



ALISSON SOUZA DE OLIVEIRA

**DINÂMICA DO ESCOAMENTO EM
NASCENTES NA REGIÃO DO ALTO RIO
GRANDE, MG**

LAVRAS – MG

2011

ALISSON SOUZA DE OLIVEIRA

**DINÂMICA DO ESCOAMENTO EM 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 Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas, para a obtenção do título de Mestre.

Orientador
Dr. Antônio Marciano da Silva

LAVRAS - MG

2011

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

Oliveira, Alisson Souza de.

Dinâmica do escoamento em nascentes na região do Alto Rio Grande, MG / Alisson Souza de Oliveira. – Lavras : UFLA, 2011.
130 p. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2011.
Orientador: Antônio Marciano da Silva.
Bibliografia.

1. Bacia hidrográfica. 2. Vazão. 3. Recarga aquífero. 4. WTF. 5. Modelagem. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 551.49

ALISSON SOUZA DE OLIVEIRA

**DINÂMICA DO ESCOAMENTO EM 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 Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 25 de março de 2011.

Dr. Nilton Curi UFLA

Dr. Carlos Rogério de Mello UFLA

Dr. Gilberto Coelho UFLA

Dr. Antônio Marciano da Silva
Orientador

LAVRAS -MG

2011

A minha querida esposa, Raquel, pela paciência, amizade, dedicação e
companheirismo nos momentos de dificuldade;
As minhas irmãs Márcia e Patrícia, pelo apoio e incentivo;
E aos meus pais, Lêige (*in memória*) e Álvaro, pelo amor, carinho e dedicação
dispensados em toda a minha vida!

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus pelas provações, lutas e principalmente pelas vitórias. Por mostrar que sempre está presente em minha vida.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA), em especial ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas, pela oportunidade de realização do curso.

À CAPES, pela concessão de bolsas e a CEMIG/ANEEL, pelos recursos disponibilizados por meio do projeto P&D 076 e 176.

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

Aos amigos, pelo companheirismo e amizade, em especial ao Geovane que contribuiu grandemente para a realização deste trabalho.

Aos professores Carlos Rogério de Mello e Gilberto Coelho, pela co-orientação e colaboração para realização deste trabalho.

Ao professor Nilton Curi, do Departamento de Solos da UFLA, pela participação na banca contribuindo com sugestões valiosas para este trabalho.

Enfim, a todos os meus familiares que de alguma forma colaboraram para que este trabalho fosse realizado.

Muito obrigado!

RESUMO GERAL

Nascentes são pontos nos quais a água subterrânea aflora naturalmente através da superfície do solo, mesmo que de forma intermitente. O monitoramento da vazão de uma nascente é importante para se conhecer e quantificar a disponibilidade de água como também relacionar a variação da vazão em diferentes épocas do ano. Desta maneira, visando caracterizar as áreas de recarga das nascentes e compreender o comportamento sazonal de suas vazões, procedeu-se à modelagem hidrológica das vazões, tendo-se como suporte o monitoramento de vazões de oito nascentes das bacias dos Ribeirões Lavrinha e Marcela (4 em cada bacia), as características morfométricas das áreas de recarga e mapas de uso atual dos solos. As vazões foram monitoradas no período de outubro de 2009 a outubro de 2010, com periodicidade aproximadamente quinzenal, com a utilização de um medidor WSC flume e modeladas através da Fórmula de Maillet. Foi realizada uma estimativa da recarga direta pelo método da flutuação das superfícies livres (*Water Table Fluctuation* - WTF) através do monitoramento do nível do aquífero em poços de observação perfurados nas áreas de recarga L1, pertencente à bacia do Ribeirão Lavrinha e duas áreas de recarga na bacia do Ribeirão Marcela, M1 e M5. Também foi realizado um balanço hídrico simplificado na zona não saturada para as mesmas áreas de recarga citadas. O método WTF utiliza dados de monitoramento do nível do aquífero e a porosidade drenável do aquífero para determinação da recarga direta. Verificou-se relação entre uso atual do solo, declividade e unidades pedológicas na manutenção do fluxo d'água ao longo do ano (α), rendimento específico médio mensal e o deflúvio anual das nascentes. As estimativas de recarga foram de 456,9, 214,8 e 264,7 mm/ano, nas áreas de recarga L1, M1 e M5, respectivamente. O balanço hídrico realizado na zona não saturada do solo apresentou um saldo de 1082,65, 750,78 e 686,43 mm/ano, respectivamente para as áreas de recarga L1, M1 e M5. Estes valores são suficientes para suprir às possíveis deficiências naturais de umidade na zona não saturada do perfil e para promover a recarga do aquífero.

Palavras-chave: Bacia hidrográfica. Vazão. Recarga aquífer.

GENERAL ABSTRACT

Sources are points where groundwater emerges naturally through the soil surface, even if intermittently. Monitoring the flow of a source is important to understand and quantify the availability of water, but also to relate the variation of flow in different seasons. Thus, characterizing the recharge areas of sources and understanding the seasonal behavior of their flow, we proceeded to the hydrologic modeling of the flow, having as support the flow monitoring of eight sources in the basin of Lavrinha and Marcela Streams (4 in each basin), the morphometric characteristics of recharge areas and maps of current land use. The flow rates were monitored from October 2009 to October 2010, with approximately fortnightly intervals, using a meter WSC flume and modeled by the Maillet formula. We performed an estimation of direct recharge by the flotation method of free surface (*Water Table Fluctuation* - WTF) by monitoring the level of the aquifer in observation wells drilled in recharge areas L1, which belongs to the basin of Lavrinha Stream and two recharge areas in the basin of Marcela Stream, M1 and M5. It was performed a simplified water balance in the unsaturated zone to the same recharge areas mentioned. The WTF method uses data to monitor the level of the aquifer and the drainable porosity of the aquifer to determine the direct recharge. It was verified the relation between current use of soil, slope and soil units in maintaining the flow of water throughout the year (α), specific yield and monthly average annual runoff sources. The recharge estimates were 456.9, 214.8 and 264.7 mm / year in the recharge areas L1, M1 and M5, respectively. The water balance in the unsaturated zone soil had a balance of 1082.6, 750.8 and 686.4 mm / year respectively for the recharge areas L1, M1 and M5. These values are sufficient to meet the possible shortcomings of natural moisture in the unsaturated zone of the profile and promote aquifer recharge.

Keywords: Watershed. Flow. Aquifer recharge.

LISTA DE FIGURAS

CAPITULO 1

Figura 1	Componentes do ciclo hidrológico para o balanço hídrico.....	28
Figura 2	Extrapolação da curva de recessão do nível d'água para estimativa da recarga total.....	31
Figura 3	Mapa de situação das bacias hidrográficas estudadas.....	35
Figura 4	Distribuição espacial das unidades pedológica na bacia do ribeirão Lavrinha.....	37
Figura 5	Mapa de classes de declividade da bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha e distribuição percentual dessas classes em relação à área da bacia hidrográfica.....	39
Figura 6	Distribuição dos solos na bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela.....	42
Figura 7	Mapa de classes de declividade da bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela e distribuição percentual dessas classes em relação à área da bacia hidrográfica.....	43

CAPITULO 2

Figura 1	Mapa de uso atual do solo da área de recarga da nascente L1...	58
Figura 2	Mapa de uso atual do solo da área de recarga da nascente L2...	58
Figura 3	Mapa de uso atual do solo da área de recarga da nascente L3...	59
Figura 4	Mapa de uso atual do solo da área de recarga da nascente L4...	60
Figura 5	Mapa de classes de declividade da área de recarga da nascente L1.....	62
Figura 6	Mapa de classes de declividade da área de recarga da nascente L2.....	62
Figura 7	Mapa de classes de declividade da área de recarga da nascente L3.....	63
Figura 8	Mapa de classes de declividade da área de recarga da nascente L4.....	63
Figura 9	Mapa de uso atual do solo da área de recarga da nascente M1..	64
Figura 10	Mapa de uso atual do solo da área de recarga da nascente M2..	65
Figura 11	Mapa de uso atual do solo da área de recarga da nascente M4..	66
Figura 12	Mapa de uso atual do solo da área de recarga da nascente M5..	67
Figura 13	Mapa de classes de declividade da área de recarga da nascente M1.....	68
Figura 14	Mapa de classes de declividade da área de recarga da nascente M2.....	68
Figura 15	Mapa de classes de declividade da área de recarga da nascente M4.....	69

Figura 16	Mapa de classes de declividade da área de recarga da nascente M5.....	69
CAPITULO 3		
Figura 1	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.....	101
Figura 2	Mapa da nascente M1 com seus respectivos poços de observação do lençol freático e pontos onde foram determinadas as curva características de retenção de água no solo.....	102
Figura 3	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.....	102
Figura 4	Volume de controle conceitual para o balanço hídrico subterrâneo.....	107

LISTA DE GRÁFICOS

CAPITULO 2

Gráfico 1	Hidrógrafas de depleção das vazões das nascentes monitoradas na bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha no período de 20/03/10 à 11/09/10.....	73
Gráfico 2	Rendimento específico apresentado pelas nascentes monitoradas na bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha no período de outubro de 2009 a outubro de 2010.....	76
Gráfico 3	Quantificação do deflúvio no período entre setembro de 2009 e agosto de 2010 da bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha.....	82
Gráfico 4	Hidrógrafas de depleção das vazões das nascentes monitoradas na bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela no período de 20/03/10 à 11/09/10.....	84
Gráfico 5	Rendimentos específicos apresentados pelas nascentes monitoradas na bacia do Ribeirão Marcela no período de outubro de 2009 a outubro de 2010.....	88
Gráfico 6	Quantificação do deflúvio no período entre setembro de 2009 e agosto de 2010 da bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela..	92

CAPITULO 3

Gráfico 1	Representação do nível médio do aquífero da área L1, e a estimativa das variações no nível d'água (Δh) em relação às curvas de recessão.....	109
Gráfico 2	Comportamento temporal da precipitação e do nível médio do aquífero em quatro áreas de recargas de nascente.....	110
Gráfico 3	Representação do nível médio do aquífero da área M1, e a estimativa das variações no nível d'água (Δh) em relação às curvas de recessão.....	114
Gráfico 4	Representação do nível médio do aquífero da área M5, e a estimativa das variações no nível d'água (Δh) em relação às curvas de recessão.....	115
Gráfico 5	Comportamento temporal da precipitação e do nível médio do aquífero em quatro áreas de recargas de nascente.....	116
Gráfico 6	Comportamento temporal da precipitação e do nível médio do aquífero em quatro áreas de recargas de nascente.....	117

LISTA DE TABELAS

CAPITULO 1

Tabela 1	Classificação climática preliminar para a Bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha de acordo com o Método de Thornthwate (1948).....	36
Tabela 2	Classificação climática preliminar para a Bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela de acordo com o Método de Thornthwate (1948).....	40

CAPITULO 2

Tabela 1	Características morfométricas das nascentes do Ribeirão Lavrinha.....	60
Tabela 2	Características morfométricas das nascentes do Ribeirão Marcela.....	67
Tabela 3	Coefficientes das equações ajustadas para as vazões e os coeficiente de determinação (R^2) referentes aos ajustes para as nascentes monitoradas na bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha.....	73
Tabela 4	Decaimento percentual das vazões das nascentes monitoradas na bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha, no período de 20/03/10 à 11/09/10.....	74
Tabela 5	Síntese da análise do deflúvio anual da bacia do Ribeirão Lavrinha.....	78
Tabela 6	Deflúvio total em volume (L), em lâmina (mm) e vazão média diária do período (L/s) das nascentes monitoradas.....	79
Tabela 7	Classes de solos, tipos de horizonte A, fases de relevo, potencial de recarga e suas respectivas extensões (ha) e porcentagens da bacia do ribeirão Lavrinha.....	80
Tabela 8	Deflúvio base da bacia e deflúvio base médio entre as nascentes.....	83
Tabela 9	Coefficientes das equações ajustadas para as vazões e respectivos coeficientes de determinação (R^2) referentes aos ajustes para as nascentes monitoradas na bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela.....	85
Tabela 10	Decaimento percentual das vazões das nascentes monitoradas na bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, no período de 01/4/10 à 21/08/10.....	85
Tabela 11	Síntese da análise do deflúvio anual da bacia do Ribeirão Marcela.....	90
Tabela 12	Deflúvio total em volume (L), em lâmina (mm) e vazão média diária do período (L/s) das nascentes monitoradas.....	91

Tabela 13	Deflúvio base da bacia e deflúvio base médio entre as nascentes.....	93
CAPITULO 3		
Tabela 1	Valores médios da porosidade drenável obtido a partir da curva característica de retenção de água no solo.....	108
Tabela 2	Recarga direta para o período de outubro de 2009 a outubro de 2010.....	111
Tabela 3	Variação do armazenamento subterrâneo para o período de outubro de 2009 a outubro de 2010.....	111
Tabela 4	Balço hídrico subterrâneo (mm) para o período de outubro de 2009 a outubro de 2010.....	112
Tabela 5	Balço hídrico simplificado na zona não saturada da área de recarga da nascente da nascente L1.....	113
Tabela 6	Monitoramento hidrológico da bacia do Ribeirão Lavrinha....	113
Tabela 7	Estimativa da porosidade drenável.....	114
Tabela 8	Valores das variações acumuladas no ano, dos níveis médios dos aquíferos.....	115
Tabela 9	Recarga direta para o período de outubro de 2009 a outubro de 2010.....	117
Tabela 10	Variação do armazenamento subterrâneo para o período de outubro de 2009 e outubro de 2010.....	118
Tabela 11	Balço hídrico subterrâneo (mm) para o período de outubro de 2009 e outubro de 2010.....	119
Tabela 12	Síntese do balanço hídrico simplificado.....	119
Tabela 13	Monitoramento hidrológico da bacia do Ribeirão Marcela.....	120

SUMÁRIO

	CAPITULO 1.....	16
1	INTRODUÇÃO GERAL.....	17
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	19
2.1	O Ciclo hidrológico.....	19
2.2	Nascentes.....	20
2.3	Recarga dos aquíferos subterrâneos.....	23
2.3.1	Tipos de recarga subterrânea.....	24
2.3.2	Métodos de quantificação da recarga subterrânea.....	26
3	MATERIAL E MÉTODOS GERAL.....	35
3.1	Localização e caracterização das áreas de estudo.....	35
3.2	Monitoramento hidrológico das nascentes.....	44
3.2.1	Monitoramento das vazões das nascentes.....	44
3.2.2	Monitoramento da precipitação.....	45
3.2.3	Monitoramento do nível do aquífero não confinado.....	45
	REFERÊNCIAS.....	46
	CAPÍTULO 2 MONITORAMENTO E MODELAGEM DAS VAZÕES EM NASCENTES, EM DOIS AMBIENTES DISTINTOS NA REGIÃO DO ALTO RIO GRANDE, MG.....	52
1	INTRODUÇÃO.....	55
2	MATERIAL E MÉTODOS.....	57
2.1	Bacia do Ribeirão Lavrinha – inserida no ambiente da Serra da Mantiqueira.....	57
2.1.1	Mapas de uso atual do solo das áreas de recarga das nascentes monitoradas.....	57
2.1.2	Características morfométricas das áreas de recarga das nascentes.....	60
2.2	Bacia do Ribeirão Marcela inserida no ambiente - Campo das Vertentes.....	64
2.2.1	Mapas de uso atual do solo das áreas de recarga das nascentes estudadas.....	64
2.2.2	Características morfométricas das áreas de recarga das nascentes.....	67
2.3	Análise do escoamento de água.....	70
2.3.1	Análise do deflúvio.....	71
2.3.2	Análise do escoamento no período de depleção.....	71
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	72
3.1	Bacia do Ribeirão Lavrinha – inserida no ambiente da Serra da Mantiqueira.....	72

