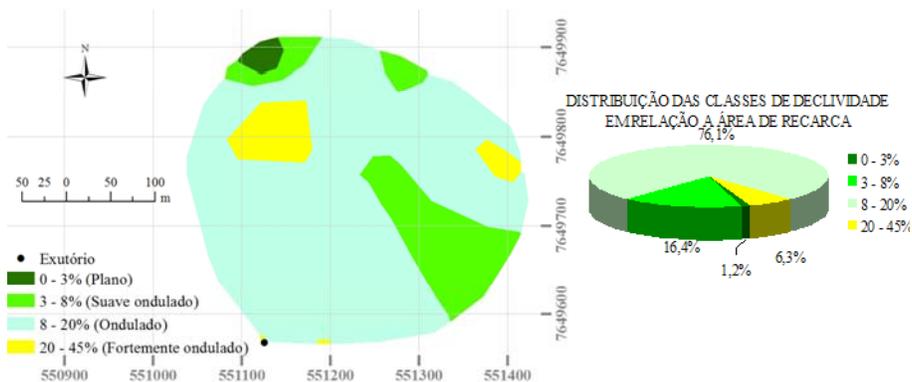


FIGURA 28 Mapa de classes de declividade da área de recarga da nascente M2.

Na área de recarga da nascente M3 (Figura 29) o terreno é constituído na sua maioria pelo relevo ondulado, correspondendo a 65,6% de sua área total. Os outros percentuais de classe de relevo são 22,0% relevo fortemente ondulado; 9,5% relevo suavemente ondulado; 2,1% relevo montanhoso e 0,7% de relevo plano.

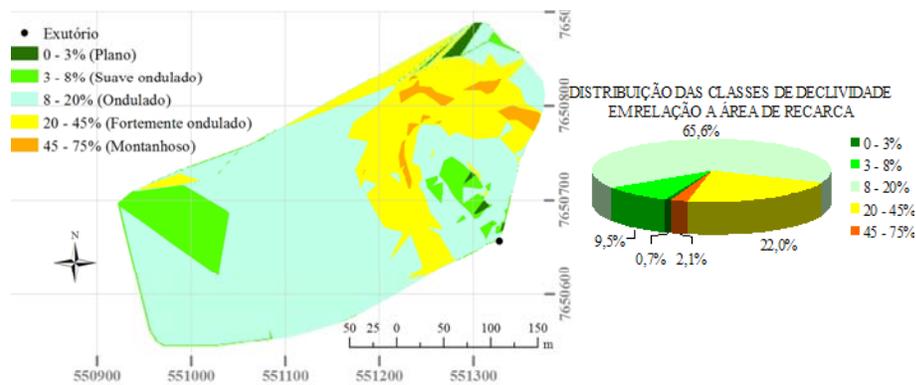


FIGURA 29 Mapa de classes de declividade da área de recarga da nascente M3.

Já a área de recarga da nascente M4 (Figura 30) é caracterizada por 36,4% de sua área por relevo ondulado, seguido de 31,9% por relevo suavemente ondulado; 25,4% por relevo fortemente ondulado e 6,3% por relevo plano.

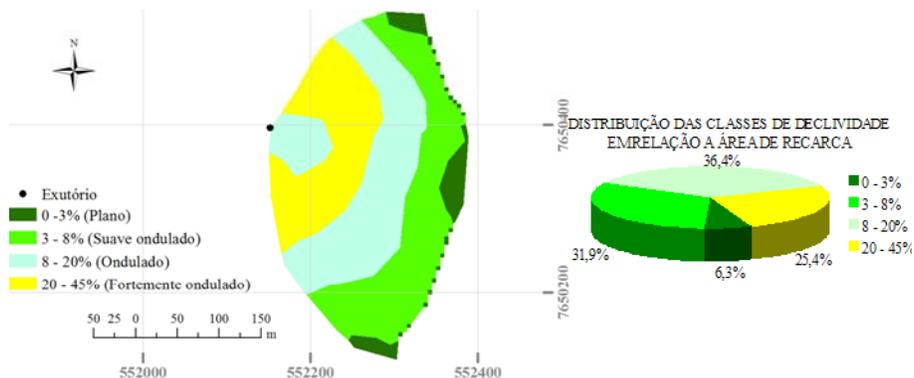


FIGURA 30 Mapa de classes de declividade da área de recarga da nascente M4.

O relevo da área de recarga da nascente M5 (Figura 31) é caracterizado por 58,5% de sua área ser relevo fortemente ondulado; 28,3% relevo ondulado; 7,8% relevo montanhoso; 4,4% relevo suavemente montanhoso; 0,9% relevo plano e 0,2% relevo fortemente montanhoso.

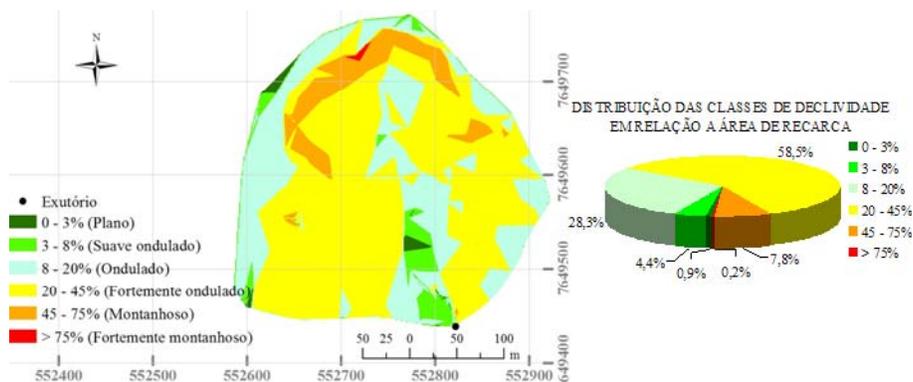


FIGURA 31 Mapa de classes de declividade da área de recarga da nascente M5.

As condições de relevo no entorno das nascentes variaram muito sendo que as nascentes monitoradas na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha apresentam-se sob relevo mais íngreme comparativamente às nascentes monitoradas na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, tendo assim maior predisposição ao escoamento superficial direto, refletindo numa menor possibilidade de percolação das águas da chuva.

A declividade média de uma bacia hidrográfica é relevante no planejamento, tanto para com o cumprimento da legislação quanto para garantir a eficiência das intervenções do homem no meio e possui importante papel na distribuição da água entre o escoamento superficial e subterrâneo, dentre outros processos. A ausência de cobertura vegetal, classe de solo e intensidade de chuvas, dentre outros, associada à maior declividade, conduzirá à maior velocidade de escoamento, menor quantidade de água armazenada no solo e resultará em enchentes mais pronunciadas, sujeitando a bacia à degradação. Assim, a magnitude dos picos de enchentes ou a menor oportunidade de infiltração e suscetibilidade à erosão dos solos dependem da rapidez com que ocorre o escoamento superficial, que está fortemente relacionado com o relevo.

Analisando-se conjuntamente relevo e cobertura vegetal, pode-se inferir que as condições do ponto de vista ambiental, encontradas nas nascentes da sub-

bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha são mais preocupantes, pois a cobertura vegetal de mata atlântica vem sendo substituída por pastagem e este fato aliado a uma situação de elevadas declividades e dominialidade dos solos serem o Cambissolo, irá favorecer as perdas de água e solo. O pisoteamento do gado nas áreas de pastagem poderá contribuir com o aumento da densidade do solo e conseqüentemente reduzir o percentual de infiltração e percolação da água da chuva nestes locais.

Na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela quando se analisa cobertura vegetal e relevo verifica-se que apesar de a agropecuária mais tecnificada e intensiva ser dominante nesta sub-bacia, podendo este fator estar ligado a dominialidade de seus solos serem o Latossolo e possuir um relevo mais suave, suas áreas de recarga de nascentes encontram-se menos predispostas às perdas de água e solo devido à menor declividade do terreno, favorecendo assim os processos de infiltração e percolação e quanto à cobertura vegetal nem todas as nascentes monitoradas estão sob vegetação nativa, porém constatou-se que existe certo grau de preocupação por parte de seus produtores e ternos de conservação dos recursos ambientais, sendo estas observadas através de atitudes simples como: práticas de conservação de solo como o plantio em nível na implantação da cultura do milho; áreas em que a vegetação esta em processo de regeneração e medidas paliativas para evitar o pisoteio do gado nos locais de afloramento d'água, como pequenas cercas no seu entrono.

3.3 Modelagem das vazões das nascentes

Na Figura 32 são apresentados os gráficos com as equações das vazões ajustadas ao modelo exponencial “Fórmula de Maillet” (Castany, 1967) para as nascentes da sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha, monitoradas no ano de 2008, obtidas pelo método de Newton Raphson.

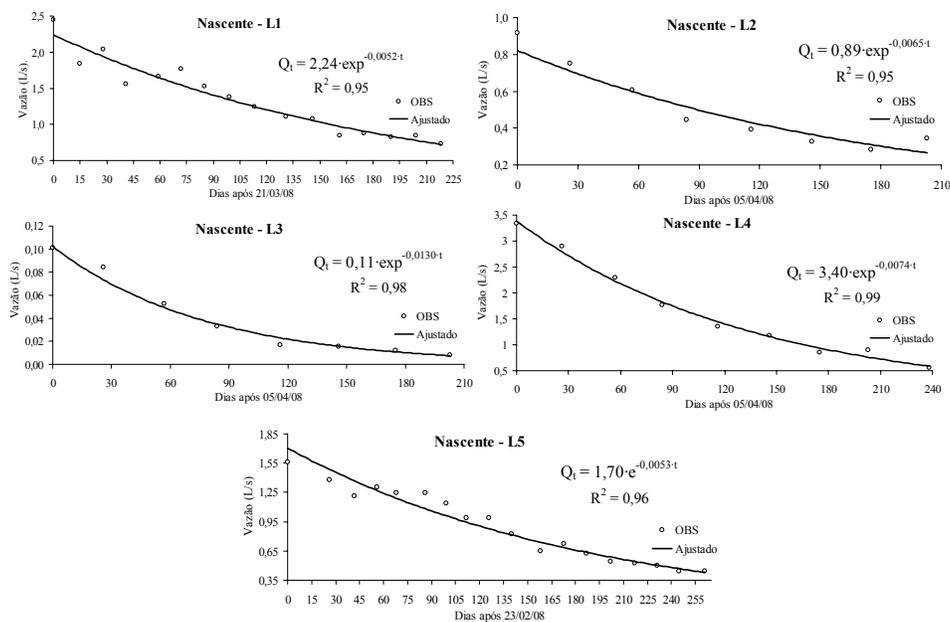


FIGURA 32 Hidrografas de depleção das vazões das nascentes monitoradas na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha no ano de 2008.

Pela Tabela 3, e com base nos valores de coeficiente de determinação (R^2) (todos acima de 0,90) observa-se que o comportamento temporal das vazões das nascentes monitoradas na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha no ano de 2008 é muito bem representado pelo modelo exponencial.

TABELA 3 Coeficientes das equações ajustadas para as vazões e os coeficientes de determinação (R^2) referentes aos ajustes para as nascentes monitoradas na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha.

Nascentes	Q_{t0} ($L \cdot s^{-1}$)	α (dia^{-1})	R^2
L1	2,24	0,0052	0,95
L2	0,89	0,0065	0,95
L3	0,11	0,0130	0,98
L4	3,40	0,0074	0,99
L5	1,70	0,0053	0,96

Os valores de Q_{t_0} correspondem às vazões das nascentes referentes ao primeiro dia de monitoramento no modelo ajustado, refletindo a condição inicial do aquífero subterrâneo, o qual será responsável pela produção d'água da nascente ao longo do ano. Quando se tem disponibilidade de dados de vários anos de monitoramento, podem-se comparar os valores de Q_{t_0} de uma mesma nascente e inferir o quanto houve de recarga dos aquíferos subterrâneos em relação aos anos anteriores.

Como já mencionado anteriormente, o coeficiente de recessão (α) é uma constante que representa as propriedades que afetam a descarga de um aquífero e corresponde à inclinação da curva de recessão em gráfico semilogarítmico. No intuito de explicar o que representa este coeficiente em termos de depleção da vazão das nascentes monitoradas, na Tabela 4 apresenta-se um comparativo do percentual de depleção da vazão em cada nascente, ocorrido do início ao fim do período de monitoramento das vazões das nascentes monitoradas na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha. Como as datas referentes ao primeiro dia de monitoramento da vazão e à vazão mínima registrada em todas nascentes não são correspondentes, para fins comparativos, adotou-se o intervalo de tempo de 05/04/08 como sendo representativo do primeiro dia de monitoramento da vazão e de 25/10/08 como sendo representativo da vazão mínima registrada nas nascentes da sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha.

TABELA 4 Decaimento percentual das vazões das nascentes monitoradas na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha, no período de 05/4/08 à 25/10/08.

Nascente	α	t_0	t_0'	$Q_{t_0'}$	$Q_{t(25/10)}$	$(Q_{t(25/10)}/Q_{t_0'}) \cdot 100$ (%)
L1	0,0052	21/3	5/4	2,07	0,72	34,80
L2	0,0065	5/4	5/4	0,88	0,23	26,73
L3	0,0130	5/4	5/4	0,11	0,01	7,14
L4	0,0074	5/4	5/4	3,40	0,76	22,26
L5	0,0053	23/2	5/4	1,36	0,46	34,10

Verifica-se pela Tabela 4 que quanto mais rápido for o decaimento da curva de recessão, estando este representado pelo coeficiente de recessão (α) menor será a vazão e que quanto maior o coeficiente de recessão (α), menor será a variação de vazão ocorrida no intervalo de tempo analisado.

Conforme o ajuste desenvolvido pode-se ordenar as nascentes em ordem crescente em termos de capacidade de manutenção do fluxo d'água ao longo do ano. Desta forma, podem-se agrupar as nascentes na seguinte seqüência L3, L4, L2, L5 e L1.