3.1.1	Modelagem das vazões das nascentes da Bacia do Ribeirão Lavrinha no período de depleção.....	72
3.1.2	Rendimento específico das nascentes.....	76
3.1.3	Deflúvio da bacia do Ribeirão Lavrinha.....	78
3.1.4	Comparações entre o deflúvio base das nascentes da bacia do Ribeirão Lavrinha com o deflúvio base da bacia.....	79
3.1.5	Comparações entre o deflúvio base das nascentes da bacia do Ribeirão Lavrinha com o deflúvio base da bacia.....	81
3.2	Bacia do Ribeirão Marcela inserida no ambiente - Campo das Vertentes.....	83
3.2.1	Modelagem das vazões das nascente da Bacia do Ribeirão Marcela no período de depleção.....	83
3.2.2	Deflúvio da Bacia do Ribeirão Marcela.....	87
3.2.3	Deflúvio das nascentes da bacia do Ribeirão Marcela.....	90
3.2.4	Comparações entre o deflúvio base das nascentes da bacia do Ribeirão Marcela com o deflúvio base da bacia.....	90
3.2.5	Comparações entre o deflúvio base das nascentes da bacia do Ribeirão Marcela com o deflúvio base da bacia.....	92
4	CONCLUSÕES.....	94
	REFERÊNCIAS.....	95
	CAPÍTULO 3 DINÂMICA DE RECARGA EM NASCENTES NA REGIÃO DO ALTO RIO GRANDE, MG.....	96
1	INTRODUÇÃO.....	99
2	MATERIAL E MÉTODOS.....	101
2.1	Poços de observação do aquífero não confinado.....	101
2.2	Recarga subterrânea direta.....	106
2.3	Recarga profunda.....	108
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	108
3.1	Bacia do Ribeirão Lavrinha – inserida no ambiente da Serra da Mantiqueira Análise e discussão dos resultados obtidos do monitoramento da nascente L1.....	108
3.1.1	Estimativa da porosidade drenável da nascente L1.....	108
3.1.2	Variação do nível d'água subterrâneo.....	111
3.1.3	Estimativa da recarga direta.....	111
3.1.4	Avaliação da variação do armazenamento subterrâneo.....	112
3.1.5	Estimativa da recarga profunda.....	113
3.1.6	Balço hídrico simplificado.....	113
3.2	Bacia do Ribeirão Marcela inserida no ambiente - Campo das Vertentes Análise e discussão dos resultados obtidos dos monitoramentos das nascentes M1, M5.....	114
3.2.1	Estimativa da porosidade drenável das nascentes M1 e M5.....	114
3.2.2	Variações do nível d'água subterrâneo.....	114

3.2.3	Estimativa da recarga direta.....	117
3.2.4	Avaliação da variação do armazenamento subterrâneo.....	118
3.2.5	Estimativa da recarga profunda.....	119
3.2.6	Balanço hídrico simplificado.....	119
4	CONCLUSÕES.....	121
	REFERÊNCIAS.....	122
	ANEXOS.....	124

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO GERAL

A água é um recurso natural de valor inestimável, mais que um insumo indispensável à produção é um recurso estratégico para o desenvolvimento econômico. É vital para a manutenção dos ciclos biológicos, geológicos e químicos que mantêm em equilíbrio os ecossistemas.

A questão dos recursos hídricos vem sendo cada vez mais, motivo de preocupação no Brasil e no mundo. Governos, organizações não governamentais (ONGs), empresas públicas e privadas, além da comunidade acadêmica, procuram se envolver no assunto.

Neste contexto estudos hidrológicos em bacias hidrográficas são imprescindíveis para melhor compreensão dos processos associados ao ciclo hidrológico e dos impactos gerados pelas mudanças no uso atual do solo sobre a quantidade e a qualidade da água.

Estes estudos possibilitam a integração dos fatores que condicionam a qualidade e a disponibilidade dos recursos hídricos, com os seus reais condicionantes físicos e antrópicos (HEIN, 2000).

Como as nascentes são o início de todo curso d'água cada vez mais vêm sendo alvo de estudos, devido a sua enorme importância no contexto hidrológico, pois, há um grande interesse em preservar a quantidade e qualidade de suas águas. Estudos sobre o uso atual do solo nas áreas de recarga das nascentes, declividade e pedologia, têm se mostrado instrumento importante na avaliação deste recurso hídrico.

Diante da importância dos recursos hídricos, objetivou-se neste trabalho caracterizar a dinâmica do escoamento em oito nascentes, associando ao uso atual do solo, às características morfométricas e pedológicas das áreas dos seus entorno, em dois ambientes distintos, um localizado na região da Serra da Mantiqueira e, o outro, na região Campos das Vertentes. Estimou-se também a

recarga do aquífero em três nascentes e o balanço hídrico na zona não saturada do solo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 O Ciclo hidrológico

A água do planeta está em contínuo movimento cíclico entre as reservas sólida, líquida e gasosa, o que é fundamental para o uso e para satisfazer às necessidades do homem e de todos os outros organismos, animais e vegetais. Os componentes do ciclo hidrológico são: precipitação, evaporação, transpiração, infiltração, percolação e drenagem (TUNDISI, 2003).

Segundo Castro e Lopes (2001), simplifadamente, ciclo hidrológico é o caminho que a água percorre desde a evaporação no mar, passando pelo continente e voltando novamente ao mar.

Este ciclo é responsável pela renovação da água no planeta. Sua manutenção se dá pela energia proveniente do sol, uma vez que tal energia aumenta as demandas por evaporação da água líquida ou do derretimento da mesma quando em seu estado sólido (OLERIANO; DIAS, 2007).

O ciclo hidrológico só é fechado em nível global, sendo que à medida que se considere um menor volume de controle (bacia hidrográfica), fica mais caracterizado o ciclo hidrológico como um ciclo aberto em nível local (SILVEIRA, 2007).

O ciclo hidrológico também pode ser tratado e analisado em termos de um balanço hídrico, o qual abrange a caracterização dos componentes de um sistema, no intuito de quantificar as entradas e saídas de água no interior de uma região hidrográfica, considerando as variações efetivas de acumulação. As variáveis correspondentes às possíveis entradas de água no sistema são a precipitação, o orvalho, a drenagem lateral e a ascensão capilar. Do mesmo modo, às possíveis variáveis responsáveis pela saída de água incluem a

evapotranspiração, o escoamento superficial, a drenagem lateral e a drenagem profunda (PEREIRA; VILLA NOVA; SEDIYAMA, 1997).

2.2 Nascentes

Segundo Alvarenga (2004), a maioria das nascentes está localizada nas regiões montanhosas, nas chamadas bacias de cabeceira.

As nascentes são conhecidas como mina, fio d'água, olho d'água e fontes, sendo caracterizadas como os pontos nos quais a água subterrânea aflora naturalmente através da superfície do solo, mesmo que de forma intermitente (JUNQUEIRA JÚNIOR, 2006).

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.

É bom ressaltar 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.

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.

A perenidade de uma nascente é resultante da manutenção do nível do lençol freático e de sua recarga subterrânea, e quando suas áreas de acumulação venham sofrer intervenções de impacto, a qualidade e a quantidade de água podem ser comprometidas bem como a regeneração florestal (LOPES, 2006).

Segundo Cabral et al. (2003), 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, como representado pela Equação 01, conhecida como “Fórmula de Maillet” (CASTANY, 1967).

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

em que Q_t é a vazão da nascente no tempo t (L^3T^{-1}); Q_{t_0} é a vazão da nascente no tempo t_0 (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_0 é o Dia Juliano correspondente ao início do período de depleção do escoamento subterrâneo e t é o Dia Juliano de interesse, sendo que $t \geq t_0$.

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 (SILVA, 2009).

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 (SILVA, 2009).

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; BRASIL, 1986; BRASIL, 2001).

Nos Artigos 2º e 3º da referida Lei consta:

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).

De acordo com Silva (2009), 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 (SILVA, 2009).

2.3 Recarga dos aquíferos subterrâneos

A principal fonte de recarga é a chuva, que pode penetrar o solo diretamente e percolar para a zona de águas subterrânea (FAZAL et al., 2005). 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 (RABELO, 2006).

A recarga é definida, de modo geral, como “a entrada de água, na zona saturada, disponível, tanto à superfície do nível freático como ao restante do fluxo da zona saturada” (FREEZE; CHERRY, 1979). Essa definição, portanto, não exclui as contribuições de fluxos laterais ao reservatório do aquífero, contudo, mais comumente, a recarga é atribuída ao fluxo descendente que atinge o nível freático e/ou passa a compor o reservatório conformado pelo aquífero (RABELO, 2006).

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; ISSAR; SIMMERS, 1990). 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 recarga dos aquíferos está diretamente relacionada com a cobertura da superfície do solo (MAZIERO, 2005). 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).

2.3.1 Tipos de recarga subterrânea

De forma geral, segundo De Vries e 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).

Segundo Scanlon et al. (2002) 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.

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. Segundo 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.

2.3.2 Métodos de quantificação da recarga subterrânea

Os métodos que estimam a recarga de aquíferos são classificados, segundo vários aspectos, por diversos autores (KINZELBACH et al., 2002; SCALON et al., 2002). Considerando-se o meio hidrológico, no qual as informações de recarga são obtidas, os métodos podem ser classificadas como pertencentes a três zonas (ou grupos): saturada, não saturada e de águas superficiais. Em cada um dos grupos, os métodos podem ser classificados como: físico, de traçador e de modelo computacional (RABELO, 2006).

Considerando o meio hidrológico na zona saturada, os métodos que podem ser utilizados na estimativa da recarga são: Modelagem numérica; Traçadores ambientais Cl (Cloro), ^{14}C (Carbono 14); Traçadores Históricos CFCs, $^3\text{H}/^3\text{He}$ (Tritium); Lei de Darcy e Flutuação do Nível Freático.

Segundo Barreto (2006) apesar da maioria dos métodos fornecerem valiosas informações sobre recarga, eles nem sempre são diretamente aplicáveis. Para Xu e 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

A técnica de balanço hídrico considera os principais processos hidrológicos como entradas e saídas de um balanço volumétrico. Estas variáveis são baseadas nos fenômenos hidrológicos de maior relevância, que alteram o

conteúdo de água de um dado volume de controle durante um dado período de tempo.

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 (TUCCI; BELTRAME, 2007; ZAKIA, 1987). 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 da quantidade 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 entram e saem 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).

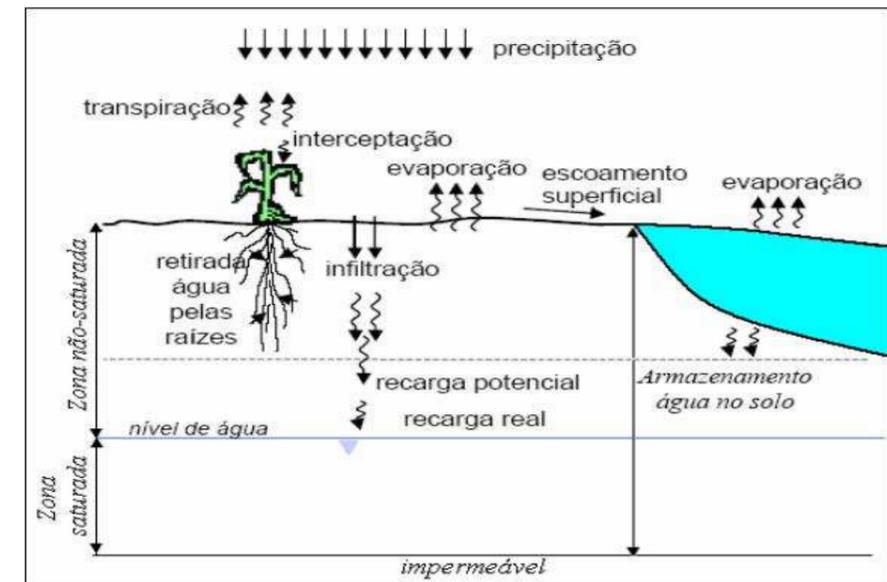


Figura 1 Componentes do ciclo hidrológico para o balanço hídrico
 Fonte: (BARRETO, 2006)

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; LEMOS; SALATI, 1999).

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 (ns). Então os componentes Q_e , Q_s , ET e ΔS podem ter subcomponentes nas duas regiões (BARRETO, 2006).

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 (SCANLON et al., 2002; SCHICHT; WALTON, 1996).

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

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, tais como precipitação, escoamento superficial e níveis d'água (WENDLAND; BARRETO; GOMES, 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 da porosidade drenável 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 Healy e Cook (2002) e Wahnfried e 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 atual 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; WAHNFREID; HIRATA, 2005):

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

em que R é a taxa de recarga (LT^{-1}), S_y é a porosidade drenável do aquífero (L^3L^{-3}); Δh é a variação do nível freático (L), no intervalo de tempo Δt (T).

A porosidade drenável 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 meio poroso inicialmente saturado com água, em um tempo infinito, e o volume total do solo.

Na equação 4 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 subsuperficial) são nulos durante o período de recarga (WENDLAND; BARRETO; GOMES, 2007).

Healy e Cook (2002) definiram que a aplicação da equação 4 para todas as elevações individuais do nível d'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. O Δt é o intervalo entre o pico de subida e o ponto mais baixa da curva de recessão antes do início da subida. 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 consequente início da variação de nível, resultante do processo natural de escoamento através da zona não-saturada (BARRETO, 2006).

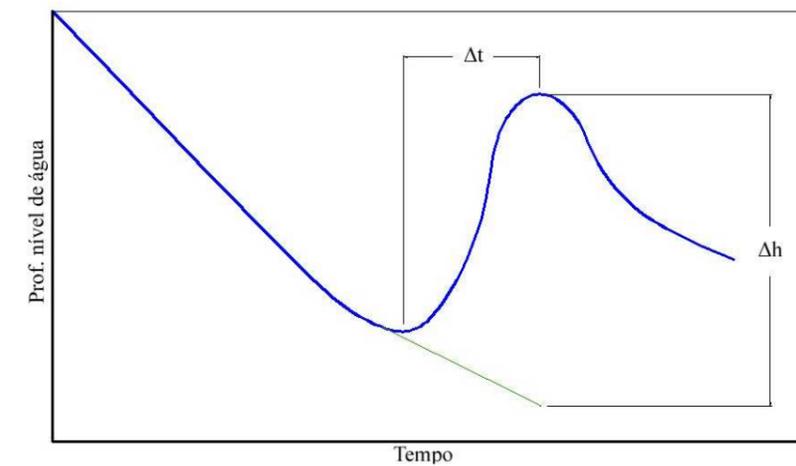


Figura 2 Extrapolação da curva de recessão do nível d'água para estimativa da recarga total
Fonte: Adaptado de Barreto (2006)

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:

- a) 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).
- b) As taxas de recarga variam substancialmente dentro de uma bacia, devido às 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).
- c) 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).
- d) 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; WOO; LEE, 2004).
- e) A incerteza gerada por este método está relacionada à precisão com que a porosidade drenável pode ser determinada e até que ponto as suposições inerentes ao método são válidas (HEALY; COOK, 2002).