Analisando a Tabela 4 conjuntamente com as características de cobertura vegetal e declividade das áreas de recarga das nascentes verifica-se que o maior coeficiente de recessão (α) e conseqüentemente a menor variação do fluxo d'água ocorreu na nascente L3 onde o uso e ocupação do solo são constituídos basicamente por pastagem e a declividade média é de 38,5%. Nas nascentes L4 e L2 onde os coeficientes de recessão (α) são respectivamente 1,7 e 2 vezes menor que o coeficiente de recessão (α) da nascente L3, pode-se observar que suas capacidades de manutenção do fluxo d'água ao longo do ano, foram respectivamente 3,1 e 3,7 vezes menor que o da nascente L3, sendo que na área de recarga L4 o uso e ocupação do solo é pastagem, mata e eucalipto e a declividade média é de 37,1% e na área de recarga L2 o uso e ocupação do solo é mata e pastagem e a declividade média é de 33,9%. Já nas nascentes L5 e L1 ocorreram os dois menores coeficientes de recessão (α), sendo estes muito próximos uns dos outros e em torno de 2,5 vezes menor que o da área de recarga L3 sendo que a capacidade de manutenção do fluxo d'água ao longo do ano foi em torno de 4,8 vezes menor do que na nascente L3, sendo o uso do solo nestas áreas de recarga composto basicamente por pastagem com declividade média de 54,2 e 28,7% respectivamente nas áreas de recarga L5 e L1.

Na Figura 33, são apresentados os gráficos com as equações das vazões ajustadas ao modelo exponencial (Fórmula de Maillet) conforme Castany (1967)

para as nascentes da sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela monitoradas no ano de 2008, obtidas pelo método de Newton Raphson.

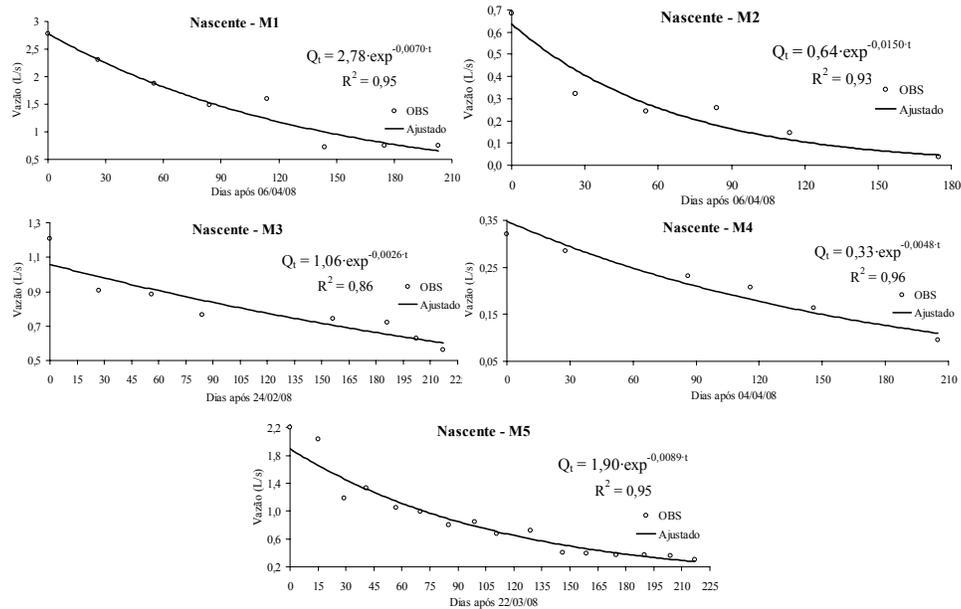


FIGURA 33 Hidrografas de depleção das vazões das nascentes monitoradas na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela no ano de 2008.

Pela Tabela 5, verifica-se através dos valores do coeficiente de determinação (R^2) (todos acima de 0,90, exceto nascente M3) que assim como o ocorrido na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha, o comportamento temporal das vazões das nascentes monitoradas na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela no ano de 2008, também é muito bem representado pelo modelo exponencial. Uma particularidade ocorreu no ajuste do modelo exponencial à nascente M3, onde o coeficiente de determinação (R^2) (coeficiente que expressa a qualidade no ajuste ao modelo) foi inferior a 0,90. Este fato não descaracteriza a eficácia do modelo exponencial em representar o fluxo de base dos aquíferos subterrâneos, podendo a qualidade no ajuste do modelo estar relacionado com qualidade do monitoramento onde não se conseguiu coletar informações referentes apenas ao fluxo de base, podendo juntamente com o

fluxo base ter ocorrido adição do escoamento superficial direto e/ou sub-superficial, descaracterizando assim a informação coletada. Em anexo (Tabela 2B) encontram-se todas as vazões monitoradas onde se pode verificar que na nascente M3 ocorreu uma variação de vazão muito acentuada ao longo do ano de 2008, com vários pontos de ascensão da vazão, o que não é característico da vazão em nascentes, sendo necessário retirar os outliers da série para a modelagem da vazão. Devido a esta grande oscilação nas vazões da nascente M3 teve-se dificuldade em obter um ajuste melhor ao modelo proposto.

TABELA 5 Coeficientes das equações ajustadas para as vazões e os coeficientes de determinação (R^2) referentes aos ajustes para as nascentes monitoradas na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela.

Nascente	Q_{10}	α	R^2
M1	2,78	0,0070	0,95
M2	0,64	0,0150	0,93
M3	1,06	0,0026	0,86
M4	0,33	0,0048	0,96
M5	1,90	0,0089	0,95

A Tabela 6 apresenta um comparativo do percentual de depleção da vazão em cada nascente, ocorrido do início ao fim do período de monitoramento das vazões monitoradas na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela. Os dias 06/04/08 e 25/10/08 foram utilizados neste comparativo como referentes às vazões máximas e mínimas, registradas respectivamente, nas nascentes monitoradas da sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela. Utilizou estas datas como referência, pois, o dia de ocorrência das vazões máxima e mínima registrado em cada uma das nascentes, não ocorreu nas mesmas datas.

TABELA 6 Decaimento percentual das vazões das nascentes monitoradas na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, no período de 06/4/08 à 25/10/08.

Nascente	α	t_0	t_0'	$Q_{t_0'}$	$Q_{t(25/10)}$	$(Q_{t(25/10)}/Q_{t_0'}) \cdot 100$ (%)
M1	0,0070	6/4	6/4	2,78	0,68	24,32
M2	0,0150	6/4	6/4	0,64	0,03	4,83
M3	0,0026	24/2	6/4	0,95	0,56	59,14
M4	0,0048	4/4	6/4	0,33	0,12	37,92
M5	0,0089	22/3	6/4	1,66	0,28	16,57

Como já foram discutidos o significado e importância dos coeficientes Q_{t_0} e α quando se apresentou a modelagem da vazão para as nascentes monitoradas na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha, cabe agora ordenar as nascentes monitoradas na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela em ordem crescente em termos de capacidade de manutenção do fluxo d'água ao longo do ano. Desta forma, podem-se agrupar as nascentes na seguinte sequência M2, M5, M1, M4, M3.

Analisando a Tabela 6 conjuntamente com as características de cobertura vegetal e declividade das áreas de recarga das nascentes verifica-se que o maior coeficiente de recessão (α) e conseqüentemente a maior capacidade de manutenção do fluxo d'água ao longo do ano ocorreu na nascente M2 onde o uso e ocupação do solo são constituídos por regeneração natural, milho e mata e a declividade média é de 13,2%. Na nascente M5 onde o coeficiente de recessão (α) é 1,7 vezes menor que o coeficiente de recessão (α) da nascente M2, pode-se observar que a capacidade de manutenção do fluxo d'água ao longo do ano nestas nascentes foi 3,4 vezes menor que o da nascente M2, sendo que o uso e ocupação do solo são compostos por mata, pastagem e milho e a declividade média é de 25,4%. Na nascente M1 onde o coeficiente de recessão (α) é 2,1 vezes menor que o coeficiente de recessão (α) da nascente M2, pode-se observar que a capacidade de manutenção do fluxo d'água ao longo do ano nestas

nascentes foi 5 vezes menor que o da nascente M2, sendo que o uso e ocupação do solo é composto por milho, regeneração, mata e outros e a declividade média é de 12,1%. Na nascente M4 onde o coeficiente de recessão (α) é 3,1 vezes menor que o coeficiente de recessão (α) da nascente M2, pode-se observar que a capacidade de manutenção do fluxo d'água ao longo do ano nestas nascentes foi 7,8 vezes menor que o da nascente M2, sendo que o uso e ocupação do solo são compostos por regeneração, pastagem e mata e a declividade média é de 13,0%. Já na nascente M3 ocorreu o menor coeficiente de recessão (α), sendo estes 5,7 vezes menores que o da área de recarga M2 e a capacidade de manutenção do fluxo d'água ao longo do ano ficaram em torno de 12,3 vezes menor do que na nascente M2, sendo o uso do solo nestas áreas de recarga composto basicamente por pastagem e milho com declividade média de 54,2%.

Observando-se as áreas de recarga das nascentes das duas sub-bacias estudadas e relacionando e comparando capacidade de manutenção do fluxo d'água ao longo do ano com o uso e ocupação do solo e declividade média nestas áreas não foi possível inferir sobre qual das características da paisagem (uso e ocupação do solo e declividade média) é mais relevante na capacidade de manutenção do fluxo d'água ao longo do ano, porém ficou explícito, que fatores como uso e ocupação do solo e declividade média das áreas de recarga de nascentes influencia no comportamento espacial das vazões e na capacidade de manutenção do fluxo d'água ao longo do ano.

Uma constatação importante verificada neste trabalho é que quando se tem interesse em ajustar a “Fórmula de Maillet” para nascentes, o monitoramento destas, deve ser feito de forma a caracterizar bem o início da depleção da vazão no período de seca e o início da ascensão da vazão no período chuvoso, fazendo nestes períodos o monitoramento da vazão de forma mais intensiva possível, sendo que nos demais períodos ao longo da curva de

depleção o monitoramento pode ser mais espaçados, sugerindo-se frequência mensal no monitoramento.

3.4 Rendimento específico das nascentes

A partir das vazões médias mensais das nascentes monitoradas na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha e de suas áreas de recarga obteve-se o gráfico do rendimento específico das nascentes em função do tempo, sendo este plotado juntamente com a precipitação mensal referente aos meses monitorados, conforme Figura 34.

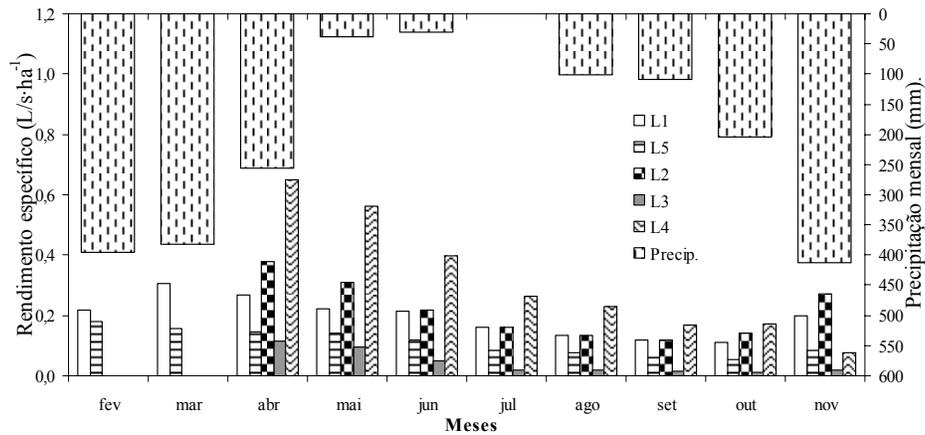


FIGURA 34 Rendimento específico apresentado pelas nascentes monitoradas na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha no período de fevereiro a outubro de 2008.

A análise da Figura 34 permite verificar o comportamento temporal do rendimento específico (capacidade de produção d'água por unidade de área) das nascentes monitoradas na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha, onde o total precipitado no intervalo de tempo analisado foi de 1930 mm. A nascente L1, cujo uso e ocupação do solo, é, em sua maioria, pastagem (92,9% da área total) e a topografia do terreno é composta majoritariamente pelo relevo fortemente ondulado com declividade média de 28,7% apresentou rendimento

máximo de $0,31 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{ha}^{-1}$ no mês de março, sendo no mês de outubro referente ao rendimento mínimo no período, correspondendo a um rendimento específico de $0,11 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{ha}^{-1}$.

Na área de recarga da nascente L2, onde o uso e ocupação do solo são de mata e pastagens (67,1 e 32,9% respectivamente) e a topografia constitui de 57,3% de relevo fortemente ondulado com declividade média de 33,9%, apresentou rendimentos específicos máximo e mínimo nos meses de abril e outubro correspondendo a $0,38$ e $0,14 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{ha}^{-1}$ respectivamente. Também foram nos meses de abril e outubro que ocorreram os rendimentos específicos máximo e mínimo da nascente L3 sendo estes da ordem de $0,12$ e $0,01 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{ha}^{-1}$ respectivamente, porém a área L3 é ocupada basicamente por pastagem e sua topografia encontra-se representada principalmente pelas classes de relevo fortemente ondulado, relevo ondulado e relevo montanhoso tendo declividade média de 38,5%. Já na nascente L4 onde o solo é ocupado pelos percentuais de 45,4% por pastagem, 31,4% por mata e 23,2% por eucalipto e a topografia local é constituída por 62,1% de sua área por relevo fortemente ondulado, tendo declividade média de 37,1%, apresentou no mês de abril, rendimento máximo de $0,65 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{ha}^{-1}$ e no mês de novembro rendimento mínimo de $0,08 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{ha}^{-1}$.

Na nascente L5, na qual sua cobertura vegetal é composta na maioria por pastagem tendo um pequeno remanescente de floresta em torno dos locais de afloramento da água e o relevo bastante movimentado (54,5% da área relevo montanhoso) com declividade média de 54,2%, teve seu rendimento específico máximo no mês de fevereiro correspondendo a $0,18 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{ha}^{-1}$ e rendimento específico mínimo no mês de outubro, de $0,05 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{ha}^{-1}$.

Verifica-se que existem relações importantes entre as condições de uso e ocupação do solo, característica topográfica e manejo do solo com o rendimento específico das nascentes, sendo a capacidade de produção d'água por unidade de área muito variável em conformidade com cada ambiente. Nas nascentes L2, L3

e L4, onde a declividade encontra-se em intervalos próximos e o uso e ocupação do solo em sua maioria é composto principalmente por mata nas áreas L2 e L4 e por pastagem na área L3, verificou-se maior capacidade de produção d'água por unidade de área em regiões de mata quando comparado à região ocupada por pastagem.

Os rendimentos específicos médios mensais ($L \cdot s^{-1} \cdot ha^{-1}$) das nascentes monitoradas na bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela e as precipitações mensais para os meses monitorados são mostrados na Figura 35.

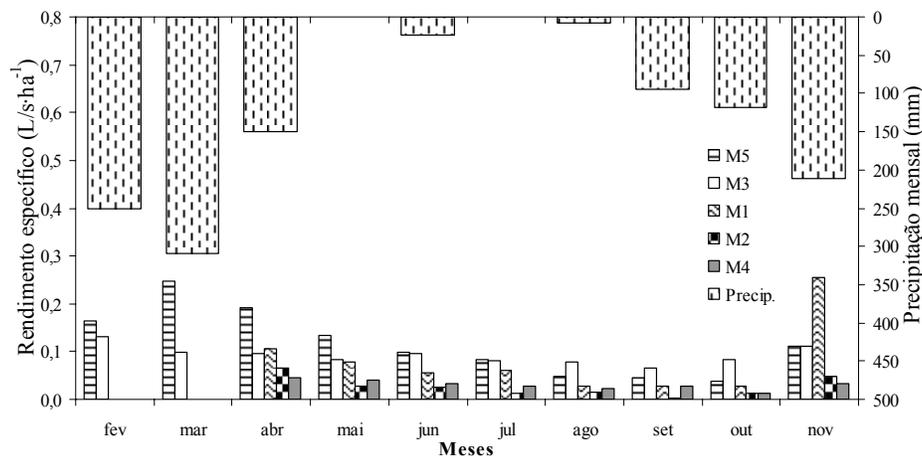


FIGURA 35 Rendimentos específicos apresentado pelas nascentes monitoradas na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela no período de fevereiro a outubro de 2008.

A análise da Figura 35 permite verificar o comportamento temporal do rendimento específico (capacidade de produção d'água por unidade de área) das nascentes monitoradas na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, onde o total precipitado no intervalo de tempo analisado foi de 1165 mm. A nascente M1, na qual o uso e ocupação do solo é o cultivo intensivo do milho e sua topografia é composta na sua maioria pelo relevo suavemente ondulado e relevo ondulado, tendo declividade média de 12,1%, apresentou no ano de 2008 rendimentos específicos máximo e mínimo de 0,11 e 0,03 $L \cdot s^{-1} \cdot ha^{-1}$

respectivamente nos meses de abril e agosto. Na nascente M2 onde o uso do solo é na maioria cultivo intensivo do milho e regeneração natural da vegetação sendo a topografia quase que exclusivamente de relevo ondulado, apresentando declividade média de 13,2%, o rendimento específico máximo foi no mês de abril e o mínimo no mês de setembro, correspondendo a 0,07 e 0,003 $L \cdot s^{-1} \cdot ha^{-1}$ respectivamente. Já na nascente M4 o rendimento específico máximo foi de 0,04 $L \cdot s^{-1} \cdot ha^{-1}$ ocorrendo no mês de abril e o rendimento específico mínimo foi de 0,013 $L \cdot s^{-1} \cdot ha^{-1}$ ocorrendo no mês de outubro, sendo que esta área é ocupada em 47,2% do seu total por regeneração natural e 37,1% por pastagem e possui em grande parte o relevo classificado como ondulado e suavemente ondulado com declividade média de 13%.

No mês de fevereiro a nascente M3 apresentou seu rendimento específico máximo 0,13 $L \cdot s^{-1} \cdot ha^{-1}$ chegando ao mês de setembro com um rendimento específico mínimo correspondente a 0,07 $L \cdot s^{-1} \cdot ha^{-1}$ sendo que a ocupação do solo nesta área constituiu-se basicamente, em 66,7% do seu total por pastagem e 22,4% por milho e possui grande parte o relevo, classificado como ondulado e declividade média de 17%. A nascente M5 caracterizada em sua maioria pelo uso e ocupação do solo com mata nativa e relevo fortemente ondulado, com declividade média de 25,4%, apresentou no mês de março rendimento específico máximo de 0,25 $L \cdot s^{-1} \cdot ha^{-1}$ e no mês de outubro, rendimento específico mínimo de 0,04 $L \cdot s^{-1} \cdot ha^{-1}$.

As precipitações que ocorreram no período de fevereiro a novembro (Figura 35) na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, na maioria dos casos, proporcionaram a elevação na capacidade de produção d'água pelas nascentes, podendo, este comportamento, ser parcialmente explicado pelo fato de esta sub-bacia hidrográfica apresentar a menor declividade média comparada à sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha, o que lhe garante melhores condições de recarga dos aquíferos subterrâneos ao longo do ano, vindo estes a

responderem à precipitação em um espaço curto de tempo, ressaltando que as particularidades no uso e ocupação do solo são fatores que também influenciam a resposta das áreas de recarga à precipitação ocorrida.

A resposta rápida ou lenta às precipitações na recuperação da capacidade de produção d'água pelas nascentes depende, principalmente, das condições iniciais de umidade do solo, da sua textura, estrutura, profundidade, cobertura vegetal, da intensidade das precipitações, das condições de relevo, das condições físico-hídricas do solo, dentre outros, pois são estes os mecanismos que armazenam e distribuem a água vinda das precipitações.

Todas as vazões monitoradas podem ser visualizadas em Tabelas 1B e 2B que seguem em anexo.

3.5 Deflúvio das nascentes

A Tabela 7 apresenta o deflúvio total em volume (L) e em lâmina (mm) e a vazão média diária (L/dia) para o período monitorado.

TABELA 7 Deflúvio total em volume (L), em lâmina (mm) e vazão média diária do período (L/dia) das nascentes monitoradas.

Nascente	Deflúvio (L)	Deflúvio (mm)	Vazão média diária (L/dia)
Sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha			
L1	25271540,29	349,2	115924,50
L2	8631310,79	355,8	42518,77
L3	655402,82	75,5	3228,59
L4	30857283,19	599,9	129652,45
L5	20196549,55	231,1	77381,42
Sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela			
M1	26064914,68	98,9	128398,59
M2	3401727,01	32,5	19438,44
M3	15159667,98	165,8	69860,22
M4	3710534,56	51,6	18100,17
M5	15493931,02	183,4	71400,60

O deflúvio em lâmina na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha variou de 75,5 a 599,9 mm. Nesta o maior deflúvio ocorreu em uma área de 7,24 ha onde o uso e ocupação do solo são compostos por pastagem, mata nativa e eucaliptos correspondendo à área L4 conforme Figura 15 e o menor refere-se à área de recarga L3 de 0,87 ha onde o uso e ocupação do solo são essencialmente de pastagem conforme Figura 14.

Na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela o deflúvio variou de 183,4 a 32,5 mm. O maior deflúvio na sub-bacia do Ribeirão Marcela ocorreu em uma área de recarga (M5) de 8,45 ha em que o uso e ocupação do solo são essencialmente de mata nativa, pastagem e milho conforme Figura 21 e o menor deflúvio ocorreu em uma área (M2) de 10,47 ha em que o uso e ocupação do solo são essencialmente de milho e regeneração natural conforme Figura 18.

Analisando o deflúvio anual das nascentes monitoradas e relacionando-os com a dimensão de suas áreas de recarga, o uso e ocupação do solo e declividade das áreas de recarga de nascentes, não foi possível determinar a relação existente entre estes parâmetros, ou seja, quais destes parâmetros são mais relevantes para a manutenção do deflúvio anual numa nascente. Já as diferenças em termos de produção de água das nascentes monitoradas nas duas sub-bacias estudadas podem estar relacionadas aos diferentes regimes pluviométricos locais.

O deflúvio em lâmina corresponde ao fluxo base que escoou da nascente no período de depleção de sua vazão ao longo do ano e contribuiu para a formação e manutenção do curso d'água principal. O deflúvio também representa a parcela da precipitação que percolou e veio a constituir a água dos aquíferos. Através de informações de deflúvio de vários anos pode-se inferir sobre a recarga e o comportamento dos aquíferos, verificando assim seu comportamento temporal.

4 CONCLUSÕES

- a) Verificou-se grande variabilidade espacial e temporal das vazões das nascentes ao longo do ano de 2008.
- b) As duas sub-bacias hidrográficas monitoradas apresentaram grandes diferenças em termos de produção d'água em suas nascentes, podendo estas diferenças ser atribuídas ao regime pluviométrico de cada localidade.
- c) Existem relações importantes entre as condições de uso e ocupação do solo, características topográficas, características morfométricas e manejo do solo com a capacidade de manutenção do fluxo d'água ao longo do ano (α), rendimento específico médio mensal e o deflúvio anual das nascentes.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES, J. M. P.; CASTRO, P. T. A. Influência de feições geológicas na morfologia da bacia do Rio Tanque (MG) baseada no estudo de parâmetros morfométricos e análise de padrões de lineamentos. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 33, n. 2, p. 117-127, jun. 2003.
- BERTOL, G. A. **Avaliação da recarga anual no aquífero Bauru no município de Araguari, Minas Gerais**. 2007. 101 p. Dissertação (Mestrado em Geologia Econômica e Aplicada) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- CASTANY, G. **Traité pretique des eaux souterraines**. 2. ed. Paris: Dunod, 1967. 661 p.
- CASTRO, P.; LOPES, J. D. S. **Recuperação e conservação de nascentes**. Viçosa, MG: CPT, 2001. 84 p.
- CHRISTOFOLETTI, A. Análise morfométrica de bacias hidrográficas. **Notícia Geomorfológica**, Campinas, v. 18, n. 9, p. 35-64, Sept. 1969.
- JUNQUEIRA JÚNIOR, J. A. **Escoamento de nascentes associado à variabilidade espacial de atributos físicos e uso do solo em uma bacia hidrográfica de cabeceira do Rio Grande, MG**. 2006. 84 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Lavras, Lavras.
- LIMA, W. P. de. Análise física da bacia hidrográfica. In: _____. **Introdução ao manejo de bacias hidrográficas**. Piracicaba: ESALQ, 2006. cap. 3, p. 50-69.
- POLITANO, W.; PISSARRA, T. C. T. Relações entre características morfométricas quantitativas e estimativa da vazão em função da área em microbacias hidrográficas de 2ª ordem de magnitude. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 23, n. 1, p. 179-186, jan. 2003.
- PORTO, R. L.; ZAHED FILHO, K.; SILVA, R. M. da. **Hidrologia aplicada**. São Paulo: USP, 1999. 32 p.
- ROSA FILHO, E. F. Caracterização da depleção de um aquífero através do coeficiente de descarga, α , de Maillet. **Boletim Paranaense de Geociências**, Curitiba, v. 41, n. 2, p. 125-131, 1993.

SANTOS, A. R. dos. **Caracterização morfológica, hidrológica e ambiental da bacia hidrográfica do Rio Turvo Sujo, micro-região de Viçosa, MG.** 2001. 125 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

TABAI, F. C. V. **Manual de procedimentos técnicos de restauração florestal em áreas de preservação permanente.** Piracicaba: Consórcio Intermunicipal das Bacias dos Rios PCJ, 2002. 4 p.

TONELLO, K. C.; DIAS, H. C. T.; SOUZA, A. L. de; RIBEIRO, C. A. A. S.; LEITE, F. P. Morfometria da bacia hidrográfica da cachoeira das Pombas, Guanhães – MG. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 30, n. 5, p. 849-857, set./out. 2006.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada.** São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1975. 245 p.

CAPÍTULO 3

Estimativa da recarga subterrânea em nascentes do Alto Rio Grande - MG

RESUMO

Aquíferos subterrâneos são formações rochosas ou camadas geológicas que armazenam e transmitem água. A recarga de água subterrânea é definida, de maneira geral, como a quantidade de água que é acrescentada ao aquífero, e pode ocorrer localmente a partir da infiltração das águas das chuvas. Este trabalho apresenta o método de flutuação das superfícies livres (*Water Table Fluctuation* - WTF) para estimativa da recarga direta e um balanço hídrico subterrâneo para estimativa da recarga profunda, em aquíferos livres. O método WTF utiliza dados de monitoramento do nível do aquífero e rendimento específico do aquífero para determinação da recarga direta. O balanço hídrico subterrâneo assume a recarga direta estimada pelo método WTF como sendo a entrada de água no sistema e as saídas como sendo o escoamento de base e a recarga profunda. As estimativas de recarga foram aplicadas a quatro áreas de recarga de nascentes (áreas: L1; L5; M3 e M5) no ano de 2008, sendo duas destas na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha e as outras duas na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, ambas inseridas da região do Alto Rio Grande-MG. A estimativa da recarga direta foi de 341,6; 183,8; 148,3; 139,2 mm/ano para as nascentes L1, L5, M3 e M5, respectivamente. O deflúvio anual das nascentes ocorreu com um valor acima da recarga direta indicando uma situação de exploração do aquífero, sendo assim uma situação não sustentável. A estimativa do rendimento específico dos aquíferos pode estar subestimada. O monitoramento dos níveis dos aquíferos deve continuar por mais tempo no intuito de se obter resultados mais conclusivos.

ABSTRACT

Groundwater recharge estimate at Alto Rio Grande – MG watershed

Aquifers can be defined as rock formation or geological layers that can store and transmit water. The aquifer recharge is the quantity of water added to the aquifer locally or from rain water infiltration. This study uses the water table fluctuation – WTF method to estimate the direct recharge and a groundwater balance to estimate the deep recharge on unconfined aquifers. The WTF method employ aquifer water levels and its specific yield to estimate the direct recharge. The groundwater balance considers the direct recharge estimated by the WTF method as the water input and the output as the base flow and the deep recharge. The recharge was estimated at four areas (L1, L5, M3 and M5) during 2008, being two of them at the Lavrinha watershed and the other two at the Marcela watershed, both at the Alto Rio Grande-MG watershed. The direct recharge estimate was 341.6, 183.8, 148.3, 139.2 mm/year for L1, L5, M3 and M5, respectively. The annual flow was above the direct recharge pointing a situation of over exploitation of the aquifer, a non sustainable situation. The specific yield of the aquifers could have been also underestimated. The water level at the aquifers must be kept for a longer period in order to obtain more conclusive results.