Segundo Silva (2009) e Wahnfried e Hirata (2005), utilizaram no Brasil 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, 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 e 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, variando entre 130 mm (8,2% da precipitação anual de 1596,5 mm) e 540 mm (34% desta mesma precipitação).

Cutrim e 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 uma porosidade drenável de 13%, correspondendo a 3,5% da precipitação total no período analisado.

3 MATERIAL E MÉTODOS GERAL

3.1 Localização e caracterização das áreas de estudo

O trabalho foi desenvolvido em duas 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 bacias hidrográficas no estado de Minas Gerais é apresentada na Figura 3.

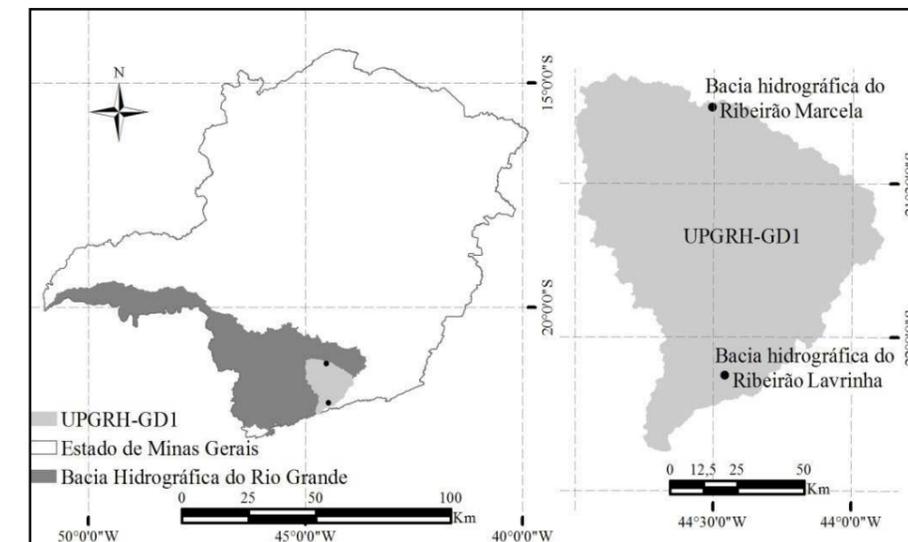


Figura 3 Mapa de situação das bacias hidrográficas estudadas
Fonte: Silva (2009)

A primeira área de estudo corresponde à bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha inserida na região da Serra da Mantiqueira, 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 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% (SILVA, 2009). Na Tabela 1 apresenta-se o detalhamento da classificação preliminar do seu clima, como ArB'₂a'.

Tabela 1 Classificação climática preliminar para a Bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha de acordo com o Método de Thornthwate (1948)

Tipo climático Superúmido – Tipo: A	Índice de Umidade (Iu) $Iu \geq 100$
Clima Úmido Deficiência de água pequena ou nula: r	Índice de Aridez (Ia) $0 \leq Ia < 16,7$
Tipo climático Mesotérmico : B'₂	ETP anual $855 > ETP \geq 712$
Subtipo Climático Subtipo: a'	ETP verão $ETPv < 48\%$

Fonte: (YANAGI, 2008)

A temperatura média no mês mais quente e no mês mais frio são 19 °C e 11 °C, respectivamente, com ocorrência de geadas.

A bacia hidrográfica em questão é representativa dos ambientes associados aos Cambissolos da região da Serra da Mantiqueira, Alto Rio Grande, tendo sido escolhida como representativa desta região para realização de estudos hidrológicos associados à produção de água subterrânea.

A bacia apresenta baixo potencial de recarga de aquíferos devido principalmente às características pedológicas (92,07% da área composta por Cambissolos) e elevadas declividades (predomínio de relevo forte ondulado e montanhoso).

Na bacia estudada existem oito classes de solos as quais são apresentadas na figura 4.

Os Cambissolos são solos desde rasos a profundos, de sequências de horizontes 'A', 'Bi' (B incipiente) e 'C'. Nesta região, esses solos ocorrem em relevos acidentados como Mares de Morros.

O Cambissolo háplico (CX) textura média com horizonte 'A' proeminente, endopedregoso, pouco profundo, é o solo de maior expressão espacial na bacia, perfazendo um total de 60% da área, predominantemente na margem esquerda e na cabeceira do curso d'água principal.

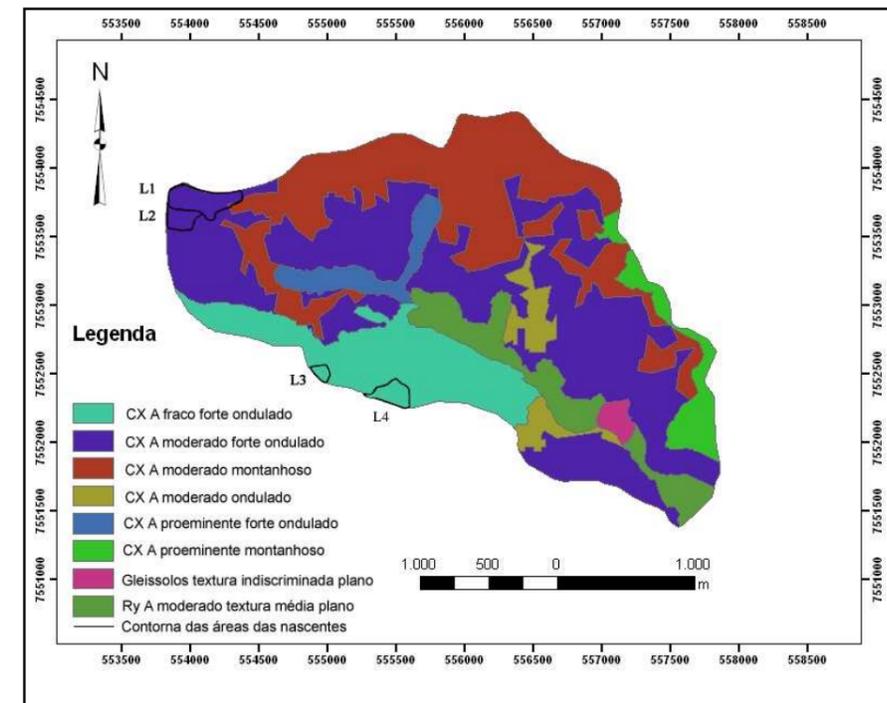


Figura 4 Distribuição espacial das unidades pedológica na bacia do ribeirão Lavrinha

Fonte: Adaptado de Menezes (2007)

A Figura 5 representa o mapa de classes de declividade da 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 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 bacia é caracterizada como uma região de relevo bastante movimentado (SILVA, 2009).

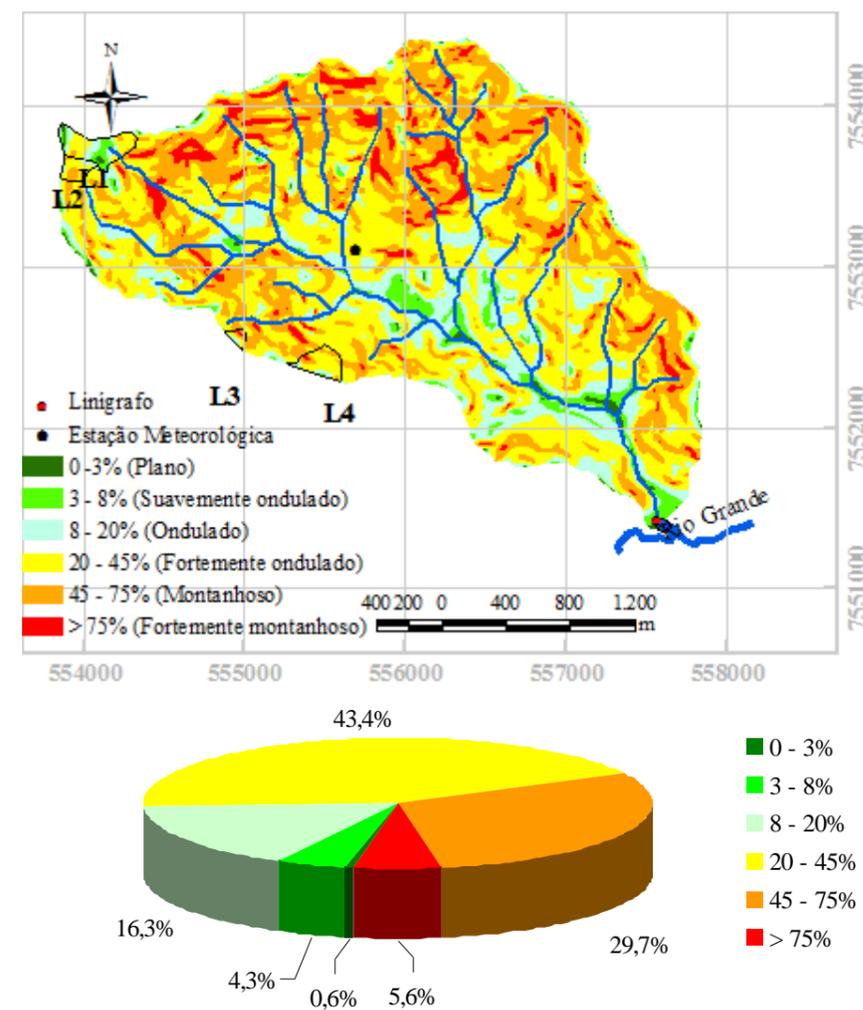


Figura 5 Mapa de classes de declividade da bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha e distribuição percentual dessas classes em relação à área da bacia hidrográfica

Fonte: Silva (2009)

Segundo Menezes (2007) esta 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 à bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela inserida na região dos Campos das Vertentes, a qual deságua no Córrego Jaguará, que deságua diretamente no reservatório da UHE de Camargos/CEMIG, localizada na cidade de Nazareno. A 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 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% (SILVA, 2009). Na Tabela 2 apresenta-se o detalhamento da classificação preliminar do seu clima, como B_{1r}B'_{3a}'.

Tabela 2 Classificação climática preliminar para a Bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela de acordo com o Método de Thornthwate (1948)

Tipo climático Úmido – Tipo: B ₁	Índice de umidade (Iu) 20 ≤ Iu < 40
Clima úmido Deficiência de água pequena ou nula: r	Índice de aridez (Ia) 0 ≤ Ia < 16,7
Tipo climático Mesotémico : B' ₃	ETP anual 997 > ETP ≥ 855
Subtipo climático Subtipo: a'	ETP verão ETP _v < 48%

Fonte: (YANAGI, 2008)

Conforme registros da estação meteorológica localizada na 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 (SILVA, 2009).

Segundo Gomes (2005), as unidades pedológicas presentes na bacia hidrográfica podem ser visualizados na Figura 6. Predomina na bacia o Latossolo Vermelho Amarelo distrófico (LVAd), ocupando cerca de 65% da área. Esta unidade pedológica ocorre tanto em locais de relevo suave ondulado nos topos e sopés das elevações, como nas encostas de relevos ondulados, locais de sua maior expressão. Latossolo Vermelho Distrófico típico (LEd), em cerca de 14% da área da bacia hidrográfica, aparecendo mesclado dentro do LVAd. Os Cambissolos (C) ocupam menos de 5% e Solos Hidromórficos (Hi), compreendendo as várzeas, cerca de 17% da área da bacia. Com base em estudos pedológicos e hidrológicos esta bacia foi escolhida por Silva, Melo e Correa (2004), como representativa do domínio Latossolos na região Alto Rio Grande à montante da UHE de Camargos/CEMIG.

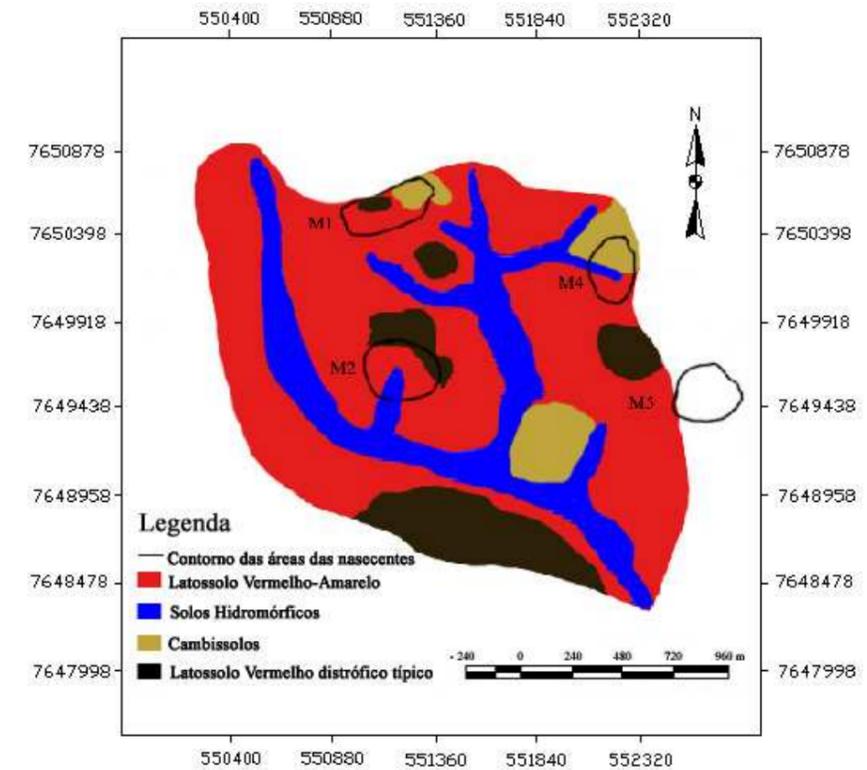


Figura 6 Distribuição dos solos na bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela
 Fonte: Adaptado de Motta et al. (2001)

A área M5 corresponde a área de recarga de uma nascente que encontra-se fora da bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, drenando diretamente para o Córrego Jaguará. Devido às suas características hidrológicas, esta também encontra-se sob monitoramento hidrológico (SILVA, 2009).

Na Figura 7 apresenta-se o mapa de classes de declividade da 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 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 bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela pode-se caracterizá-la como uma bacia de relevo suave (SILVA, 2009).

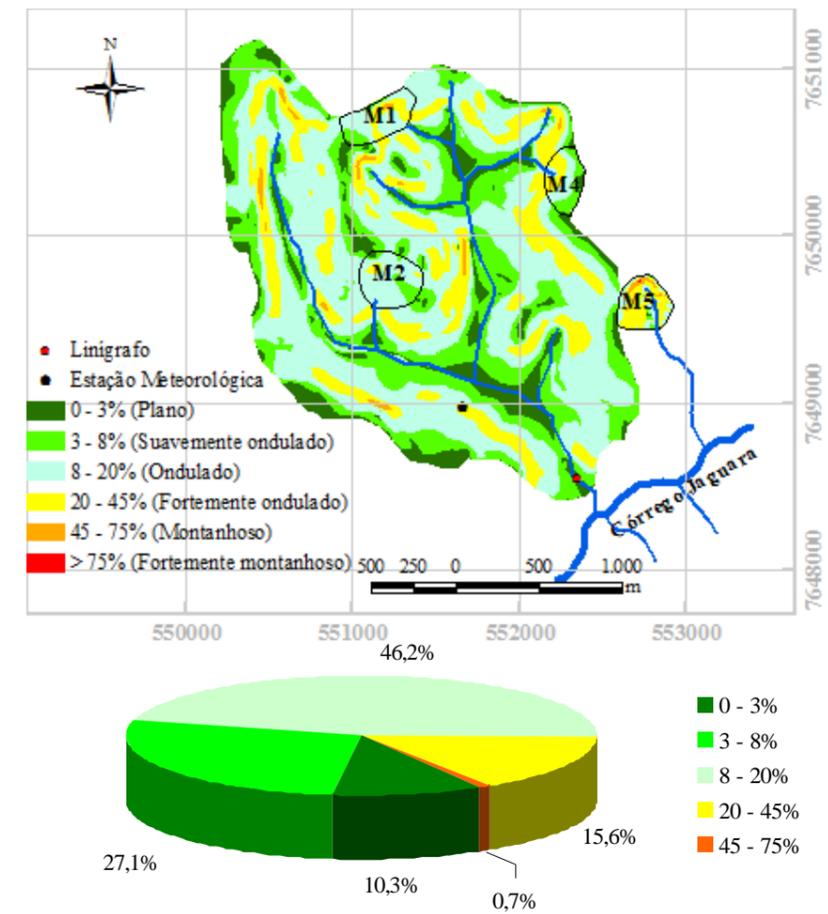


Figura 7 Mapa de classes de declividade da bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela e distribuição percentual dessas classes em relação à área da bacia hidrográfica
Fonte: (SILVA, 2009)

As duas bacias estudadas estão em dois ambientes fisiográficos distintos, os quais são: bacia do Ribeirão da Lavrinha, representando o domínio de Cambissolos, relevo mais acentuado e uso do solo basicamente de florestas nativas e pastagens, estando localizada nas proximidades da nascente do Rio Grande, na Serra da Mantiqueira e a bacia do Ribeirão Marcela, representando o domínio de Latossolos e agricultura mais tecnificada, localizada na parte norte da região do Alto Rio Grande (SILVA, 2009).

3.2 Monitoramento hidrológico das nascentes

Foram feitos monitoramentos da vazão, precipitação e da variação do nível do aquífero não confinado.

3.2.1 Monitoramento das vazões das nascentes

A vazão das nascentes vem sendo monitorada há alguns anos nestas bacias, neste trabalho, elas foram monitoradas quinzenalmente de outubro de 2009 a janeiro de 2011. As nascentes L1, M1 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.

As vazões foram quantificadas utilizando-se de medidor de vazão sob regime crítico (calha) modelo WSC Flume, 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·s⁻¹), através de uma equação específica para cada calha utilizada.

3.2.2 Monitoramento da precipitação

Além das estações climatológicas existentes em cada bacia, nas nascentes L1, M1 e M5, foram instalados pluviômetros, conectado a um reservatório, para que as leituras fossem mais representativas, dada à variabilidade espacial da precipitação.

3.2.3 Monitoramento do nível do aquífero não confinado

Nas nascentes L1, M1 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 (SILVA, 2009).

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 (SILVA, 2009).

As leituras dos níveis do lençol freático foram feitas pelo processo de medição direta com uma trena metálica graduada em milímetros acopladas em sua extremidade um pedaço de madeira de 30 mm. Do lado de cada poço, foi instalado um piquete para servir como referência de nível (RN), sendo este georreferenciado no levantamento topográfico (SILVA, 2009).

REFERÊNCIAS

ALLEN, R. G. et al. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. p. 300. (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, 2004.

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, 2007.

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

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

BRASIL. **Medida provisória n. 2166-67**, 24 de ago. 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. Disponível em: <<http://www.receita.fazenda.gov.br/legislacao/MPs/mp2166-67.htm>>. Acesso em: 27 out. 2008.

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

CASTRO, P. S.; LOPES, J. D. S. **Recuperação e conservação de nascentes**. Viçosa, MG: CPT, 2001. 84 p. (Saneamento e Meio Ambiente, 296).

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

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., e SIMPÓSIO DE ÁGUAS DA AUGM, 1., 2004, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: [s. n.], 2004. 1 CD-ROM.

DE VRIES, J. J.; SIMMERS, I. Groundwater recharge: an overview of processes and challenges. **Hydrogeology Journal**, New York, v. 10, p. 5-17, 2002.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Serviço nacional de levantamento e conservação de solos. In: Reunião Técnica de Levantamento de Solos, 10., 1979, Rio de Janeiro. **Súmula...** Rio de Janeiro: EMBRAPA-SNLCS, 1979. p. 83. (Micelânea, 1).

FAZAL, M. A. et al. Estimating groundwater recharge using the SMAR conceptual model calibrated by genetic algorithm. **Journal of Hydrology**, Wellington, v. 303, 1/4, p. 56-78, 2005.

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

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

HEIN, M. **Espacialização de duas microbacias hidrográficas do Rio Piracicaba para modelagem hidrológica**. 2000. 307 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000.

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, 2006.

KINZELBACH, W. et al. **A survey of methods for groundwater recharge in arid and semi-arid regions**. Nairobi: United Nations Environment Programme, 2002.

LERNER, D. N.; ISSAR, A. S.; SIMMERS, I. **Groundwater recharge: a guide to understanding and estimating natural recharge**. Hannover: Heise, 1990. (International Contributions to Hydrogeology, 8).

LOPES, V. L. **Monitoramento e caracterização das vazões em nascente da bacia da Lavrinha, Bocaina de Minas, MG – Região do Alto Rio Grande**. 2006. 76 p. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2006.

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

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: [s. n.], 2005. 1 CD ROM.

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

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

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

MOTTA, P. E. F. et al. **Levantamento pedológico detalhado, erosão dos solos, uso atual e aptidão agrícola das terras de microbacia piloto na região sob influência do reservatório da Hidrelétrica de Itutinga/Camargos-MG**. Lavras: UFLA/ CEMIG, 2001. 51p.

OLERIANO, E. 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, 2007. 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, 2006.

PARALTA, E. A. et al. 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, CABO VERDE, 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. et al. Estudo das nascentes da bacia hidrográfica do ribeirão Santa Cruz, Lavras, MG. **Scientia Florestalis**, Piracicaba, n. 65, p. 197-206, jun. 2004.

RABELO, J. L. **Estudo da recarga do aquífero Guarani no sistema Jacaré-Tietê**, 2006. 200 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

SALATI, E.; LEMOS, H. M.; SALATI, E. Água e o desenvolvimento sustentável. In: REBOUÇAS, A. C.; BRAGA, B.; TUNDISI, J. G. **Águas doces no Brasil**. São Paulo: Escrituras, 1999. p. 717.

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.; MELLO, C. R.; CORREA, M. R. **Estudos hidrológicos sobre o regime de escoamento das bacias de drenagem do Alto Rio Grandeà montante do reservatório da UHECamargos/CEMIG**. Lavras: UFLA; Belo Horizonte: CEMIG/ANEEL, 2004. 90 p. (Relatório Parcial do Projeto de P&D 076).

SILVA, L. A. **Regime de escoamento e recarga subterrânea de nascentes na região do Alto Rio Grande, MG**, 2009. 134 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

SILVEIRA, A. L. 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.

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.

TUNDISI, J. G. **Água na século XXI: enfrentando a escassez**. São Carlos: RiMa, 2003. 248 p.

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, p. 49-56, 2005.

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. 2, p. 15-25, 2005.

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

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

YANAGI, S. M. N. **Estruturação do banco de dados, análises e caracterização climática da região do Alto Rio Grande, MG**. Lavras: FAPEMIG, 2008. Relatório de Atividades.

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, 1987.

CAPÍTULO 2

**MONITORAMENTO E MODELAGEM DAS VAZÕES EM
NASCENTES, EM DOIS AMBIENTES DISTINTOS NA REGIÃO DO
ALTO RIO GRANDE, MG**

RESUMO

Nascentes são pontos nos quais a água subterrânea aflora naturalmente através da superfície do solo, mesmo que de forma intermitente. Esses pontos significam o início de curso d'água formador de pequenos e grandes rios que vão desaguar nos mares. O monitoramento da vazão de uma nascente é importante para se conhecer e quantificar a disponibilidade de água como também relacionar a variação da vazão em diferentes épocas do ano. Visando a caracterização das áreas de recarga das nascentes e compreender comportamento sazonal de suas vazões, foram feitas a modelagem hidrológica das vazões, associadas a dados morfométricos e mapas de uso atual dos solos, em oito nascentes das bacias dos Ribeirões Lavrinha e Marcela, sendo quatro em cada bacia. As vazões foram monitoradas no período de outubro de 2009 a outubro de 2010, com periodicidade aproximadamente quinzenal, com a utilização de um medidor WSC flume e modeladas através da Fórmula de Maillet. Constatou-se grande variabilidade espacial e temporal das vazões das nascentes ao longo do período monitorado. As bacias hidrográficas monitoradas apresentam grande diferença na produção de água em suas nascentes, verificou-se que existem relações importantes entre as condições de uso atual do solo, declividade e pedologia com a capacidade de manutenção do fluxo de água ao longo do ano (α), rendimento específico médio mensal e o deflúvio anual das nascentes.

Palavras-chave: Nascentes. Vazão. Modelagem.

ABSTRACT

Sources are points where groundwater emerges naturally through the soil surface, even if intermittently. These points signify the beginning of watercourse forming small and large rivers that drain into the seas. Monitoring the flow of a source is important to understand and quantify the availability of water, but also to relate the variation of flow in different seasons. In order to characterize the recharge areas of sources and understand seasonal pattern of their flow, hydrologic modeling of the flows were made, associated with the morphometric data and maps of current land use in eight headwaters of the Lavrinha and Marcela Streams, four in each basin. The flow rates were monitored from October 2009 to October 2010, with approximately fortnightly intervals, using a meter WSC flume and modeled by the Maillet formula. It was found a large spatial and temporal variability of the flows of sources along the monitored period. Monitored watersheds have a large difference in water production at its sources, it was found that there are important links between the conditions of actual use of soil, slope and soil conditions with the ability to maintain the flow of water throughout the year (α), specific yield and the monthly mean annual runoff sources.

Keywords: Springs. Flow. Modeling

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 (SILVA, 2009).

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 interrelações.

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.

Estudos sobre o uso atual do solo em áreas de recarga de nascentes são escassos (JUNQUEIRA JÚNIOR, 2006). No entanto, são cada vez mais necessários. O uso do solo pode alterar a qualidade e quantidade de água, além de influenciar o armazenamento de água subterrânea e o regime da nascente e dos cursos d'água (PINTO et al., 2004).

Portanto, objetivou-se neste estudo compreender a análise do uso atual do solo, características morfométricas e pedológicas na disponibilidade hídrica em áreas de recarga de 8 nascentes, sendo 4 pertencentes a bacia do Ribeirão

Lavrinha, e 4 a do Ribeirão Marcela, com o intuito de entender o comportamento hidrológico nestes locais.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Bacia do Ribeirão Lavrinha – inserida no ambiente da Serra da Mantiqueira

Caracterização das áreas de recarga das nascentes monitoradas.

2.1.1 Mapas de uso atual do solo das áreas de recarga das nascentes monitoradas

As Figuras de 1 a 4 apresentam os mapas de uso atual do solo das áreas de recarga das nascentes monitoradas e sua distribuição percentual.

A área de recarga da nascente L1 (Figura 1) com 7,24 ha 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, esta nascente é explorada pelo gado para dessedentação (SILVA, 2009).

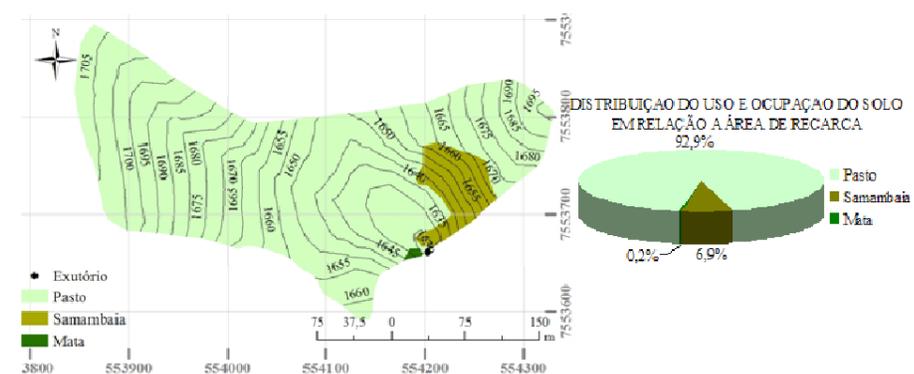


Figura 1 Mapa de uso atual do solo da área de recarga da nascente L1
Fonte: (SILVA, 2009)

A área de recarga da nascente L2 (Figura 2) com 2,43 ha 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 frequentemente o processo de roçagem dando espaço à pastagem e samambaia silvestre (SILVA, 2009).

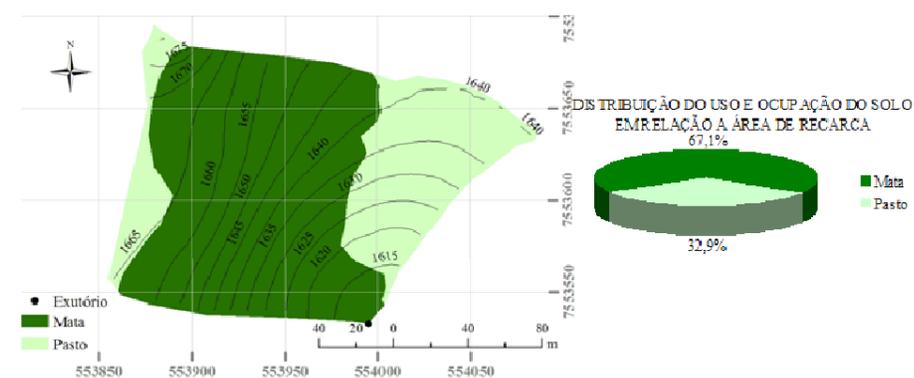


Figura 2 Mapa de uso atual do solo da área de recarga da nascente L2
Fonte (SILVA, 2009)

O uso atual do solo da área de recarga da nascente L3 (Figura 3) com 0,87 ha constitui-se basicamente de 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 (SILVA, 2009).