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, a utilização dos recursos hídricos subterrâneos vem se tornando cada dia mais frequente, sendo que, nos dias atuais, a demanda por este recurso para atendimento ao abastecimento urbano, industrial e agrícola é constante e crescente. Apesar das instituições gestoras dos recursos hídricos priorizarem a gestão das águas superficiais, as águas subterrâneas é motivo de preocupação por parte destas instituições. Diante deste quadro, não somente torna-se necessária a busca de novas fontes de água potável como também, despertar o interesse para o uso racional dos recursos hídricos.

O uso sustentável dos recursos hídricos, em especial os subterrâneos, não requer apenas estudos sobre vulnerabilidade e contaminação dos aquíferos, como vem ocorrendo nos últimos anos, mas também, o conhecimento dos componentes que atuam em seu comportamento hidráulico, o qual é de suma importância para o estabelecimento de medidas preventivas e/ou corretivas na sustentabilidade deste recurso (Formaggio, 2007). Assim, o estudo das águas subterrâneas é extremamente importante, não somente pela carência de conhecimentos científicos a respeito das águas subterrâneas no Brasil, como também pelo uso, que na maioria das vezes é feito de forma incorreta e desmedida, o que de certa forma pode prejudicar o acesso a este bem pelas futuras gerações.

Diante da crescente demanda de água, especialmente das águas subterrâneas, várias medidas devem ser tomadas para se evitar conflitos entre os usuários. Segundo Paiva (2006) se não forem feitos estudos e planejamentos para a exploração dos recursos hídricos subterrâneos, graves danos podem ocorrer, desde problemas de rebaixamentos excessivos, que poderão inviabilizar economicamente o bombeamento, a problemas de contaminação pelo aumento excessivo do gradiente hidráulico, devido ao grande rebaixamento. A estimativa da recarga das águas subterrâneas surge então como um pré-requisito para uma

gestão eficiente e sustentável de tais recursos, uma vez que os recursos hídricos são a chave para o desenvolvimento econômico. Para Bertol (2007), a estimativa da recarga aquífera é um fator determinante dos estudos hidrogeológicos e do gerenciamento das explorações de água subterrânea, tendo em vista a sustentabilidade em longo prazo, da quantidade e da qualidade da água do aquífero. A recarga de água subterrânea é definida, de maneira geral, como a quantidade de água que é acrescentada ao aquífero, num determinado tempo, e apesar de sua importância, pouco se sabe sobre a qualidade e a quantidade de água que recarrega os sistemas aquíferos.

Os sistemas aquíferos são dinâmicos e se ajustam continuamente no curto prazo e, no longo prazo com as mudanças no clima, exploração, mudanças de regime dos rios e sua exploração, e no uso do solo (Wendland et al., 2007). O monitoramento dos níveis de água em poços de observação dos aquíferos fornece dados essenciais para avaliação das mudanças neste importante recurso (recarga, armazenamento e descarga do aquífero), para o desenvolvimento de modelos, para prever tendências, projetar, executar, e monitorar a eficácia da gerência dos aquíferos e programas de proteção.

A utilização de modelos que possam representar o sistema em questão é crucial para a análise do comportamento de um aquífero a partir dos dados coletados. Neste contexto, este capítulo apresenta a estimativa da recarga subterrânea direta através do método de Flutuação da Superfície Livre (*Water Table Fluctuation - WTF*) e da recarga profunda através de um balanço hídrico subterrâneo no ano de 2008, em quatro áreas de recarga de nascentes do Alto Rio Grande, sendo duas na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha e duas na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Poços de observação do aquífero não confinado

Nas nascentes L1, L5, M3 e M5 foram instalados poços para observação do aquífero não confinado próximo à seção controle. Foi feito o monitoramento dos níveis destes poços com frequência aproximadamente quinzenal, no período de fevereiro de 2008 a janeiro de 2009. Nestas áreas também foram ajustadas as curvas características de retenção de água no solo em quatro pontos no entorno dos poços de observação do aquífero não confinado.

Nas Figuras de 36 a 39 apresentam-se os mapas das áreas de recarga das nascentes com a distribuição dos poços de monitoramento do aquífero não confinado e dos pontos onde foram determinadas as curvas características de retenção de água no solo.

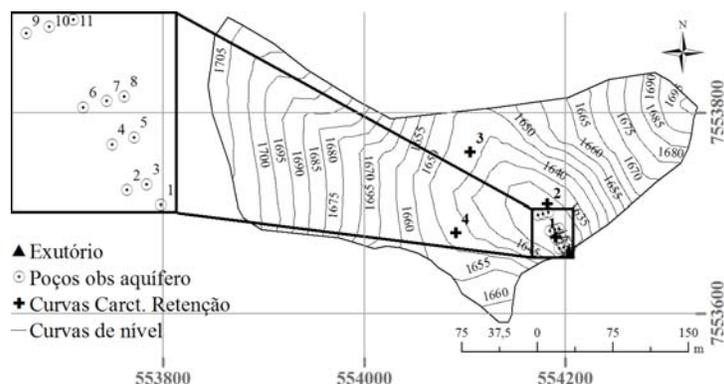


FIGURA 36 Mapa da nascente L1 com seus respectivos poços de observação do lençol freático e pontos onde foram determinadas as curva características de retenção de água no solo.

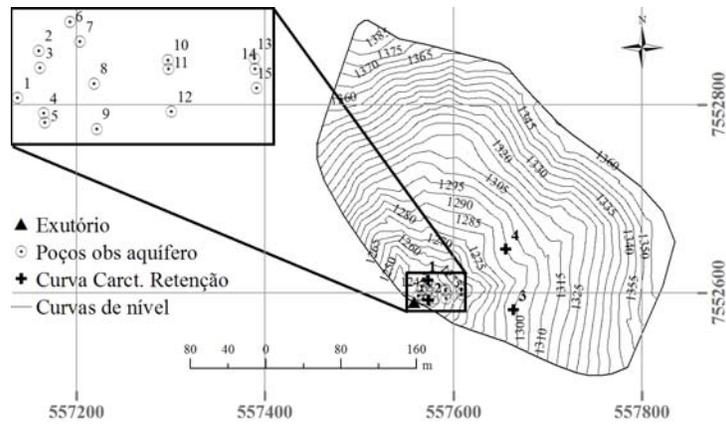


FIGURA 37 Mapa da nascente L5 com seus respectivos poços de observação do lençol freático e pontos onde foram determinadas as curva características de retenção de água no solo.

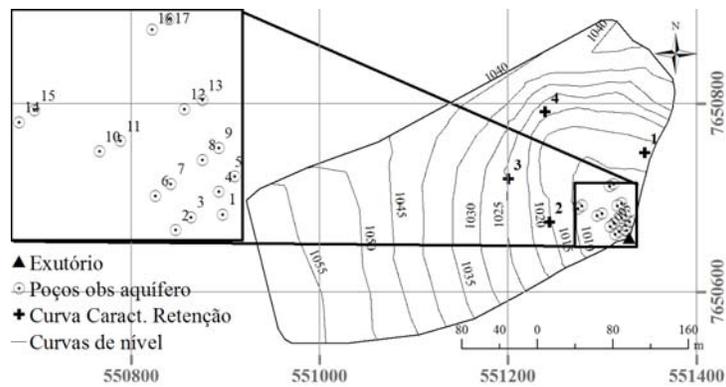


FIGURA 38 Mapa da nascente M3 com seus respectivos poços de observação do lençol freático e pontos onde foram determinadas as curva características de retenção de água no solo.

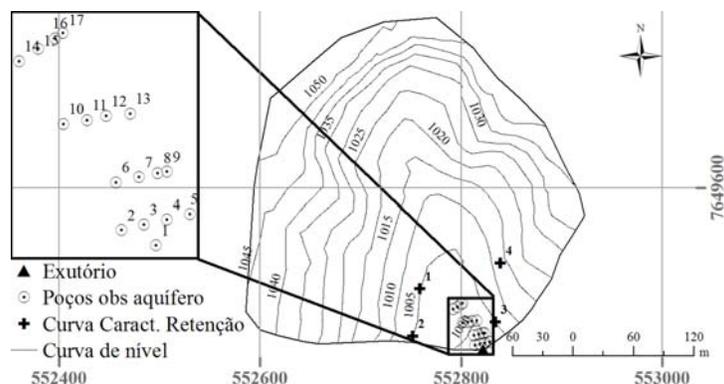


FIGURA 39 Mapa da nascente M5 com seus respectivos poços de observação do lençol freático e pontos onde foram determinadas as curva características de retenção de água no solo.

Na área de recarga da nascente L1 foram instalados 11 poços de observação do aquífero não confinado e na área de recarga da nascente L5 foram instalados 15 poços. Estas duas nascentes são pertencentes à sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha, localizada na cidade de Bocaina de Minas-MG. Já nas áreas de recarga das nascentes M3 e M5 foram instalados 17 poços de observação do aquífero não confinado em cada uma, sendo que essas áreas de recarga pertencem à sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, localizada na cidade de Nazareno-MG.

A instalação destes poços em cada área de recarga de nascente foi feita no período de seca (outubro de 2007) e a distribuição dos poços foi feita conforme a topografia de cada área, buscando sempre locais representativos em que estes não viessem a secar no período de monitoramento. Uma restrição ocorrida na instalação dos poços foi com relação à profundidade deste, já que o equipamento utilizado foi um trado tipo holandês com comprimento máximo de quatro metros.

Com relação às curvas de retenção de água no solo, estas foram determinadas a três profundidades (20, 50 e 100 cm) conforme o modelo de Mualem-van Genuchten (Genuchten, 1980), sendo a escolha dos locais realizada

para representar, ao máximo, toda área de recarga, e também levando em consideração a acessibilidade local.

O monitoramento do nível da água superficial do aquífero foi feito com frequência aproximadamente quinzenal, no período de fevereiro de 2008 a janeiro de 2009, sendo que a profundidade do nível aquífero não confinado em cada poço, em cada área de recarga, foi primeiramente convertida em altitude, subtraindo a cota topográfica de referência para a medição da profundidade do nível do aquífero em cada poço pela profundidade do nível do aquífero em cada poço. Posteriormente estes dados de altitude foram espacializados através do SIG ArcGIS® version 9.2, de forma individualizada (uma layer para cada área de recarga), gerando, assim, o modelo de superfície do nível do aquífero para a região monitorada, para cada monitoramento realizado. Com o modelo da superfície do nível do aquífero foram gerados mapas de classes altimétricas do nível do aquífero com intervalos de 50 cm e calculadas as áreas de cada classe. Assim, a partir da Equação 01, obteve-se a altitude média do aquífero para cada intervalo de monitoramento:

$$A_M = \frac{\sum_{i=1}^n (e_i \cdot a_i)}{\sum a_i} \quad (01)$$

em que A_M é a altitude média; e_i é a altitude média entre duas classes altimétricas consecutivas; a_i é a área de cada classe e A é a área da região monitorada.

Assim obtiveram-se as séries históricas das altitudes médias do aquífero não confinado em cada área de recarga no período de monitoramento, podendo ser visualizadas em anexo (Tabela 3B).

2.2 Recarga subterrânea direta

A recarga direta foi estimada através da análise da variação do nível do aquífero e pela identificação e extrapolação das curvas de recessão do nível do aquífero de forma gráfica, baseado no método WTF (Healy & Cook, 2002; Scanlon et al., 2002; Wahnfreid & Hirata, 2005). O método consiste em identificar os períodos de recessão e mudanças bruscas na declividade do nível do aquífero. A partir dos níveis do aquífero é possível determinar as variações do nível d'água subterrâneo (Δh) a serem consideradas no cálculo da recarga através da Equação 02:

$$R_d = S_y \cdot \frac{dh}{dt} = S_y \cdot \frac{\Delta h}{\Delta t} \quad (02)$$

em que R_d é a recarga (mm/ano), S_y é o rendimento específico; h é o nível freático (mm), e t é o tempo (ano).

O valor de S_y pode ser obtido através da Equação 03:

$$S_y = n - S_r \quad (03)$$

em que n é a porosidade, e S_r é a retenção específica do solo. A retenção específica (S_r) expressa a quantidade de água que está retida como um filme na rocha após ser drenada pela gravidade.

A Equação 03 pode ser reescrita com os dados obtidos a partir da curva de retenção de água no solo (Paiva, 2006):

$$S_y = P - \theta_{cc} \quad (04)$$

em que P é a porosidade do solo, e θ_{cc} é a capacidade de campo.

Uma formulação empírica para a avaliação do rendimento específico é a equação de Biecinski (Paiva, 2006), que relaciona o valor do rendimento específico do aquífero com o valor da condutividade hidráulica do solo através da seguinte expressão:

$$S_y = 0,117 \cdot \sqrt[3]{K} \quad (05)$$

em que K é a condutividade hidráulica do solo expressa em mm/dia.

O rendimento específico (S_y) foi estimado conforme as Equações 04 e 05, sendo que posteriormente foi feita uma avaliação de forma a obter o valor mais representativo para a área de estudos.

Foram determinados nas áreas L1, L5, M3 e M5, em quatro pontos, nas profundidades de 20, 50 e 100 cm as curvas características de retenção de água no solo de acordo com o modelo de Mualem-van Genuchten (Genuchten, 1980). Foram coletados em cada ponto e a cada profundidade amostras de solo indeformadas para determinação das respectivas curvas características, no Laboratório de Relação Água-Solo-Planta (DEG/UFLA). As equações das curvas estão em anexo (Tabela 4B).

Para a obtenção do rendimento específico do aquífero (S_y) conforme a Equação 04 foram determinadas, as capacidades de campo em cada curva característica de retenção de água no solo, sendo a capacidade de campo o ponto de inflexão na curva característica conforme modelo proposto por Dexter (2004):

$$\theta_{cc} = \theta_{res} + (\theta_s - \theta_{res}) \cdot \left[1 + \frac{1}{m} \right]^{-m} \quad (06)$$

em que θ_{res} é umidade residual, e m é um parâmetro de ajuste do modelo de Mualem-van Genuchten.