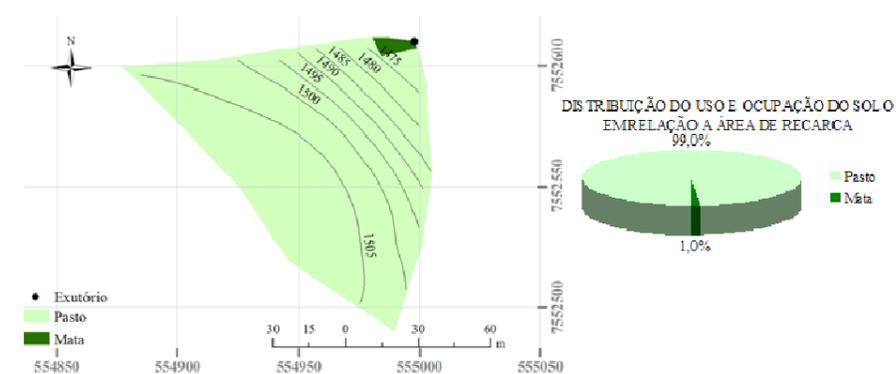


Figura 3 Mapa de uso atual do solo da área de recarga da nascente L3
Fonte: (SILVA, 2009)

Na área de recarga da nascente L4 (Figura 4) com 5,14 ha encontram-se 45,4% de pastagem, 31,4% de mata nativa e 23,2% de eucalipto sendo que em muitos locais há afloramento de rochas. Mesmo esta área estando em relevo muito acidentado, na sua maioria, o uso atual 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 (SILVA, 2009).

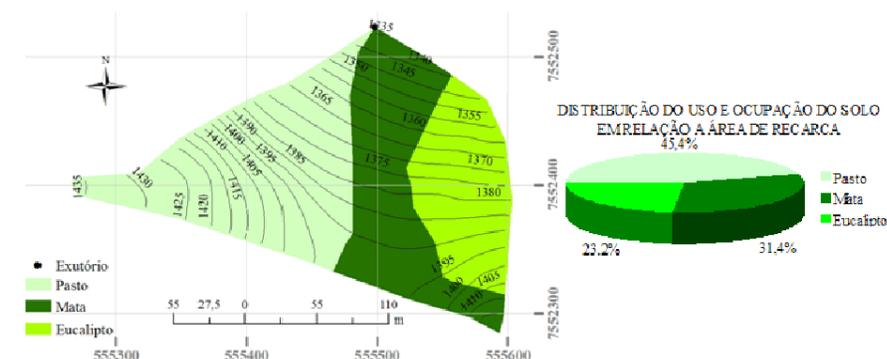


Figura 4 Mapa de uso atual do solo da área de recarga da nascente L4
Fonte: (SILVA, 2009)

Dentre as áreas de recarga analisadas na 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 (SILVA, 2009).

2.1.2 Características morfométricas das áreas de recarga das nascentes

Na Tabela 1 apresenta-se um quadro resumo de algumas das características morfométricas das áreas das nascentes estudadas.

Tabela 1 Características morfométricas das nascentes do Ribeirão Lavrinha

	Nascentes			
	L1	L2	L3	L4
Área (A) (ha)	7,24	2,43	0,87	5,14
Declividade máx. (%)	218,5	70,3	86,5	82,5
Declividade média (I%)	28,7	33,9	38,5	37,1
Declividade mín. (%)	0,5	3,5	3,3	1,8

As dimensões das áreas de recarga das nascentes estudadas variaram muito em função da topografia local, situando-se entre 0,87 e 7,24 ha.

Nas áreas de recarga de nascentes da bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha predominam altitudes variando entre 1160 e 1729 m, enquanto que áreas de recarga de nascentes da bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela predominam altitudes variando entre 991,9 e 1059,2 m.

As áreas de recarga das nascentes estudadas possuem declividades médias que variam na bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha de 28,7 a 38,5% e na bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela de 12,1 a 25,4%. As características da declividade nas áreas de recarga das nascentes podem ser observadas nas Figuras 17 a 24, 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 (SILVA, 2009).

Verifica-se pela Figura 5 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 do 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 (SILVA, 2009).

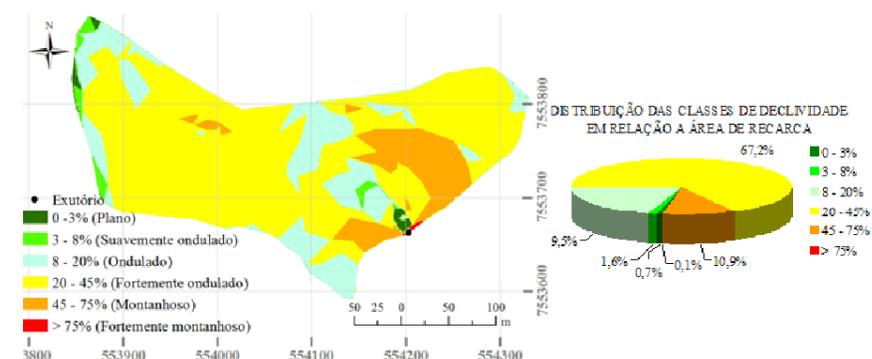


Figura 5 Mapa de classes de declividade da área de recarga da nascente L1
Fonte: (SILVA, 2009)

Pela Figura 6 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 (SILVA, 2009).

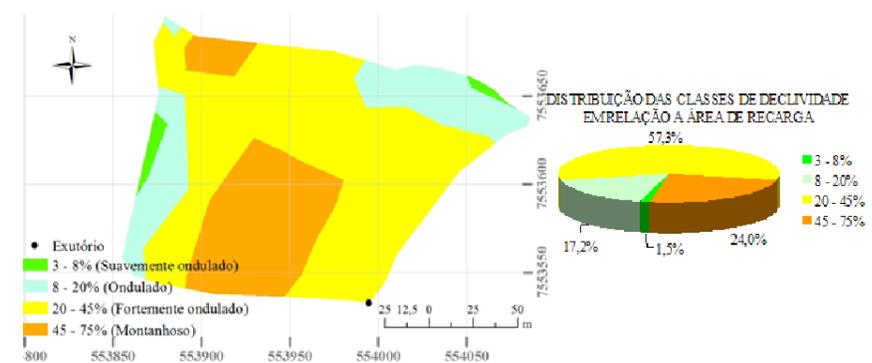


Figura 6 Mapa de classes de declividade da área de recarga da nascente L2
Fonte: (SILVA, 2009)

Na área de recarga da nascente L3 verifica-se pela Figura 7 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 (SILVA, 2009).

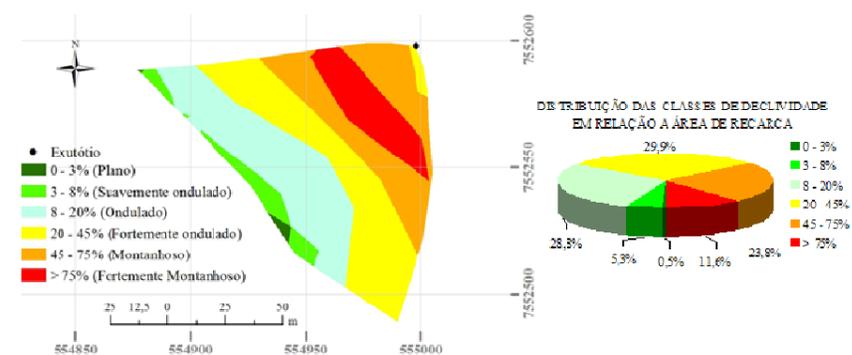


Figura 7 Mapa de classes de declividade da área de recarga da nascente L3
Fonte: (SILVA, 2009)

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 8 (SILVA, 2009).

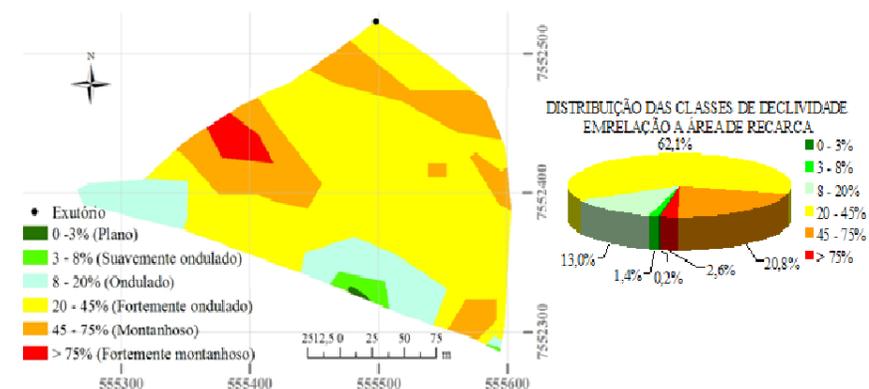


Figura 8 Mapa de classes de declividade da área de recarga da nascente L4
Fonte: (SILVA, 2009)

2.2 Bacia do Ribeirão Marcela inserida no ambiente - Campo das Vertentes

Caracterização das áreas de recarga das nascentes monitoradas.

2.2.1 Mapas de uso atual do solo das áreas de recarga das nascentes estudadas

Na bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela a área de recarga da nascente M1 (Figura 9) com 26,37 ha 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 nenhum tipo de proteção nos locais de afloramentos d'água contra o pisoteio do gado e anualmente, no período seco, há ocorrência de queimadas.

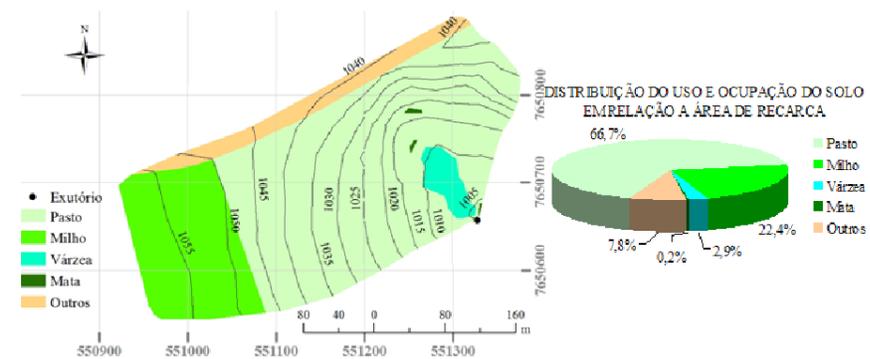


Figura 9 Mapa de uso atual do solo da área de recarga da nascente M1
Fonte: (SILVA, 2009)

A área de recarga da nascente M2 (Figura 10) com 10,47 ha é ocupada por 45% de cultivos anuais, especialmente o milho; 42,6% de regeneração natural da vegetação; 10,1% de mata nativa e 2,3% por outros, sendo estes,

carreadores para manejo e escoamento da produção do milho. No período de pós-colheita e antecedentes à sementeira, a área de cultivos anuais é utilizada para criação de gado. Na nascente M2, no entorno dos locais de afloramento d'água, foi construído pelo proprietário uma cerca restringindo o pisoteio do gado e a dessedentação apenas numa pequena área (SILVA, 2009).

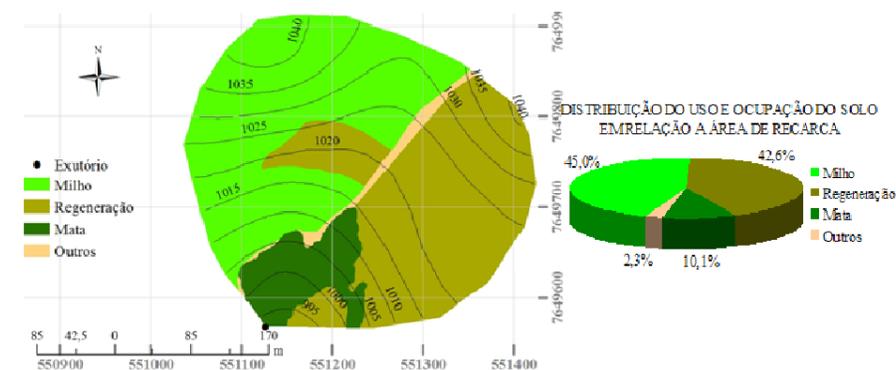


Figura 10 Mapa de uso atual do solo da área de recarga da nascente M2
Fonte: (SILVA, 2009)

A área de recarga da nascente M4 (Figura 11) com 7,20 ha é composta em 47,2% por uma área de regeneração natural; em 37,1% por pastagem e em 15,7% de mata nativa (SILVA, 2009). 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.

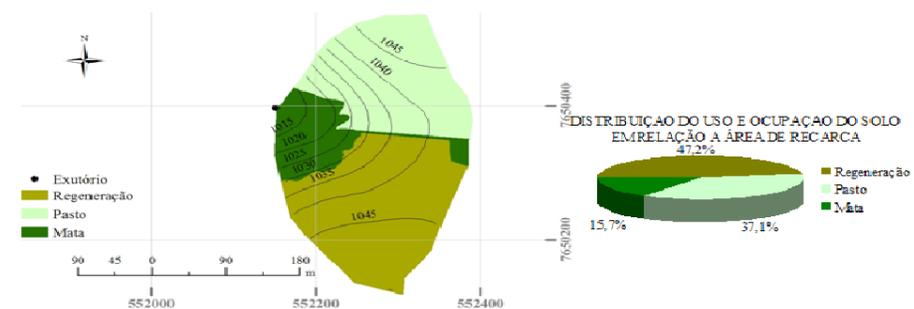


Figura 11 Mapa de uso atual do solo da área de recarga da nascente M4
Fonte: (SILVA, 2009)

A área de recarga da nascente M5 (Figura 12) com 8,45 ha 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 M1 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 (SILVA, 2009). Em uma pequena área na encosta foi feito aração e o solo está exposto, sendo os sedimentos carreados para uma área logo abaixo do exutório.

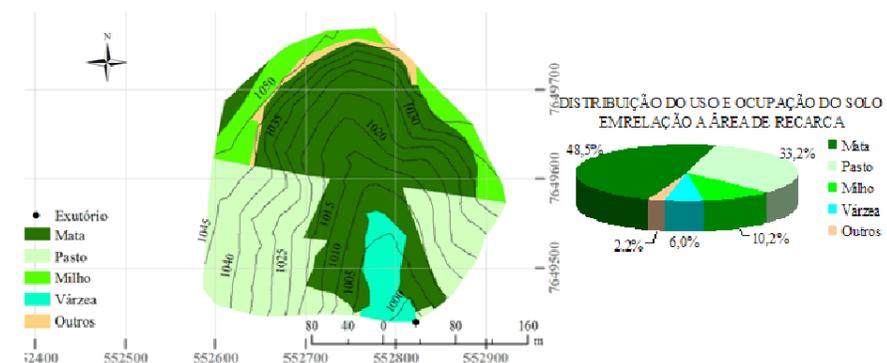


Figura 12 Mapa de uso atual do solo da área de recarga da nascente M5
Fonte: (SILVA, 2009)

2.2.2 Características morfométricas das áreas de recarga das nascentes

Na Tabela 2 apresenta-se um quadro resumo de algumas das características morfométricas das áreas das nascentes estudadas.

Tabela 2 Características morfométricas das nascentes do Ribeirão Marcela

	Nascentes			
	M1	M2	M4	M5
Área (A) (ha)	26,4	10,5	7,2	8,45
Declividade máx. (%)	58,0	22,5	35,2	285
Declividade média (I%)	12,1	13,2	13	25,4
Declividade mín. (%)	0,1	0,3	0,1	0,4

Na área de recarga da nascente M1 (Figura 13) 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 (SILVA, 2009).

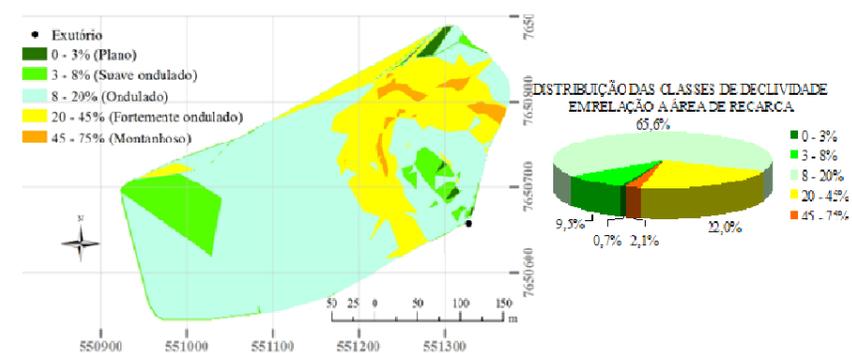


Figura 13 Mapa de classes de declividade da área de recarga da nascente M1
Fonte: (SILVA, 2009)

O relevo da área de recarga da nascente M2 (Figura 14) 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 (SILVA, 2009).

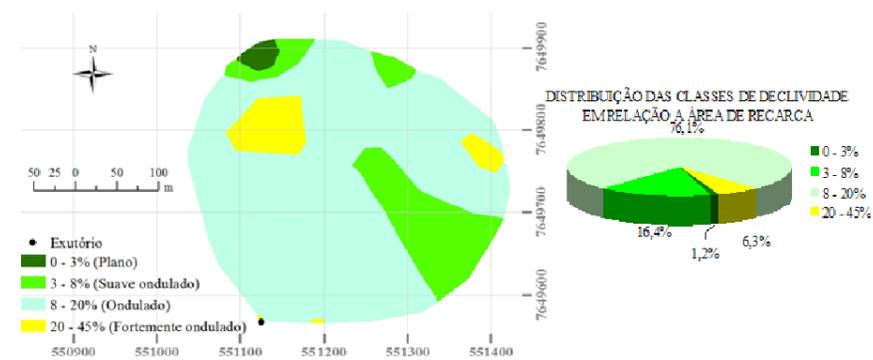


Figura 14 Mapa de classes de declividade da área de recarga da nascente M2
Fonte: (SILVA, 2009)

Já a área de recarga da nascente M4 (Figura 15) 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 (SILVA, 2009).

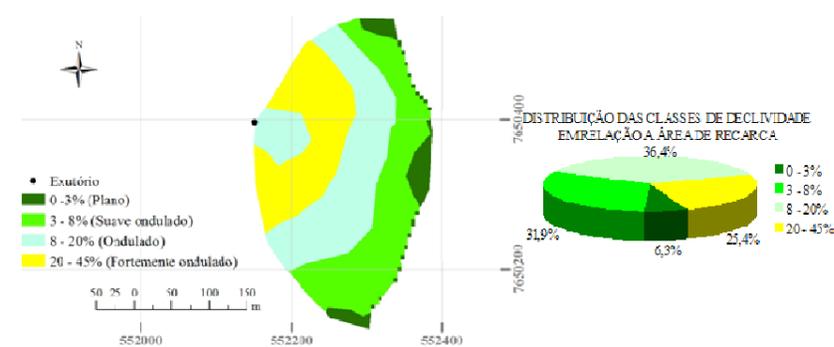


Figura 15 Mapa de classes de declividade da área de recarga da nascente M4
Fonte: (SILVA, 2009)

O relevo da área de recarga da nascente M5 (Figura 16) 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 (SILVA, 2009).

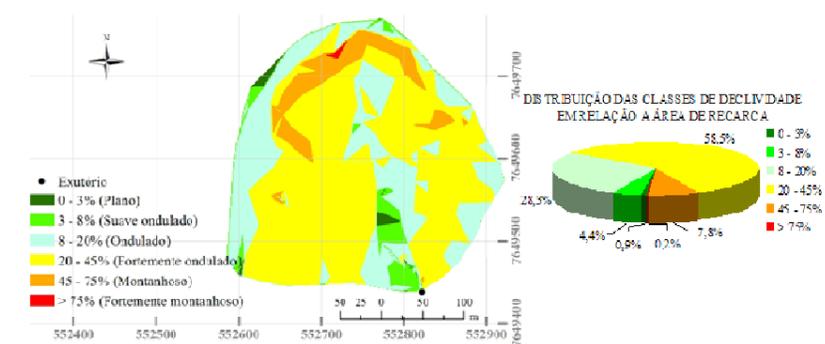


Figura 16 Mapa de classes de declividade da área de recarga da nascente M5
Fonte: (SILVA, 2009)

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.

Na bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela quando se analisa cobertura vegetal e relevo verifica-se que apesar de a agropecuária mais tecnicada e intensiva ser dominante nesta bacia, podendo este fator estar ligado à dominialidade de seus solos ser o Latossolo e possuir um relevo mais suave, suas áreas de recarga de nascentes encontram-se menos predispostas as perdas de água e solo devido a menor declividade do terreno, favorecendo assim os processos de infiltração e percolação e quanto a 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 (SILVA, 2009).

2.3 Análise do escoamento de água

O monitoramento da vazão e do clima promovido nas bacias Lavrinha e Marcela, além daquele realizado nas nascentes, permitiu analisar o comportamento em termos do total escoado (deflúvio) bem como, do período de depleção do lençol superficial de água.

2.3.1 Análise do deflúvio

Com base em dados existentes de vazão desde 2006, para as bacias dos Ribeirões Lavrinhas e Marcela promoveu-se a análise dos mesmos para anos hidrológicos e a separação do escoamento visando estimar a contribuição do escoamento de base, e possibilitar associá-lo aos deflúvios das nascentes monitoradas. O deflúvio foi calculado por intermédio da integração numérica tendo como base os valores médios de vazão entre duas leituras consecutivas.

2.3.2 Análise do escoamento no período de depleção

Foi ajustado pelo método de Newton Raphson um modelo exponencial conforme “Fórmula de Maillet” (CASTANY, 1967) Equação (05), para representar o comportamento temporal da vazão das nascentes, utilizando-se de forma complementar, o coeficiente de determinação (R^2) para verificar a qualidade do ajuste (SILVA, 2009).

$$Q_t = Q_{t_0} \cdot \exp^{-\alpha(t-t_0)} \quad (05)$$

em que, Q_t é a vazão da nascente no tempo t (L^3T^{-1}); Q_{t_0} é a vazão da nascente no tempo t_0 (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_0 é o Dia Juliano correspondente ao início do período de depleção do escoamento subterrâneo e t é o Dia Juliano de interesse, sendo que $t \geq t_0$. 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.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Bacia do Ribeirão Lavrinha – inserida no ambiente da Serra da Mantiqueira

Análise e discussão dos resultados obtidos dos monitoramentos das nascentes L1, L2, L3 e L4.

3.1.1 Modelagem das vazões das nascentes da Bacia do Ribeirão Lavrinha no período de depleção

No Gráfico 1 são apresentados equações das vazões ajustadas ao modelo exponencial “Fórmula de Maillet” (CASTANY, 1967) para as nascentes da bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha, monitoradas no período de 20/03/10 à 11/09/10, obtidas pelo método de Newton Raphson.

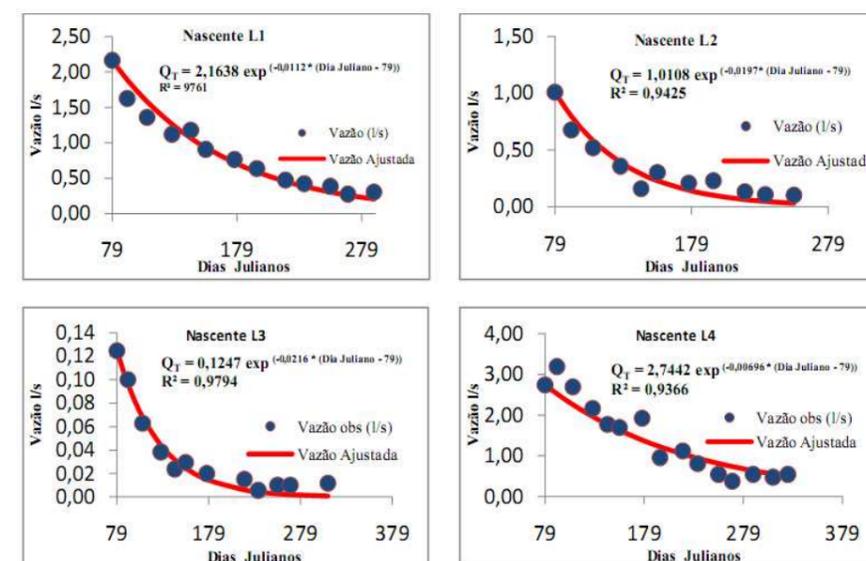


Gráfico 1 Hidrógrafas de depleção das vazões das nascentes monitoradas na bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha no período de 20/03/10 à 11/09/10

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 bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha no período de 20/03/10 à 11/09/10 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 bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha

Nascentes	Q_{t_0} ($L \cdot s^{-1}$)	α (dia^{-1})	R^2
L1	2,16	0,0112	0,97
L2	1,01	0,0197	0,94
L3	0,12	0,0216	0,97
L4	2,74	0,0069	0,93

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.

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 bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha. Para fins comparativos, adotou-se a data referente ao primeiro dia de monitoramento como sendo 20/03/10 e como à vazão mínima registrada em todas nascentes não são correspondentes, adotou-se a data 11/09/10 como sendo representativo da vazão mínima registrada nas nascentes da bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha.

Tabela 4 Decaimento percentual das vazões das nascentes monitoradas na bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha, no período de 20/03/10 à 11/09/10

Nascente	α (dia ⁻¹)	t_0	Q_{t_0}	$Q_{t(11/09)}$	$(Q_t/Q_{t_0}) \cdot 100$ (%)
L1	0,0112	20/mar	2,16	0,3	13,89
L2	0,0197	20/mar	1,01	0,03	2,97
L3	0,0216	20/mar	0,12	0,0028	2,33
L4	0,0069	20/mar	2,74	0,81	29,56

Observando-se a Tabela 8 verifica-se que quanto maior o coeficiente de recessão (α) mais rápido é o decaimento da curva de recessão, conseqüentemente maior a variação de vazão ocorrida entre o primeiro e o último dia analisado, portanto, maior a depleção do lençol superficial.

Quanto menor a variação de vazão entre o primeiro e último dia analisado, maior será a capacidade de manutenção do fluxo durante o período monitorado. Portanto, de acordo como 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 sequência L3, L2, L1 e L4.

Analisando a Tabela 8 conjuntamente com as características de cobertura vegetal, declividade das áreas de recarga das nascentes e unidades pedológicas, verifica-se que o maior coeficiente de recessão (α) e consequentemente a menor variação do fluxo d'água ocorreu na nascente L3 onde o uso atual do solo é constituído basicamente por pastagem e a declividade média é de 38,5% e a unidade pedológica é o CX A fraco forte ondulado, que apresenta baixo potencial de recarga do aquífero. Nas nascentes L2 e L1 onde os coeficientes de recessão (α) são respectivamente 1,09 e 1,92 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 1,3 e 5,9 vezes maior que o da nascente L3, sendo que na área de recarga L2 o uso atual do solo é de mata nativa e pasto, a declividade média é de 33,9%, unidade pedológica é CX A moderado forte ondulado, com baixo potencial para recarga do aquífero, já na área de recarga L1 o uso atual do solo é pastagem, samambaia e mata, a declividade média é de 28,7% e possuiu a mesma unidade pedológica , CX A moderado forte ondulado. Na nascente L4 ocorreu o menor coeficientes de recessão (α), sendo este em torno de 3,13 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 12,7 vezes maior, sendo o uso atual do solo nesta área de recarga composto basicamente por pastagem, mata nativa e eucalipto, com declividade média de 37,1% e unidade pedológica sendo

CX A fraco forte moderado. Em anexo (Tabela 1A) encontram-se todas as vazões monitoras.

3.1.2 Rendimento específico das nascentes

A partir das vazões médias mensais das nascentes monitoradas na 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 Gráfico 2.

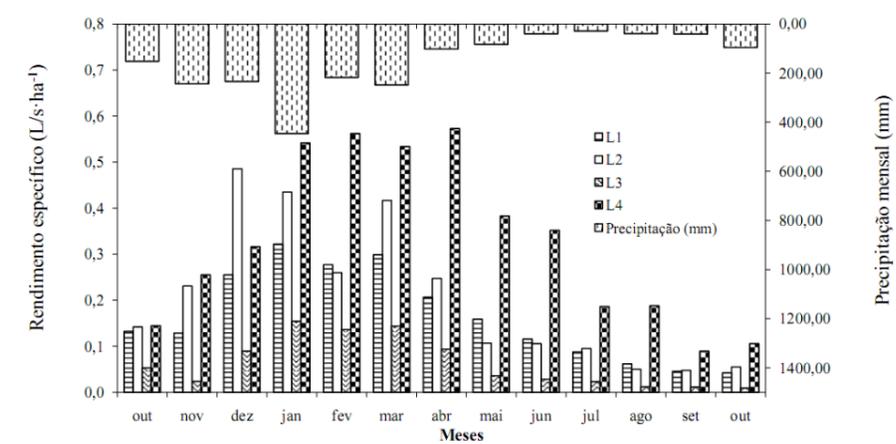


Gráfico 2 Rendimento específico apresentado pelas nascentes monitoradas na bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha no período de outubro de 2009 a outubro de 2010

A análise do Gráfico 2 permite verificar o comportamento temporal do rendimento específico das nascentes monitoradas na bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha, onde o total precipitado no intervalo de tempo analisado foi de 1975 mm. A nascente L1, cujo uso atual 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% e unidade pedológica sendo CX A moderado forte ondulado, que apresenta baixo potencial para recarga o aquífero, apresentou rendimento máximo de $0,32 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{ha}^{-1}$ no mês de janeiro, sendo no mês de outubro referente ao rendimento mínimo no período, correspondendo a um rendimento específico de $0,04 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{ha}^{-1}$.