Assim obtido a umidade na capacidade de campo e calculado o rendimento específico (S_y) a partir da Equação 04 para cada ponto, a cada profundidade, para cada uma das áreas de recarga, foi feito uma média para representar rendimento específico (S_y) em cada uma destas áreas.

A obtenção do rendimento específico (S_y) conforme a Equação 05 foi feita a partir dos dados de condutividade hidráulica do solo saturado (mm/dia) na camada de 0-20 cm obtidos por Gomes (2005) e Junqueira Júnior (2006) para toda a sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha e Ribeirão Marcela, respectivamente. Utilizou-se de técnicas geoestatísticas aplicando-se krigagem

por simulação, denominada por Journel & Huijbregts (1978) e Ávila (2008) como simulação de blocos condicionada aos pontos amostrados, obtendo-se a média espacial e o desvio padrão da condutividade hidráulica em cada área de recarga, e conseqüentemente feita a estimativa do rendimento específico (S_y). Dessa forma, para cada área de recarga das nascentes, realizou-se 5000 simulações, utilizando o software R (R Development Core Team, 2006), com o pacote geoR (Ribeiro Júnior & Diggle, 2001; Mello, 2004).

Com as informações de condutividade hidráulica para as duas sub-bacias estudadas fez-se a análise exploratória dos dados e posteriormente ajustou-se os modelos exponencial, esférico e gaussiano, pelo método da máxima verossimilhança e mínimos quadrados ponderados, testando sua aderência pelo grau de dependência espacial e validação cruzada, ambos segundo Mello et al. (2008). Uma revisão ampla destes métodos pode ser verificada em Ávila (2008). Em anexo (Tabela 5A) podem-se observar os ajustes obtidos para cada modelo, o grau de dependência espacial, os erros da validação cruzada e em negrito o modelo utilizado.

Após a obtenção do rendimento específico (S_y), a Equação 02 pode ser aplicada para cada elevação individual do nível d'água, determinando uma estimativa da recarga total, onde Δh é igual à diferença entre o pico de subida e o ponto mais baixo da curva de recessão antecedente extrapolada até o instante do pico (Healy & Cook, 2002). A curva de recessão antecedente é o traço que o nível do poço de monitoramento teria seguido na ausência de elevação do nível d'água. Essa manipulação é subjetiva e tenta acomodar a função de defasagem entre o início da precipitação e conseqüente início do processo de recarga, resultante do processo natural de descarga (Maziero & Wendland, 2005).

2.3 Recarga profunda

O método proposto para estimativa da recarga profunda assume o volume de controle do balanço hídrico como sendo a região saturada do solo da área de recarga da nascente (Figura 40). A entrada no sistema será dada pela recarga direta, R_d , estimada pelo método WTF. A variação do armazenamento subterrâneo (ΔS) será obtida da variação do nível do aquífero a partir de medições nos poços de monitoramento. As saídas do sistema são o escoamento de base (q_b) e a recarga profunda (R_p). A recarga profunda será o resíduo da equação abaixo:

$$R_p = R_d - q_b + \Delta S \quad (07)$$

em que q_b corresponde ao deflúvio para cada uma das áreas de recarga das nascentes. A Equação 07 não considera a evaporação da água subterrânea e o bombeamento. A evaporação da água subterrânea é suposta ser insignificante, e como não há poços explorando a água subterrânea na área de estudo, a taxa de bombeamento é zero.

A estimativa da variação do armazenamento subterrâneo (ΔS) se dá a partir dos dados dos níveis nos poços de monitoramento e da estimativa do rendimento específico do aquífero (S_y), expresso pela Equação 08 (Wendland et al., 2007):

$$\Delta S = (h_f - h_i) \cdot S_y \quad (08)$$

em que h_f e h_i correspondem respectivamente à variação do nível do aquífero entre o primeiro e o último dia de monitoramento.

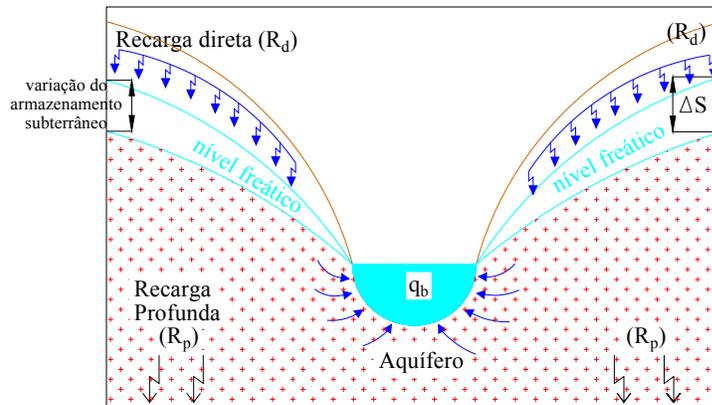


FIGURA 40 Volume de controle conceitual para o balanço hídrico subterrâneo (Wendland et al., 2007).

A grande vantagem do método do balanço hídrico reside no fato de que o mesmo usa, em geral, dados disponíveis (escoamento, níveis de água, etc.). Contudo, a principal limitação consiste no fato que a avaliação da recarga depende da precisão dos outros componentes medidos e estimados da equação.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Variações do nível d'água subterrâneo

Através dos gráficos representativos do nível médio do aquífero em cada área de recarga de nascente, foram feitas as identificações e extrapolações das curvas de recessão do nível do aquífero, determinando e quantificando as variações do nível médio do aquífero através da diferença entre o pico de subida e o ponto mais baixo da curva de recessão antecedente extrapolada até o instante do pico. As Figuras 41, 42, 43 e 44 mostram a determinação gráfica de tais variações. A curva de recessão mostrada na cor magenta é o traço que o nível do poço de observação teria seguido na ausência de elevação do nível do aquífero (recarga).

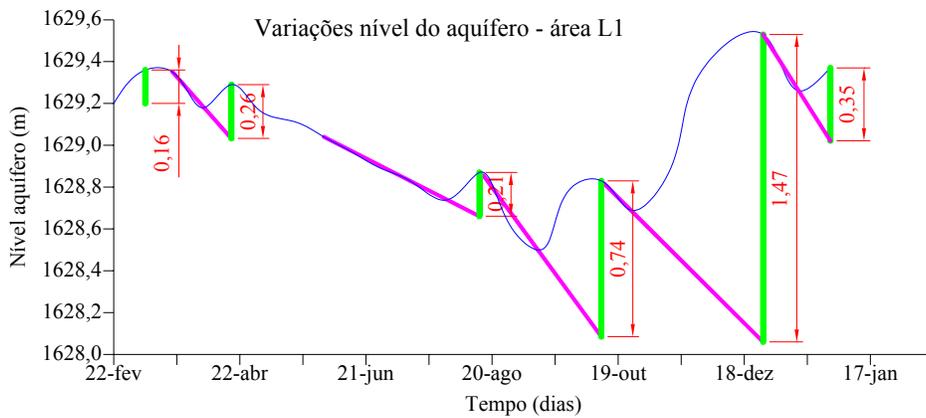


FIGURA 41 Gráfico representativo do nível médio do aquífero da área L1, mostrando as medidas das variações no nível d'água (Δh) em relação às curvas de recessão.

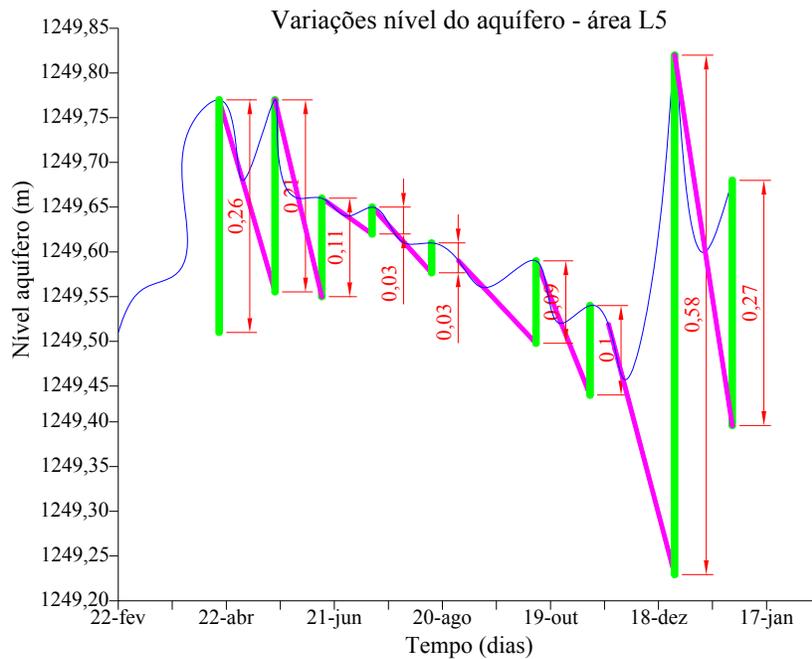


FIGURA 42 Gráfico representativo do nível médio do aquífero da área L5, mostram as medidas das variações no nível d'água (Δh) em relação às curvas de recessão.

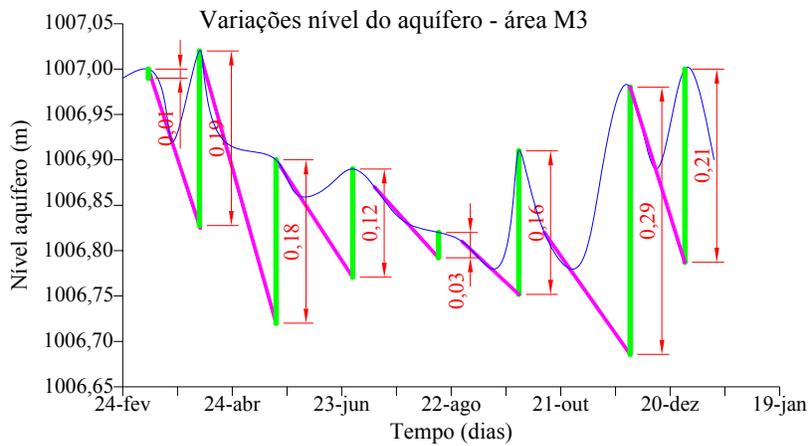


FIGURA 43 Gráfico representativo do nível médio do aquífero da área M3, mostrando as medidas das variações no nível d'água (Δh) em relação às curvas de recessão.

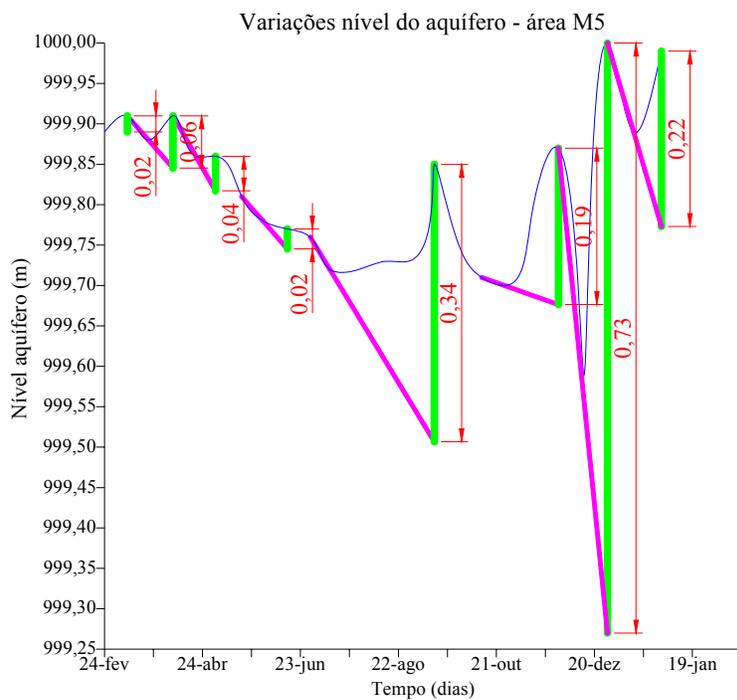


FIGURA 44 Gráfico representativo do nível médio do aquífero da área M5, mostrando as medidas das variações no nível d'água (Δh) em relação às curvas de recessão.

A Tabela 8 apresenta os valores do somatório das variações médias dos níveis dos aquíferos ocorridas nas quatro áreas de recarga de nascentes no ano de 2008.

TABELA 8 Valores das variações médias dos níveis dos aquíferos.

Área	L1	L5	M3	M5
Δh (mm)	3190	1680	1190	1620

Através da Tabela 8 que apresenta o somatório de cada variação do nível do aquífero observa-se que na área de recarga L1 onde o uso e ocupação do solo são compostos em sua maioria por pastagem e a declividade média do terreno é de 28,7% ocorreu uma variação do nível do aquífero de 3190 mm. Na área de recarga L5 onde o uso e ocupação do solo são compostos em sua maioria por pastagem e samambaia silvestre com declividade média do terreno de 54,2% ocorreu uma variação do nível do aquífero de 1680 mm. Já na área de recarga M3 onde o uso e ocupação do solo são compostos em sua maioria por pastagem e milho com declividade média do terreno de 17,0% ocorreu uma variação do nível do aquífero de 1190 mm. Na área de recarga M5 onde o uso e ocupação do solo são compostos em sua maioria por mata e pastagem tendo a declividade média do terreno de 25,4% ocorreu uma variação do nível do aquífero de 1620 mm.

Verifica-se assim que na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha o somatório das variações de nível do aquífero ao longo do período monitorado foi maior na área de recarga L1 onde a cobertura vegetal é em sua maioria pastagem e possui declividade média de 28,7%. Já na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela o somatório das variações de nível do aquífero ao longo do período monitorado foi maior na área de recarga M5 onde a cobertura vegetal é composta por mata e pastagem e possui declividade média de 25,4%. Observa-se assim que na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha o maior somatório das

variações de nível do aquífero ao longo do período monitorado ocorreu na área com menor declividade média, já na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela o maior somatório das variações de nível do aquífero ao longo do período monitorado ocorreu na área com maior declividade média. Uma justificativa deste fato pode ser devida os poços estarem localizados em uma área com pequena camada de zona saturada, onde pode ocasionar uma rápida elevação do nível freático em resposta aos eventos de chuva. Segundo (Wendland et al., 2007) poços com uma espessura da zona saturada maior têm um retardo na ascensão do nível de água, quando comparados com poços onde a zona não saturada é menor.

O nível médio dos aquíferos apresentou grande variação em suas medidas ao longo do ano de 2008. Observa-se através das Figuras 41, 42, 43 e 44 que ocorreram muitos períodos ao longo do ano em que houve contribuição da precipitação para a recarga do aquífero, sendo que o esperado seria uma situação em que o aquífero entrasse em depleção após o término da estação chuvosa a partir do mês de março e que, esta depleção se estendesse até o fim do período seco e início do período das chuvas, no mês de outubro, caracterizando assim o início do período mais propício à recarga dos aquíferos.

No intuito de verificar a ocorrência das precipitações conjuntamente com as variações médias dos aquíferos é apresentado na Figura 45 quatro gráficos contendo estas informações.

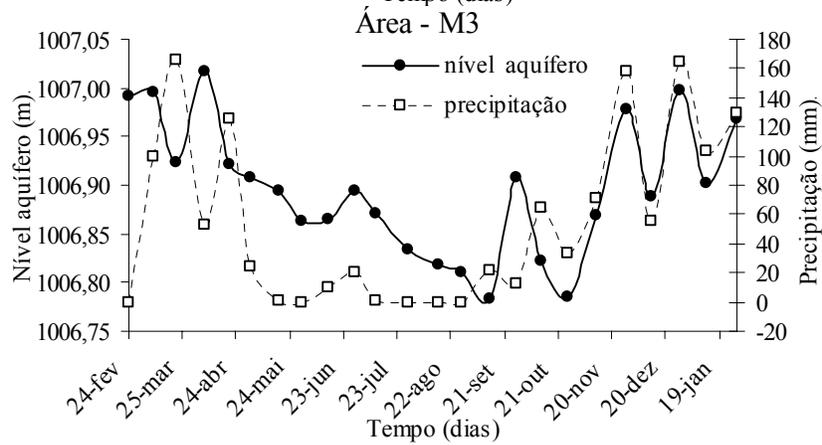
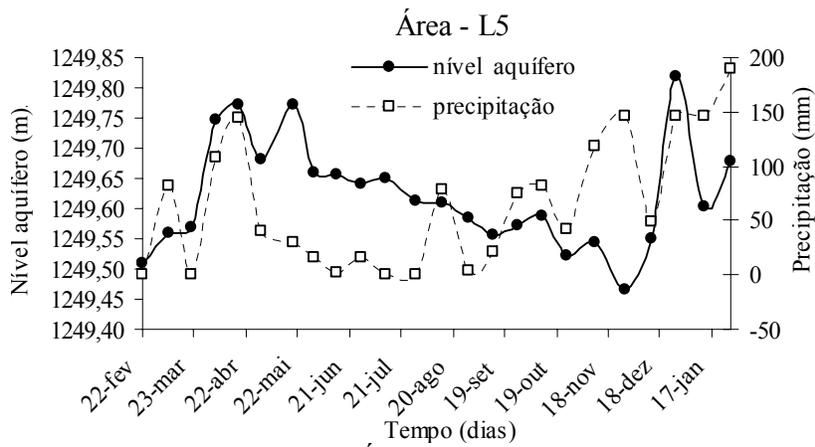
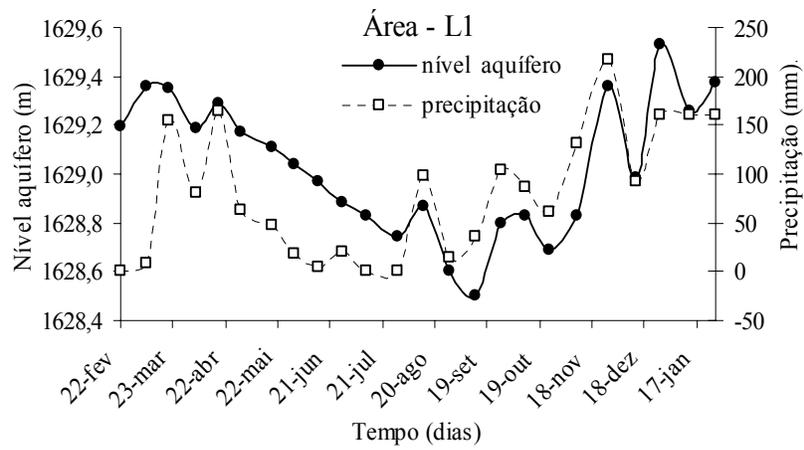


FIGURA 45 ...Cont...

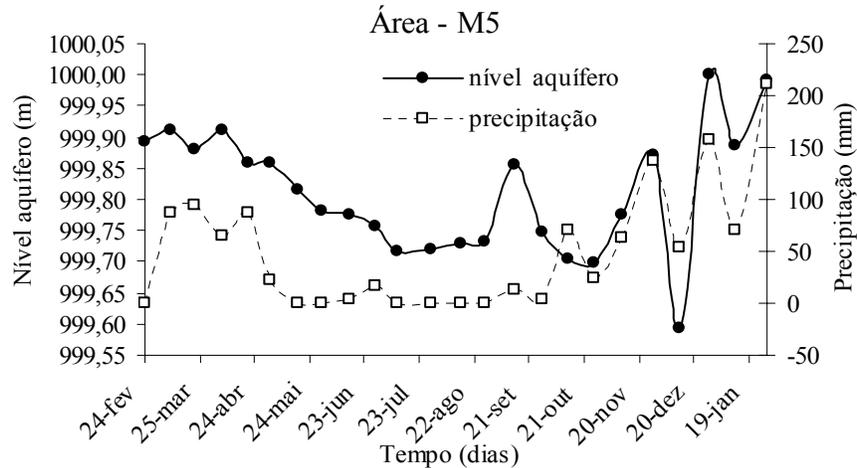


FIGURA 45 Comportamento temporal da precipitação e do nível médio do aquífero em quatro áreas de recargas de nascente.

Com base na Figura 45 observa-se que as alterações ocorridas na precipitação são correspondidas com variações nos níveis dos aquíferos, mas estes níveis apresentaram uma ligeira defasagem na resposta à precipitação. Este fato é indicativo que a recarga do aquífero pode ocorrer em um período posterior as precipitações, devido ao tempo de resposta/oportunidade da água no solo. Gee et al. (1994) e Prych (1998), relataram em seus estudos que a resposta dos aquíferos à precipitação é maior em áreas de cultura anual e pastagens e com relevo mais suave.

3.2 Estimativa do rendimento específico

Os rendimentos específicos médios estimados a partir das curvas de retenção de água no solo para cada área de recarga podem ser observados através da Tabela 9:

TABELA 9 Valores médios de rendimento específico obtido a partir da curva característica de retenção de água no solo.

Área	\bar{S}_y	Σ	CV
L1	0,107	0,027	25,07
L5	0,109	0,019	17,46
M3	0,125	0,019	15,33
M5	0,086	0,016	18,18

Em anexo (Tabela 4B) pode-se verificar uma tabela onde constam os dados provenientes das curvas características de retenção de água no solo para a obtenção do rendimento específico.

Já os rendimentos específicos estimados através da equação de Biecinski (Paiva, 2006), são apresentados na Tabela 10:

TABELA 10 Rendimentos específicos obtidos a partir da equação de Biecinski.

Área	K_0 (mm/dia)	σ	CV	S_y
L1	0,6235	0,9108	146,08	0,109
L5	1,3133	0,8765	66,74	0,122
M3	0,6105	0,2848	46,65	0,109
M5	0,6433	0,3027	47,05	0,110

Observa-se através das Tabelas 9 e 10 que os rendimentos específicos calculados através da curva característica de retenção de água no solo e da equação de Biecinski apresentaram muito pouca diferença entre si e também entre sub-bacias hidrográficas, porém verifica-se que os rendimentos específicos calculados através equação de Biecinski apresentaram alta variabilidade.

Em função da alta variabilidade dos rendimentos específicos obtidos através da equação de Biecinski, estando estes representados pelo desvio padrão e coeficiente de variação, e também em função dos rendimentos específicos

obtidos através das curvas de retenção de água no solo ser menos empírico, optou-se por utilizar estes na estimativa da recarga direta.

3.3 Estimativa da recarga direta

A recarga direta estimada através da análise da variação do nível do aquífero e extrapolação das curvas de recessão do nível do aquífero, baseado no método WTF para o ano de 2008 está apresentada na Tabela 11.

TABELA 11 Recarga direta para o ano de 2008.

Área	L1	L5	M3	M5
R_d (mm/ano)	341,6	183,8	148,3	139,2
% Precipitação	18,11	11,99	11,32	11,79

Verifica-se que a recarga direta ocorreu de forma mais intensa nas áreas L1 e L5 correspondendo a 18,11 e 11,99% da precipitação respectivamente, estando estas áreas de recarga de nascentes localizadas na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha. Nas áreas de recarga das nascentes monitoradas na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela a recarga direta foi estimada em 148, e 139,2 mm/ano, correspondendo respectivamente a 11,32 e 11,79% da precipitação para as áreas M3 e M5.

Na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha a maior recarga ocorreu na área em que possuía menor declividade média, sendo que o mesmo aconteceu na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela. Nestas áreas o uso e ocupação do solo predominante é a pastagem.

3.4 Avaliação da variação do armazenamento subterrâneo

A variação do armazenamento subterrâneo de água em um aquífero é igual à variação de água que ocorre quando o nível do aquífero muda de posição em relação ao nível anterior. A avaliação da variação do armazenamento

subterrâneo foi feita a partir dos dados dos níveis nos poços de monitoramento e da estimativa do coeficiente de rendimento específico do aquífero, para o ano de 2008. Na Tabela 12 são apresentados seus valores para cada área de recarga.

TABELA 12 Variação do armazenamento subterrâneo no ano de 2008.

Área	L1	L5	M3	M5
$h_f - h_i$ (mm)	178,4	169,3	-24,3	96,6
ΔS (mm)	19,1	18,5	-3,0	8,3

O resultado obtido para a variação do armazenamento subterrâneo anual foi de 19,1 e 18,5 (mm) para as áreas de recarga de nascente L1 e L5 na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha e de -3,0 e 8,3 (mm) para as áreas de recarga de nascente M3 e M5 na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela. Esse valor representa que, em média, a variação do volume de água no aquífero, entre o período de 22/02/2008 a 28/01/2009 nas áreas L1 e L5 foi positiva em 19,1 e 18,5 (mm) respectivamente para cada área de recarga. Já nas áreas M3 e M5 a variação do volume de água no aquífero, entre o período de 24/02/2008 a 29/01/2009 foi deficitária em -3,0 na área M3 e positiva em 8,3 mm na área M5, em lâmina de água equivalente.

3.5 Estimativa da recarga profunda

A estimativa da recarga profunda foi feita através de um balanço hídrico subterrâneo, assumindo a recarga direta estimada pelo método WTF como sendo a entrada de água no sistema e o deflúvio anual das nascentes como sendo a saída de água no sistema. O deflúvio anual das nascentes foi obtido no capítulo dois deste trabalho. A seguir na Tabela 13 apresentam-se os componentes envolvidos no balanço hídrico subterrâneo e o seu saldo, para o ano de 2008.

TABELA 13 Balanço hídrico subterrâneo (mm) para o ano de 2008.

Componentes do ciclo	Área			
	L1	L5	M3	M5
Recarga Direta (R_d) (mm)	341,6	183,8	148,3	139,2
ΔS (mm)	19,1	18,5	-3,0	8,3
Deflúvio anual (mm)	349,2	231,1	165,8	183,4
Recarga Profunda (R_p) (mm)	11,5	-28,7	-20,5	-35,9

Observa-se na Tabela 13 que o valor do deflúvio anual é superior à recarga direta. Esta situação estaria indicando uma situação de que o aquífero estaria drenando uma quantidade de água superior que a recarga, sendo assim uma situação não sustentável. Isto pode indicar uma situação de exploração do aquífero, porém no local não existe poços para exploração de água subterrânea. Outra justificativa para esta situação seria a possibilidade de superestimação do deflúvio, pois para uma correta avaliação deste parâmetro seria necessária a instalação de um linígrafo acoplado ao medidor de vazão (WSC Flume) para que o monitoramento fosse feito de forma contínua por todo período monitorado e assim, posteriormente, feita a separação do escoamento base do superficial direto.

Nas áreas de recarga de nascente monitoradas na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha a recarga profunda (aquela que pode efetivamente recarregar o aquífero) foi estimada em 11,5 e -28,7 (mm) respectivamente nas áreas L1 e L5. Já nas áreas de recarga de nascente monitoradas na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela a recarga profunda foi estimada em -20,5 e -35,9 (mm).

O valor negativo da recarga profunda pode não ter sentido físico, já que as nascentes estão localizadas numa região de altitude elevada e o fluxo ascendente das regiões mais profundas para a bacia é improvável, além de existirem incoerências entre os valores de recarga direta e o deflúvio anual das

nascentes. Isto implica que o rendimento específico deve ser maior que os valores estimados a partir da curva característica de retenção de água no solo, na Tabela 9.

Esse método mostra-se eficiente conforme os trabalhos já citados, porém existe um peso muito grande nas estimativas realizadas através da variação do nível do aquífero (variação do armazenamento subterrâneo e recarga direta e profunda), devido às incertezas que acompanham a estimativa do rendimento específico do aquífero.

Estes resultados vêm confirmar a necessidade de estudos de longa duração, uma vez que influências sazonais (ano excessivamente chuvoso ou seco) não podem ser descartadas, quando se trata de estudos de recarga dos aquíferos.