Na área de recarga da nascente L2, onde o uso atual do solo é de mata e pastagens (67,1 e 32,9% respectivamente), a topografia constitui de 57,3% de relevo fortemente ondulado com declividade média de 33,9% e unidade pedológica sendo CX A moderado forte ondulado, que apresenta baixo potencial para recarga o aquífero, apresentou rendimentos específicos, máximo e mínimo nos meses de janeiro e agosto correspondendo a $0,44$ e $0,05 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{ha}^{-1}$ respectivamente. Na área de recarga da nascente L3, onde o uso atual do solo é 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% e unidade pedológica sendo CX A fraco forte ondulado, que apresenta baixo potencial para recarga o aquífero, apresentou rendimentos específicos, máximo e mínimo nos meses de dezembro e outubro correspondendo a $0,17$ e $0,01 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{ha}^{-1}$ respectivamente. 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% e unidade pedológica sendo CX A fraco forte ondulado, que apresenta baixo potencial para recarga o aquífero, apresentou no mês de abril, rendimento máximo de $0,57 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{ha}^{-1}$ e no mês de setembro rendimento mínimo de $0,09 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{ha}^{-1}$.

Verifica-se que existem relações importantes entre as condições de uso atual do solo, característica topográfica e manejo do solo com o rendimento específico das nascentes, sendo a capacidade de produção específica de água é

muito variável em conformidade com cada ambiente. Nas nascentes L1, L2 e L4, onde a declividade encontra-se em intervalos próximos e o uso atual do solo em sua maioria é composto principalmente por mata, nas áreas L2 e L4 e por pastagem na área L1, verificou-se maior capacidade de produção específica de água em regiões de mata quando comparado à região ocupada por pastagem.

3.1.3 Deflúvio da bacia do Ribeirão Lavrinha

A síntese dos deflúvios e da precipitação monitorados no período 2009 a 2010 está apresentada na Tabela 8, onde se identifica de forma evidente o regime pluvial abundante na bacia do Ribeirão Lavrinha e conseqüentemente maior disponibilidade para gerar escoamento superficial. Em termos relativos (D/P), para o ano hidrológico 2009-2010, tem-se em média 38% e uma participação expressiva do componente escoamento base no deflúvio total (Db/D), da ordem de 82,3%. Em termos do percentual da precipitação que foi convertido em deflúvio base, este corresponde a 31,2%. Este indicador é muito útil no contexto de recarga uma vez que expressa a capacidade da bacia em termos de armazenamento de água na zona saturada. Com base neste indicador, é possível concluir a respeito da maior capacidade de produção de água na bacia do ribeirão Lavrinha.

Tabela 5 Síntese da análise do deflúvio anual da bacia do Ribeirão Lavrinha

Ano hidrológico	P (mm)	D (mm)	Db (mm)	α (mês ⁻¹)	(D/P) %	(Db/D) %	(Db/P) %
2009-2010	2162	820,4	675,2	0,155	38	82,3	31,2

P = precipitação; D = deflúvio; α = coeficiente de recessão; Db = Deflúvio base

3.1.4 Deflúvio das nascentes da bacia do ribeirão Lavrinha

A Tabela 6 apresenta o deflúvio total em volume (L) e em lâmina (mm) e a vazão média diária (L/dia) para o período monitorado.

Tabela 6 Deflúvio total em volume (L), em lâmina (mm) e vazão média diária do período (L/s) das nascentes monitoradas

Nascente	Deflúvio base (L)	Deflúvio base (mm)	Vazão média diária (L/s)
L1	37260544,29	514,90	1,21
L2	15282792,60	630,00	0,49
L3	1656027,56	190,80	0,05
L4	55310112,60	1075,30	1,79
Média ponderada	18151312,87	698,70	1,23

O deflúvio em lâmina na bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha variou de 190,8 a 1075,3 mm. No contexto uso atual do solo, o maior deflúvio ocorreu em uma área de 5,14 ha onde o uso atual do solo é composto por pastagem, mata nativa e eucaliptos correspondendo à área L4 conforme Figura 11 e o menor refere-se à área de recarga L3 de 0,87 ha onde o uso atual do solo é essencialmente de pastagem conforme Figura 10. Considerando a declividade média das áreas de recarga, a área L4, apresenta declividade média de 37,1%, já a área L2, a declividade média é de 33,9%. Provavelmente a área L4 tem maior capacidade de geração de deflúvio base devido ao uso atual do solo, que é composto por pastagem, mata nativa e eucalipto. Já a nascente L2, apresenta menor declividade média, 33,9%, porém, o uso atual do solo é essencialmente pastagem. Do ponto de vista pedológico, as nascentes L1 e L2 estão sob as mesmas unidades pedológicas, CX A moderado forte ondulado, já as nascentes L3 e L4, apresentam as unidades pedológicas CX A fraco forte ondulado, conforme Figura 4. De acordo com a Tabela 7, as unidades pedológicas das quatro nascentes apresentam baixo potencial de recarga do aquífero,

demonstrando novamente a importância do uso atual do solo, pois as áreas de recarga que apresentam maiores áreas com mata apresentam maior capacidade de geração de deflúvio base.

Tabela 7 Classes de solos, tipos de horizonte A, fases de relevo, potencial de recarga e suas respectivas extensões (ha) e porcentagens da bacia do ribeirão Lavrinha

Classes de solo	Tipos de horizonte A	Fase de relevo	Potencial de recarga	Área (ha)	%
CX	Fraco	Forte ondulado	Baixo	94,2	13,7
CX	Moderado	Forte ondulado	Baixo	281,4	41,0
CX	Moderado	Montanhoso	Baixo	183,0	26,6
CX	Moderado	Ondulado	Baixo	23,0	3,3
CX	Proeminente	Forte ondulado	Baixo	24,0	3,5
CX	Proeminente	Montanhoso	Baixo	27,0	3,9
RY	Moderado	Plano	bom	48,6	7,1
GX	Moderado	Plano	bom	5,8	0,8
Total				687	100

CX - Cambissolo Háplico; RY - Neossolo Flúvico; GX Gleissolo Háplico
Fonte: Adaptado de Menezes (2007)

Com a constatação do baixo potencial para recarga de aquíferos dos solos desta sub-bacia, com base dos atributos pedológicos, uma das alternativas para minimizar esses efeitos é a manutenção de uma eficiente cobertura vegetal, com plantas de baixo consumo hídrico. Nesse ambiente, os declives acentuados tornam esses solos mais expostos à erosão. A fração orgânica em equilíbrio com a cobertura vegetal tem, portanto, a função de gerar cargas e ciclar nutrientes, sendo esses mecanismos importantes para o controle da qualidade da água (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA- EMBRAPA, 2003).

Uma vez que essa cobertura vegetal esteja mantida, ocorre o retardamento da movimentação de água em direção aos cursos, reduzindo o

escoamento superficial, produzindo, até mesmo, um efeito tampão na capacidade de retenção de água pelos solos em períodos maior concentração de chuvas (CARDOSO et al., 2006).

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.

3.1.5 Comparações entre o deflúvio base das nascentes da bacia do Ribeirão Lavrinha com o deflúvio base da bacia

Com uma série histórica de vazão entre de setembro de 2009 e agosto de 2010, foi obtido o deflúvio mensal da bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha, sendo este apresentado no Gráfico 3.

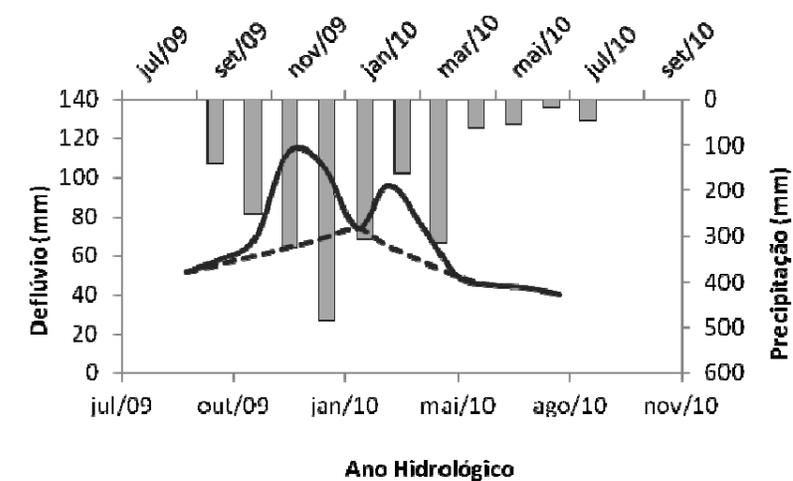


Gráfico 3 Quantificação do deflúvio no período entre setembro de 2009 e agosto de 2010 da bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha

A bacia do Ribeirão Lavrinha apresenta regime pluviométrico elevado, possibilitando maior disponibilidade para gerar escoamento superficial e também escoamento base. Apresenta declividade média de 38,5% e domínio dos Cambissolos, que apresentam baixo potencial de recarga do aquífero. Essa deficiência na recarga do aquífero, provavelmente, esta sendo minimizado pela presença da mata Atlântica, existente na bacia. No gráfico 3 fica evidente o aumento do deflúvio com a elevação da precipitação, entre os períodos de setembro de 2009 e março de 2010, onde esta ocorrendo o processo de recarga do aquífero, e a sua diminuição a partir do mês de março com a redução da precipitação, quando passa a vigorar praticamente o deflúvio de base. A precipitação no período foi de 2162 mm, sendo o deflúvio 820,40 mm correspondendo a 37,95% do total precipitado. Já o escoamento de base atingiu o valor de 675,48 mm, equivalendo a 82,33% do deflúvio e 31,24% da precipitação.

A tabela 8 mostra os resultados comparativos entre o deflúvio base total da bacia do Ribeirão Lavrinha (setembro de 2009 a agosto de 2010) com o deflúvio base médio entre as quatro nascentes da bacia (outubro de 2009 a outubro de 2010).

Tabela 8 Deflúvio base da bacia e deflúvio base médio entre as nascentes

Identificação	Deflúvio base (mm)	% (D/P)
Nascentes Rib. Lavrinha	698,7	28,11
Bacia Rib. Lavrinha	675,20	31,23

O deflúvio entre as quatro nascentes monitoradas na bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha, foi de 698,7 mm entre os meses de outubro de 2009 e outubro de 2010 e a precipitação total de 2485 mm. O deflúvio corresponde a 28,11% do total precipitado no período monitorado, corresponde a 85,16% do deflúvio médio da bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha, demonstrando a grande importância na conservação dessas nascentes, pois há uma contribuição significativa para o deflúvio da bacia.

3.2 Bacia do Ribeirão Marcela inserida no ambiente - Campo das Vertentes

Análise e discussão dos resultados obtidos dos monitoramentos das nascentes M1, M2, M4 e M5.

3.2.1 Modelagem das vazões das nascentes da Bacia do Ribeirão Marcela no período de depleção

No Gráfico 4, são apresentados os gráficos das vazões monitoradas no período de 20/03/10 à 11/09/10e as equações ajustadas pelo método de Newton

Raphson, modelo exponencial (Fórmula de Maillet) conforme Castany (1967) para as nascentes da bacia do Ribeirão Marcela.

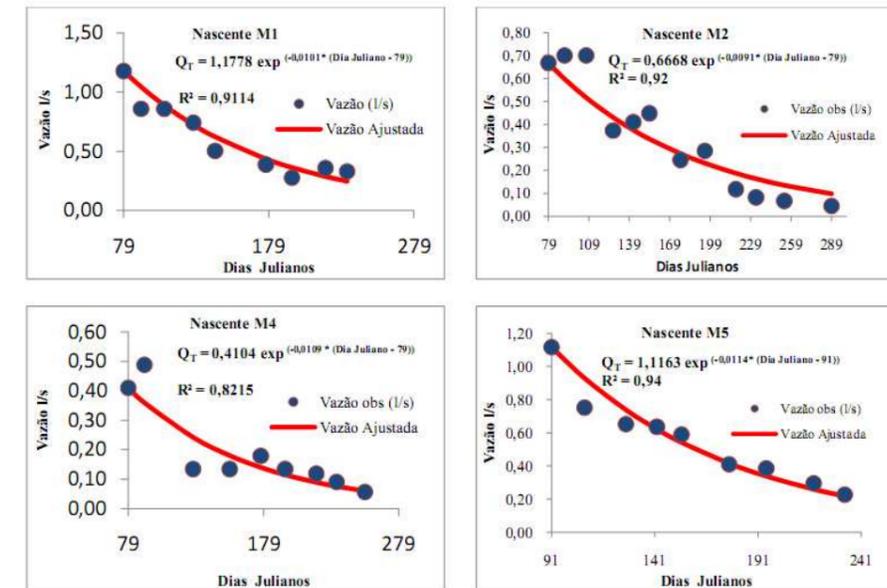


Gráfico 4 Hidrógrafas de depleção das vazões das nascentes monitoradas na bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela no período de 20/03/10 à 11/09/10

Pela Tabela 9, verifica-se através dos valores do coeficiente de determinação (R^2) (todos acima de 0,90, exceto para a nascente M4) o comportamento temporal das vazões das nascentes monitoradas na bacia do Ribeirão Marcela no período de 20/03/10 à 11/09/10, também é muito bem representado pelo modelo exponencial. Uma particularidade ocorreu no ajuste do modelo exponencial à nascente M4, 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 2A) encontram-se todas as vazões monitoras.

Tabela 9 Coeficientes das equações ajustadas para as vazões e respectivos coeficientes de determinação (R^2) referentes aos ajustes para as nascentes monitoradas na bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela

Nascentes	Q_{10}^* (L·s ⁻¹)	α (dia ⁻¹)	R^2
M1	1,17	0,0101	0,91
M2	0,66	0,0091	0,92
M4	0,41	0,0110	0,82
M5	1,11	0,0114	0,94

* - vazão da nascente no primeiro dia do período de depleção

A Tabela 10 apresenta um comparativo do percentual de depleção da vazão em cada nascente, ocorrido do início ao fim do período de monitoramento das vazões na bacia do Ribeirão Marcela. Os dias 01/04/10 e 21/08/10 foram utilizados neste comparativo como referentes à vazão máxima e mínima. 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 10 Decaimento percentual das vazões das nascentes monitoradas na bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, no período de 01/4/10 à 21/08/10

Nascentes	α (dia ⁻¹)	t_0	Q_{10}	$Q_{t(21/08)}$	$(Q_t/Q_{10}) \cdot 100$ (%)
M1	0,0101	01/abr	1,05	0,25	23,81
M2	0,0091	01/abr	0,59	0,16	27,12
M4	0,0110	01/abr	0,36	0,08	22,22
M5	0,0114	01/abr	1,11	0,22	19,82

Conforme discutido o significado e importância do coeficiente α quando se apresentou a modelagem da vazão para as nascentes monitoradas na bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha, cabe agora ordenar as nascentes monitoradas na bacia 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 M5, M4, M1 e M2.