4 CONCLUSÕES

- a) A estimativa da recarga direta através do método WTF foi de 341,6; 183,8; 148,3; 139,2 (mm/ano) para as áreas L1, L5, M3 e M5.
- b) O deflúvio anual das nascentes ocorreu com um valor superior ao da recarga direta, indicando uma situação de exploração do aquífero, sendo assim uma situação não sustentável.
- c) A estimativa dos rendimentos específicos dos aquíferos pode estar subestimada.
- d) O monitoramento dos níveis dos aquíferos deve continuar por mais tempo no intuito de se obter resultados mais conclusivos.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ÁVILA, L. F. **Comportamento espacial e temporal da umidade do solo numa bacia hidrográfica na serra da Mantiqueira, Minas Gerais**. 2008. 110 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola, Engenharia de Água e Solo) – Universidade Federal de Lavras, Lavras.

BERTOL, G. A. **Avaliação da recarga anual no aquífero Bauru no município de Araguari, Minas Gerais**. 2007. 101 p. Dissertação (Mestrado em Geologia Econômica e Aplicada) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

DAVIDE, A. C.; PINTO, L. V. A.; MONNERAT, P. F.; BOTELHO, S. A. **Nascente**: o verdadeiro tesouro da propriedade rural: o que fazer para conservar as nascentes nas propriedades rurais. Lavras: UFLA/CEMIG, 2002. 20 p.

DEXTER, A. R. Soil physical quality part I: theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, Amsterdam, v. 120, n. 3/4, p. 201-214, June 2004.

FORMAGGIO, L. F. **Estudo da variabilidade da piezometria dos aquíferos freáticos na bacia do alto Rio Jardim - Distrito Federal**. 2007. 112 p. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade de Brasília, Brasília.

GEE, G. W.; WIERENGA, P. J.; ANDRASKI, B. J.; YOUNG, M. H.; FAYER, W. J.; ROCKHOLD, M. L. Variations in water balance and recharge potential at three western desert sites. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v. 58, n. 1, p. 63-71, Jan. 1994.

GENUCHTEN, M. T. van. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, n. 1, p. 892-898, May 1980.

GOMES, N. M. **Variabilidade espacial de atributos físico-hídricos do solo da sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela na Região do Alto Rio Grande, MG**. 2005. 124 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Universidade Federal de Lavras, Lavras.

HEALY, R. W.; COOK, P. G. Using groundwater levels to estimate recharge. **Hidrogeology Journal**, London, v. 10, n. 1, p. 91-109, Feb. 2002.

JOURNEL, A. G.; HUIJBREGTS, C. J. **Mining geostatistic**. London: Academic, 1978. 600 p.

JUNQUEIRA JÚNIOR, J. A. **Escoamento de nascentes associado à variabilidade espacial de atributos físicos e uso do solo em uma bacia hidrográfica de cabeceira do Rio Grande, MG**. 2006. 84 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Lavras, Lavras.

MAZIERO, T. A.; WENDLAND, E. Avaliação da recarga subterrânea de bacias urbanas no município de São Carlos, SP. In: SIMPÓSIO DE HIDROGEOLOGIA DO SUDESTE, 2.; ENCONTRO NACIONAL DE PERFURADORES DE POÇOS, 14., 2005, Ribeirão Preto. **Anais...** Ribeirão Preto: USP, 2005. 1 CD-ROM.

MELLO, C. R. de; VIOLA, M. R.; MELLO, J. M.; SILVA, A. M. Continuidade espacial de chuvas intensas no estado de Minas Gerais. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 2, p. 532-539, mar./abr. 2008.

MELLO, J. M. **Geoestatística aplicada ao inventário florestal**. 2004. 110 p. Tese (Doutorado em Silvicultura e Manejo Florestal) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

PAIVA, G. P. **Estimativa da recarga em uma unidade dentrítica de uma micro-bacia do Rio Piranga (MG)**. 2006. 129 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

PRYCH, E. A. Using chloride and chloorine-36 as soil-water tracers to estimate deep percolation at selected locations on the US Department of Energy Hanford Site, Washington. **US Geological Survey Water-Supply**, Denver, n. 2482, p. 1-67, 1998.

RIBEIRO JÚNIOR, P. J.; DIGGLE, P. P. GeoR: a package for geostatistical analysis. **R-News**, Rockester, v. 1, n. 2, p. 15-18, June 2001.

SCANLON, B. R.; HEALY, R. W.; COOK, P. G. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. **Hydrogeology Journal**, London, v. 10, n. 1, p. 18-39, Feb. 2002.

VALENTE, O. F.; GOMES, M. A. As nascentes e os rios. **Ação Ambiental**, Viçosa, MG, v. 4, n. 24, p. 11-13, mar./abr. 2003.

WAHNFRIED, I.; HIRATA, R. Comparação dos métodos de estimativa de recarga de aquíferos em uma planície aluvionar na bacia hidrográfica do Alto Tietê (São Paulo). **Revista Brasileira dos Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 10, n. 1, p. 15-25, jan./mar. 2005.

WENDLAND, E.; BARRETO, C.; GOMES, L. H. Water balance in the Guarani aquifer outcrop zone based on hydrogeologic monitoring. **Journal of Hydrology**, London, v. 342, n. 3/4, p. 261-269, Sept. 2007.

ANEXOS

ANEXO A		Página
GRÁFICO 1A	Curva Hipsométrica das áreas de recarga das nascentes – L1, L2, L3, L4 e L5.....	126
GRÁFICO 2A	Curva de Distribuição de Declividade das áreas de recarga das nascentes – L1, L2, L3, L4 e L5.....	126
GRÁFICO 3A	Curva Hipsométrica das áreas de recarga das nascentes – M1, M2, M3, M4 e M5.	127
GRÁFICO 4A	Curva de Distribuição de Declividade das áreas de recarga das nascentes – M1, M2, M3, M4 e M5.	127
ANEXO B		
TABELA 1B	Vazões das nascentes monitoradas na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha, no ano de 2008.	128
TABELA 2B	Vazões das nascentes monitoradas na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, no ano de 2008.....	129
TABELA 3B	Níveis do aquífero nas áreas de recarga de nascentes nas sub-bacias hidrográficas dos Ribeirões Lavrinha e Marcela, no ano de 2008.	130
TABELA 4B	Equações das curvas características de retenção de água no solo.	131
TABELA 5B	Parâmetros dos modelos de semivariograma (EP: efeito pepita; P: patamar; A: alcance; GD: grau de dependência espacial; EM: erro médio; ER: erro reduzido médio; SER: desvio padrão do erro reduzido) ajustados para a condutividade hidráulica do solo saturado nas sub-bacias hidrográfica dos Ribeirões Lavrinha e Marcela.....	134

GRÁFICO 1A Curvas Hipsométricas das áreas de recarga das nascentes – L1, L2, L3, L4 e L5.

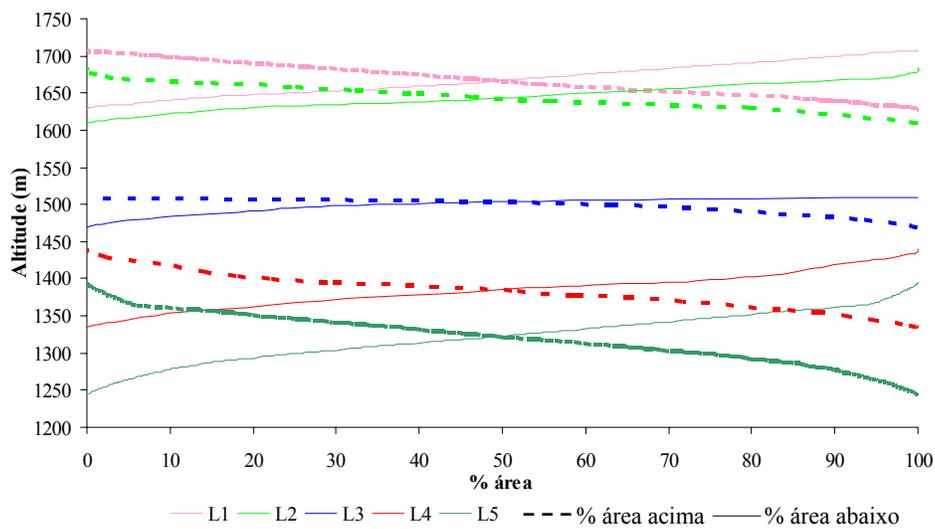


GRÁFICO 2A Curvas de Distribuição de Declividade das áreas de recarga das nascentes – L1, L2, L3, L4 e L5.

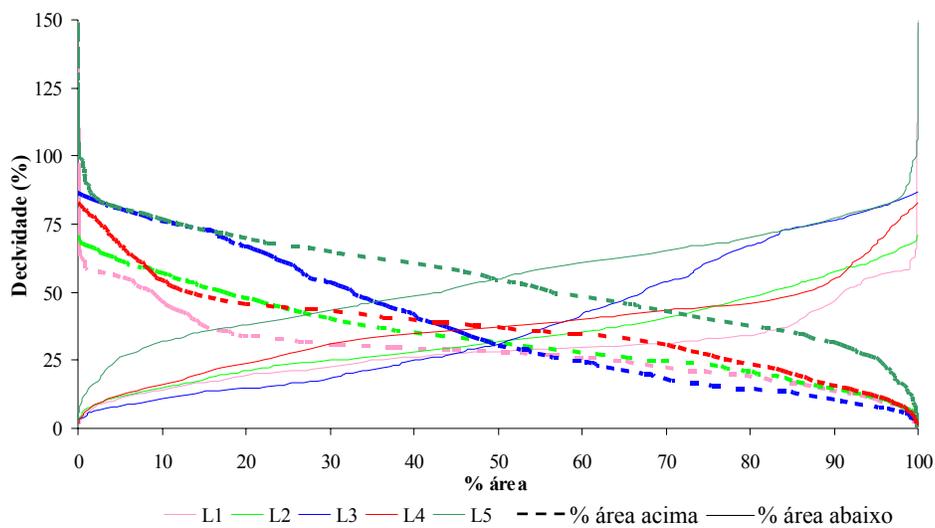


GRÁFICO 3A Curvas Hipsométricas das áreas de recarga das nascentes – M1, M2, M3, M4 e M5.

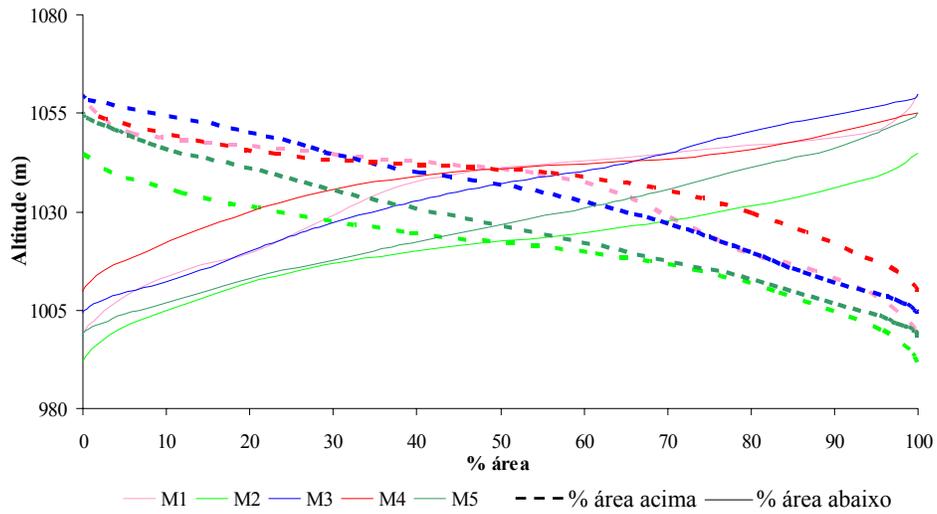


GRÁFICO 4A Curvas de Distribuição de Declividade das áreas de recarga das nascentes – M1, M2, M3, M4 e M5.

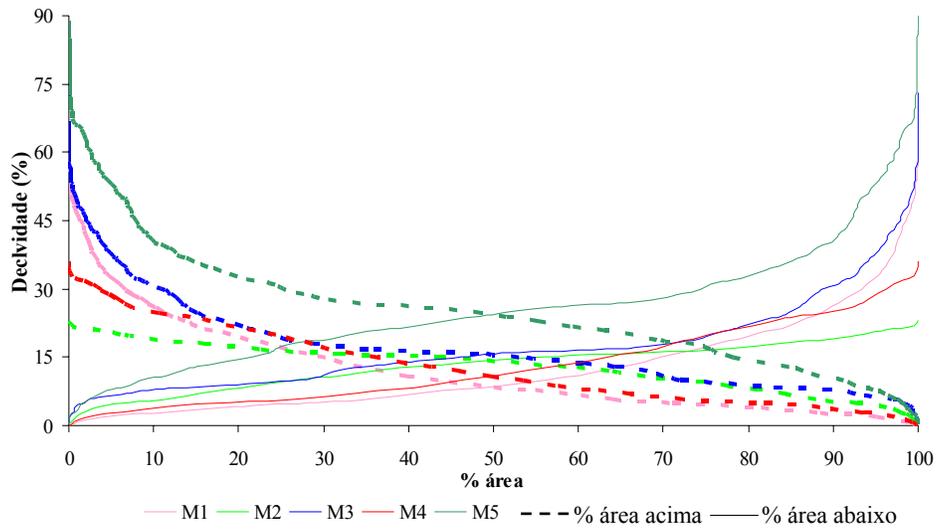


TABELA 1B Vazões das nascentes monitoradas na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha, no ano de 2008.

Data	L1	L5	Vazão (L·s ⁻¹)		
			L2	L3	L4
22/2/08	1,56	1,56			
8/3/08	1,98	0,93			
21/3/08	2,45	1,38			
5/4/08	1,84	1,22	0,92	0,101	3,34
18/4/08	2,04	1,30			
1/5/08	1,56	1,24	0,75	0,084	2,89
19/5/08	1,66	1,24			
1/6/08	1,76	1,14	0,61	0,053	2,30
14/6/08	1,53	0,99			
28/6/08	1,38	0,99	0,44	0,033	1,77
12/7/08	1,24	0,82			
30/7/08	1,11	0,65	0,43	0,017	1,36
14/8/08	1,08	0,72			
29/8/08	0,85	0,63	0,33	0,016	1,18
12/9/08	0,88	0,54			
27/9/08	0,82	0,52	0,28	0,012	0,86
11/10/08	0,85	0,50			
25/10/08	0,73	0,44	0,34	0,008	0,89
10/11/08	0,88	0,44			
28/11/08	2,00	0,75	1,98	0,125	0,56
13/12/08	1,41	0,54			
27/12/08	2,98	1,05	2,21	0,268	1,60
13/1/09	2,04	0,94			
28/1/09	2,98	1,14	1,76	0,154	3,86

TABELA 2B Vazões das nascentes monitoradas na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, no ano de 2008.

Data	M3	M5	Vazão (L·s ⁻¹)		
			M1	M2	M4
24/2/08	1,21	1,38			
9/3/08	0,88	1,98			
22/3/08	0,91	2,21			
6/4/08	1,12	2,04	2,78	0,69	0,32
20/4/08	0,65	1,19			
2/5/08	0,68	1,34	2,31	0,32	0,26
18/5/08	0,77	1,05			
31/5/08	1,08	0,99	1,88	0,24	0,31
15/6/08	0,90	0,80			
29/6/08	0,85	0,85	1,49	0,26	0,23
11/7/08	1,02	0,67			
29/7/08	0,75	0,72	1,60	0,14	0,21
15/8/08	0,77	0,41			
28/8/08	0,72	0,39	0,72	0,16	0,16
13/9/08	0,63	0,38			
28/9/08	0,56	0,38	0,75	0,04	0,20
12/10/08	0,72	0,36			
26/10/08	0,80	0,30	0,75	0,14	0,09
11/11/08	0,80	0,65			
28/11/08	1,06	1,21	2,16	0,41	0,28
12/12/08	0,70	1,05			
28/12/08	1,18	2,45	5,13	1,81	0,68
12/1/09	0,75	1,56			
29/1/09	1,06	2,98	3,86	2,45	1,49

TABELA 3B Níveis do aquífero nas áreas de recarga de nascentes nas sub-bacias hidrográficas dos Ribeirões Lavrinha e Marcela, no ano de 2008.

Data	L1 Altitude média do aquífero	L5 Altitude média do aquífero	Data	M3 Altitude média do aquífero	M5 Altitude média do aquífero
22/2/08	1629,20	1249,51	24/2/08	1006,99	999,89
8/3/08	1629,36	1249,56	9/3/08	1007,00	999,91
21/3/08	1629,35	1249,57	22/3/08	1006,92	999,88
5/4/08	1629,18	1249,75	6/4/08	1007,02	999,91
18/4/08	1629,29	1249,77	20/4/08	1006,92	999,86
1/5/08	1629,17	1249,68	2/5/08	1006,91	999,86
19/5/08	1629,11	1249,77	18/5/08	1006,90	999,81
1/6/08	1629,04	1249,66	31/5/08	1006,86	999,78
14/6/08	1628,97	1249,66	15/6/08	1006,87	999,77
28/6/08	1628,89	1249,64	29/6/08	1006,89	999,76
12/7/08	1628,83	1249,65	11/7/08	1006,87	999,72
30/7/08	1628,74	1249,61	29/7/08	1006,83	999,72
14/8/08	1628,87	1249,61	15/8/08	1006,82	999,73
29/8/08	1628,61	1249,59	28/8/08	1006,81	999,73
12/9/08	1628,50	1249,56	13/9/08	1006,78	999,85
27/9/08	1628,80	1249,57	28/9/08	1006,91	999,75
11/10/08	1628,83	1249,59	12/10/08	1006,82	999,71
25/10/08	1628,69	1249,52	26/10/08	1006,78	999,70
10/11/08	1628,83	1249,54	11/11/08	1006,87	999,78
28/11/08	1629,36	1249,46	28/11/08	1006,98	999,87
13/12/08	1628,98	1249,55	12/12/08	1006,89	999,59
27/12/08	1629,53	1249,82	28/12/08	1007,00	1000,00
13/1/09	1629,26	1249,60	12/1/09	1006,90	999,89
28/1/09	1629,37	1249,68	29/1/09	1006,97	999,99

TABELA 4B Equações das curvas características de retenção de água no solo.

Área L1			
Pto	Prof. (cm)	Equação	R ²
1	20	$\theta = 0,364 + (0,654 - 0,364) \cdot \left[1 + (0,841 \cdot \psi_m)^{1,551}\right]^{-0,355}$	0,991
	50	$\theta = 0,369 + (0,666 - 0,369) \cdot \left[1 + (1,698 \cdot \psi_m)^{1,253}\right]^{-0,202}$	0,958
	100	$\theta = 0,244 + (0,663 - 0,244) \cdot \left[1 + (0,780 \cdot \psi_m)^{3,135}\right]^{-0,092}$	0,974
2	20	$\theta = 0,288 + (0,557 - 0,288) \cdot \left[1 + (0,864 \cdot \psi_m)^{1,335}\right]^{-0,251}$	0,975
	50	$\theta = 0,293 + (0,563 - 0,293) \cdot \left[1 + (1,002 \cdot \psi_m)^{1,307}\right]^{-0,235}$	0,960
	100	$\theta = 0,340 + (0,517 - 0,340) \cdot \left[1 + (0,827 \cdot \psi_m)^{1,700}\right]^{-0,412}$	0,975
3	20	$\theta = 0,012 + (0,590 - 0,012) \cdot \left[1 + (0,666 \cdot \psi_m)^{1,413}\right]^{-0,292}$	0,975
	50	$\theta = 0,184 + (0,533 - 0,184) \cdot \left[1 + (0,792 \cdot \psi_m)^{1,432}\right]^{-0,301}$	0,973
	100	$\theta = 0,349 + (0,496 - 0,349) \cdot \left[1 + (0,553 \cdot \psi_m)^{2,186}\right]^{-0,542}$	0,988
4	20	$\theta = 0,133 + (0,506 - 0,133) \cdot \left[1 + (0,760 \cdot \psi_m)^{1,369}\right]^{-0,269}$	0,991
	50	$\theta = 0,131 + (0,467 - 0,131) \cdot \left[1 + (0,875 \cdot \psi_m)^{1,406}\right]^{-0,289}$	0,993
	100	$\theta = 0,118 + (0,388 - 0,118) \cdot \left[1 + (1,129 \cdot \psi_m)^{1,427}\right]^{-0,299}$	0,991
Área L5			
1	50	$\theta = 0,244 + (0,561 - 0,244) \cdot \left[1 + (0,737 \cdot \psi_m)^{1,160}\right]^{-0,138}$	0,954
	100	$\theta = 0,262 + (0,607 - 0,262) \cdot \left[1 + (4,378 \cdot \psi_m)^{1,146}\right]^{-0,127}$	0,975
2	50	$\theta = 0,208 + (0,486 - 0,208) \cdot \left[1 + (0,508 \cdot \psi_m)^{1,186}\right]^{-0,157}$	0,974
	100	$\theta = 0,235 + (0,613 - 0,235) \cdot \left[1 + (1,373 \cdot \psi_m)^{1,401}\right]^{-0,286}$	0,952
3	20	$\theta = 0,187 + (0,558 - 0,187) \cdot \left[1 + (1,903 \cdot \psi_m)^{1,493}\right]^{-0,330}$	0,994
	50	$\theta = 0,093 + (0,093 - 0,440) \cdot \left[1 + (1,368 \cdot \psi_m)^{1,420}\right]^{-0,296}$	0,993

TABELA 4B ...Cont...

	100	$\theta = 0,141 + (0,492 - 0,141) \cdot \left[1 + (1,044 \cdot \psi_m)^{1,421}\right]^{-0,296}$	0,995
4	20	$\theta = 0,196 + (0,478 - 0,196) \cdot \left[1 + (2,219 \cdot \psi_m)^{1,307}\right]^{-0,235}$	0,968
	50	$\theta = 0,242 + (0,554 - 0,242) \cdot \left[1 + (1,081 \cdot \psi_m)^{1,560}\right]^{-0,359}$	0,993
	100	$\theta = 0,192 + (0,543 - 0,192) \cdot \left[1 + (2,253 \cdot \psi_m)^{1,372}\right]^{-0,271}$	0,982
Área M3			
1	20	$\theta = 0,344 + (0,548 - 0,344) \cdot \left[1 + (0,429 \cdot \psi_m)^{1,676}\right]^{-0,403}$	0,990
	50	$\theta = 0,337 + (0,536 - 0,337) \cdot \left[1 + (1,905 \cdot \psi_m)^{1,403}\right]^{-0,287}$	0,979
	100	$\theta = 0,327 + (0,477 - 0,327) \cdot \left[1 + (1,179 \cdot \psi_m)^{1,387}\right]^{-0,279}$	0,988
2	20	$\theta = 0,233 + (0,570 - 0,233) \cdot \left[1 + (0,979 \cdot \psi_m)^{1,531}\right]^{-0,347}$	0,983
	50	$\theta = 0,212 + (0,627 - 0,212) \cdot \left[1 + (0,759 \cdot \psi_m)^{1,626}\right]^{-0,385}$	0,992
	100	$\theta = 0,210 + (0,648 - 0,210) \cdot \left[1 + (0,420 \cdot \psi_m)^{1,801}\right]^{-0,445}$	0,996
3	20	$\theta = 0,240 + (0,605 - 0,240) \cdot \left[1 + (1,220 \cdot \psi_m)^{1,383}\right]^{-0,277}$	0,974
	50	$\theta = 0,177 + (0,606 - 0,177) \cdot \left[1 + (0,418 \cdot \psi_m)^{1,518}\right]^{-0,341}$	0,985
	100	$\theta = 0,243 + (0,580 - 0,243) \cdot \left[1 + (1,293 \cdot \psi_m)^{1,493}\right]^{-0,330}$	0,985
4	20	$\theta = 0,261 + (0,551 - 0,261) \cdot \left[1 + (0,368 \cdot \psi_m)^{1,596}\right]^{-0,373}$	0,966
	50	$\theta = 0,173 + (0,569 - 0,173) \cdot \left[1 + (0,493 \cdot \psi_m)^{1,579}\right]^{-0,367}$	0,991
	100	$\theta = 0,191 + (0,612 - 0,191) \cdot \left[1 + (0,884 \cdot \psi_m)^{1,462}\right]^{-0,316}$	0,979
Área M5			
1	20	$\theta = 0,275 + (0,510 - 0,275) \cdot \left[1 + (1,079 \cdot \psi_m)^{1,352}\right]^{-0,260}$	0,952
	50	$\theta = 0,322 + (0,424 - 0,365) \cdot \left[1 + (0,365 \cdot \psi_m)^{2,097}\right]^{-0,523}$	0,977
	100	$\theta = 0,360 + (0,446 - 0,360) \cdot \left[1 + (0,175 \cdot \psi_m)^{1,603}\right]^{-0,376}$	0,966

TABELA 4B ...Cont...

2	20	$\theta = 0,394 + (0,539 - 0,394) \cdot \left[1 + (0,363 \cdot \psi_m)^{1,449}\right]^{-0,310}$	0,944
	50	$\theta = 0,346 + (0,554 - 0,346) \cdot \left[1 + (0,658 \cdot \psi_m)^{1,396}\right]^{-0,284}$	0,977
	100	$\theta = 0,329 + (0,552 - 0,329) \cdot \left[1 + (2,311 \cdot \psi_m)^{1,360}\right]^{-0,265}$	0,988
3	20	$\theta = 0,274 + (0,590 - 0,274) \cdot \left[1 + (0,255 \cdot \psi_m)^{1,309}\right]^{-0,236}$	0,946
	50	$\theta = 0,123 + (0,603 - 0,123) \cdot \left[1 + (0,969 \cdot \psi_m)^{1,299}\right]^{-0,230}$	0,975
	100	$\theta = 0,295 + (0,607 - 0,295) \cdot \left[1 + (0,429 \cdot \psi_m)^{1,286}\right]^{-0,223}$	0,953
4	20	$\theta = 0,388 + (0,551 - 0,388) \cdot \left[1 + (0,583 \cdot \psi_m)^{1,570}\right]^{-0,363}$	0,992
	50	$\theta = 0,132 + (0,497 - 0,132) \cdot \left[1 + (0,568 \cdot \psi_m)^{1,330}\right]^{-0,248}$	0,974
	100	$\theta = 0,115 + (0,452 - 0,115) \cdot \left[1 + (0,453 \cdot \psi_m)^{1,790}\right]^{-0,441}$	0,934

TABELA 5B Parâmetros dos modelos de semivariograma (EP: efeito pepita; P: patamar; A: alcance; GD: grau de dependência espacial; EM: erro médio; ER: erro reduzido médio; SER: desvio padrão do erro reduzido) ajustados para a condutividade hidráulica do solo saturado nas sub-bacias hidrográfica dos Ribeirões Lavrinha e Marcela.

Lavrinha								
Modelo	Método	EP	P	A	GD	EM	ER	SER
Exponencial	MV	0,5856	1,161	800	66,47%	295,07%	-0,0018	1,1195
Esférico	MV	0,7611	1,358	2400	64,08%	290,70%	-0,0019	1,1084
Gaussiano	MV	0,4218	1,057	569	71,48%	294,53%	0,0015	1,1207
Exponencial	MQP	0,8750	1,602	3344	64,68%	316,41%	-0,0032	1,1880
Esférico	MQP	0,4413	1,150	2401	72,27%	312,21%	-0,0024	1,1782
Gaussiano	MQP	0,4192	1,195	1387	74,03%	331,87%	-0,0010	1,2615
Marcela								
Modelo	Método	EP	P	A	GD	EM	ER	SER
Exponencial	MV	0,1872	0,278	26	59,77%	238,25%	-0,0239	3,0033
Esférico	MV	0,0135	0,278	436	95,37%	235,21%	-0,0124	3,4015
Gaussiano	MV	0,0105	0,278	207	96,36%	235,36%	-0,0121	3,5534
Exponencial	MQP	0,0974	0,305	200	75,77%	235,35%	-0,0310	1,9764
Esférico	MQP	0,0799	0,304	600	79,18%	230,74%	-0,0238	1,9584
Gaussiano	MQP	0,0452	0,310	600	87,27%	232,99%	-0,0120	2,3000