Analisando a Tabela 17 conjuntamente com as características de cobertura vegetal, declividade das áreas de recarga das nascentes e unidades pedológicas, verifica-se que o maior coeficiente de recessão (α) e consequentemente a menor capacidade de manutenção do fluxo d'água ao longo do ano, ocorreu na nascente M5 onde o uso atual do solo é constituído por mata nativa, pastagem e cultura do milho e a declividade média é de 25,4%, sobre a unidade pedológica não se pode concluir por não haver dados sobre a pedologia. Na nascente M4 onde o coeficiente de recessão (α) é 0,96 vezes menor que o coeficiente de recessão (α) da nascente M5, pode-se observar que a capacidade de manutenção do fluxo d'água ao longo do ano nesta nascente foi 1,12 vezes maior que o da nascente M5, sendo que o uso atual do solo é composto Regeneração natural, pastagem e mata nativa, a declividade média é de 13% e a unidade pedológica dominante em aproximadamente metade da área é o Cambissolo (C), sendo o restante Latossolo Vermelho Amarelo (LVA) e uma pequena área de Solo Hidromórfico. A presença do Cambissolo pode sinalizar a baixa capacidade de manutenção do fluxo d'água durante o ano, devido ao baixo potencial de recarga do aquífero, conforme discutido anteriormente. Na nascente M1 onde o coeficiente de recessão (α) é 0,89 vezes menor que o coeficiente de recessão (α) da nascente M5, pode-se observar que a capacidade de manutenção do fluxo d'água ao longo do ano nesta nascente foi 1,2 vezes maior que o da nascente M5, sendo que o uso atual do solo é composto por pastagem, milho e outros, a declividade média é de 12,1% e as unidades

pedológicas existentes na área são o Latossolo em aproximadamente 2/3 da área e o restante sendo o Cambissolo. Provavelmente pelo fato da maior área estar ocupada pelo Latossolo, ocorre uma maior pré-disposição para a recarga do aquífero e conseqüentemente, maior contribuição para o deflúvio base. Na nascente M2 onde o coeficiente de recessão (α) é 1,25 vezes menor que o coeficiente de recessão (α) da nascente M5, pode-se observar que a capacidade de manutenção do fluxo d'água ao longo do ano nesta nascente foi 1,37 vezes maior que o da nascente M5, sendo que o uso atual do solo é composto por culturas anuais, especialmente o milho, regeneração natural e mata nativa, a declividade média é de 13,2%, e a unidade pedológica predominante é Latossolo e uma pequena área de solo Hidromórfico. As características de uso atual do solo associado à declividade média e a unidade pedológica da área de recarga da nascente M2, contribuem para a manutenção do fluxo d'água ao longo do ano.

3.2.2 Rendimento específico das nascentes

Os rendimentos específicos médios mensais ($L \cdot s^{-1} \cdot ha^{-1}$) das nascentes monitoradas na bacia do Ribeirão Marcela e as precipitações mensais para os meses monitorados são mostrados no Gráfico 5.

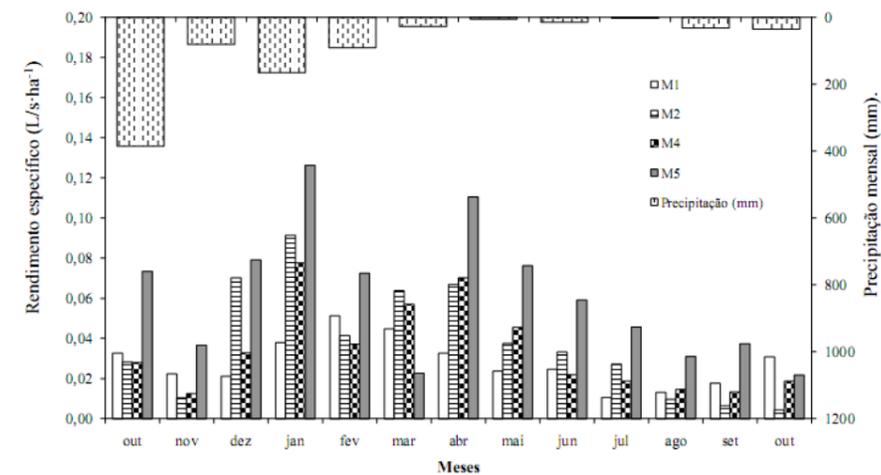


Gráfico 5 Rendimentos específicos apresentado pelas nascentes monitoradas na bacia do Ribeirão Marcela no período de outubro de 2009 a outubro de 2010

A análise do Gráfico 5 permite verificar o comportamento temporal do rendimento específico das nascentes monitoradas, onde o total precipitado no intervalo de tempo analisado foi de 1070 mm. A nascente M1, na qual o uso atual do solo constitui-se basicamente, em 66,7% do seu total por pastagem e 22,4% por milho e possui grande parte o relevo, classificado como ondulado, declividade média de 17% e as unidades pedológicas Latossolo e Cambissolo, apresentou no ano de 2010 rendimentos específicos máximos e mínimo de 0,05 e 0,01 $L \cdot s^{-1} \cdot ha^{-1}$ respectivamente nos meses de fevereiro e julho. 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% e predominância do Latossolo na maioria de sua área, o rendimento específico máximo foi no mês de janeiro e o mínimo no mês de outubro, correspondendo a 0,09 e 0,004 $L \cdot s^{-1} \cdot ha^{-1}$ respectivamente. Já na nascente M4 o rendimento específico máximo foi de 0,09 $L \cdot s^{-1} \cdot ha^{-1}$ ocorrendo no mês de dezembro e o rendimento específico mínimo foi

de $0,01 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{ha}^{-1}$ ocorrendo no mês de setembro, 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%, com as unidades pedológicas Cambissolo em aproximadamente metade da área, sendo o restante uma pequena área de Solo Hidromórfico e Latossolo Figura 6 do capítulo 1.

A nascente M5 caracterizada em sua maioria pelo uso atual do solo com mata nativa e relevo fortemente ondulado, com declividade média de 25,4%, apresentou no mês de dezembro rendimento específico máximo de $0,127 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{ha}^{-1}$ e no mês de outubro, rendimento específico mínimo de $0,02 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{ha}^{-1}$.

As precipitações que ocorreram no período de outubro de 2009 a outubro de 2010 na bacia 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 bacia apresentar a menor declividade média, 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 atual 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 1A e 2A que seguem em anexo.

3.2.3 Deflúvio da bacia do Ribeirão Marcela

A síntese dos deflúvios e da precipitação monitorados no período 2006 a 2010 está apresentada na Tabela 11. Em termos relativos (D/P), tem-se em média 35,7% e uma participação do componente escoamento base no deflúvio total (Db/D), da ordem 63,8%. Em termos do percentual da precipitação que foi convertido em deflúvio base, uma participação de 22,8%. O Latossolo é a unidade pedológica predominante em 60% da área da bacia, embora, este solo apresente bom potencial de recarga do aquífero, a participação do (Db/D) é baixa, uma possível explicação seja o menor regime pluviométrico na região que estaria restringindo parcialmente a recarga.

Tabela 11 Síntese da análise do deflúvio anual da bacia do Ribeirão Marcela

Ano hidrológico	P (mm)	D (mm)	Db (mm)	α (mês⁻¹)	(D/P) %	(Db/D) %	(Db/P) %
2009-2010	1708	609,2	388,7	0,219	35,7	63,8	22,8
MÉDIA	1601,3	561,3	320,31	0,247	34,58	58,93	19,78

P = precipitação; D = deflúvio; α = coeficiente de recessão; Db = Deflúvio base

3.2.4 Deflúvio das nascentes da bacia do Ribeirão Marcela

A Tabela 12 apresenta o deflúvio total em volume (L) e em lâmina (mm) e a vazão média diária (L/dia) para o período monitorado.

Tabela 12 Deflúvio total em volume (L), em lâmina (mm) e vazão média diária do período (L/s) das nascentes monitoradas

Nascentes	Deflúvio base (L)	Deflúvio base (mm)	Vazão média diária (L/s)
M1	22350860,08	244,40	0,73
M2	12297108,52	117,40	0,40
M4	6957766,42	96,70	0,23
M5	16630958,42	196,80	0,54
Média ponderada	3984932,99	165,15	0,48

Na bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela o deflúvio variou de 96,7 a 244,4 mm. Analisando o uso atual do solo, o maior deflúvio ocorreu na área de recarga (M1) de 9,14 ha em que o uso atual do solo é essencialmente pastagem e milho conforme Figura 13 e o menor deflúvio ocorreu em uma área (M4) de 7,19 ha em que o uso atual do solo é regeneração natural, pastagem e mata nativa conforme Figura 15. Considerando a declividade média, a área de recarga M1 apresenta declividade média de 12,1% e a M4 de 13%, apresentando coerência entre o deflúvio e a declividade, pois, a menor declividade favorece a infiltração, pela redução do escoamento superficial. No contexto pedológico, a área de recarga da nascente M1 apresenta em aproximadamente 2/3 de sua área Latossolo Vermelho Amarelo (LVA) e Latossolo Vermelho distrófico típico (LEd), e no restante o Cambissolo (C) Figura 6. A maior presença dos Latossolos na área aliado a menor declividade média pode estar contribuindo para maior recarga do aquífero e conseqüentemente maior contribuição no deflúvio base. Na área de recarga M4, há predominância em aproximadamente metade da área do Cambissolo (C), no restante ocorre a presença do Latossolo Vermelho Amarelo (LVA) e uma pequena área de Solos Hidromórficos Figura 6. O Cambissolo presente em maioria na área pode estar contribuindo para a menor recarga do aquífero, pois como já discutido neste capítulo, são solos com baixo potencial de recarga do aquífero. Na área de recarga M2 ocorre a predominância na maioria de sua área dos Latossolos, sendo em maior parte o

Latossolo Vermelho Amarelo, pequena área do Latossolo Vermelho distrófico típico e solo Hidromórfico. Já a área de recarga M5, não se pode relacionar com a pedologia do solo, pois a mesma se encontra fora da área da bacia do Ribeirão Marcela, logo, sem dados pedológicos.

3.2.5 Comparações entre o deflúvio base das nascentes da bacia do Ribeirão Marcela com o deflúvio base da bacia

Com uma série histórica de vazão entre setembro de 2009 e agosto de 2010, foi obtido o deflúvio da bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, sendo apresentado no Gráfico 6.

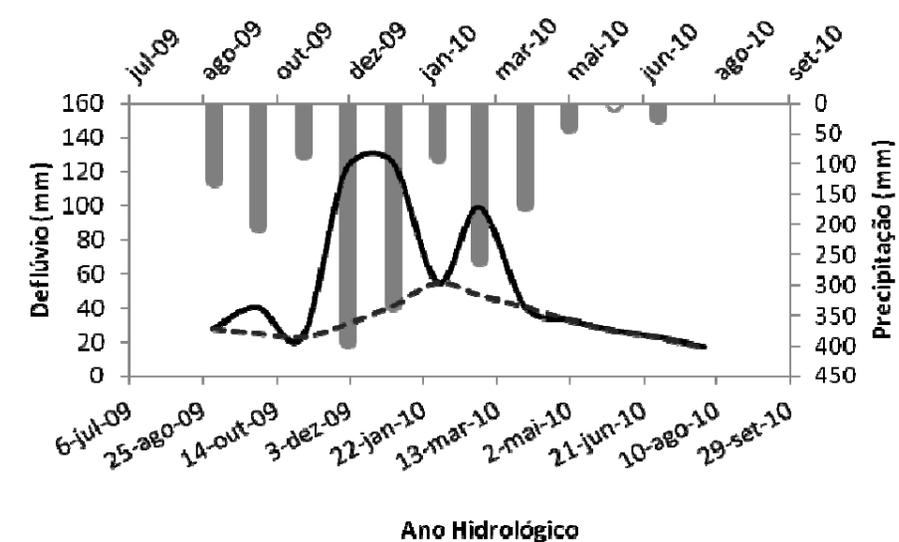


Gráfico 6 Quantificação do deflúvio no período entre setembro de 2009 e agosto de 2010 da bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela

A bacia do Ribeirão Marcela apresenta o domínio dos Latossolos em aproximadamente 60% de sua área. Estes solos apresentam bom potencial de

recarga do aquífero, conforme já discutido anteriormente. Analisando a figura 43, verificamos que há um aumento do deflúvio com aumento da precipitação, ocorrendo recarga do aquífero. A partir do mês de março com a redução da precipitação o deflúvio também diminui atingindo o escoamento de base. A precipitação no período foi de 1708 mm, sendo o deflúvio 609,2 mm correspondendo a 35,67% do total precipitado. Já o escoamento de base atingiu o valor de 388,88 mm, sendo este valor 63,83% do deflúvio e 22,77% da precipitação.

A Tabela 13 mostra os resultados comparativos entre o deflúvio base total da bacia do Ribeirão Marcela (setembro de 2009 a agosto de 2010) com o deflúvio base médio entre as quatro nascentes da bacia (outubro de 2009 a outubro de 2010).

Tabela 13 Deflúvio base da bacia e deflúvio base médio entre as nascentes

Identificação	Deflúvio base (mm)	% (Db/P)
Nascentes Rib. Marcela	165,15	8,44
Bacia Rib. Marcela	529,48	31,00

Para a bacia do Ribeirão Marcela o deflúvio base médio entre as nascentes foi de 165,15 mm entre os meses de outubro de 2009 e outubro de 2010 e a precipitação total foi de 1955 mm. Este deflúvio corresponde a 8,44% do total precipitado no período e a 31,19% do deflúvio médio da bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela. O deflúvio base médio das nascentes está muito abaixo do deflúvio base total da bacia, uma possível explicação pode ser a superestimação das áreas de recarga das nascentes. Outra explicação pode ser a presença do Cambissolo nas áreas de recarga das nascentes M1 e M4, reduzindo a capacidade de recarga do aquífero e conseqüentemente do deflúvio base.

4 CONCLUSÕES

- a) Os indicadores utilizados para caracterizar a dinâmica do escoamento das nascentes do Ribeirão Lavrinha, mostraram consistência com os obtidos para a bacia como um todo. Sinalizando para uma boa estimativa das áreas de recarga das nascentes, pois as mesmas influenciam em todo o processo de quantificação do escoamento.
- b) A bacia do Ribeirão Lavrinha mostrou maior capacidade de regularização natural das vazões, conseqüentemente da maior participação no escoamento base no deflúvio total.
- c) O processo de recarga do aquífero superficial ou livre se mostrou mais eficaz na bacia do Ribeirão Lavrinha fruto da combinação solo cobertura vegetal.
- d) Por outro lado para a bacia do Ribeirão Marcela, os indicadores de deflúvio de base não guardam consistência com os obtidos para a bacia como um todo, o que pode sinalizar uma possibilidade de haver erro considerável na estimativa das áreas de recargas, sobretudo se considerar-se que tanto os solos como o relevo superficial, em especial, se mostram potencialmente favoráveis ao processo de infiltração e recarga.

REFERÊNCIAS

CARDOSO, C. A. et al. Caracterização hidroambiental da bacia hidrográfica do rio Debossan, Nova Friburgo, RJ. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 30, n. 2, p. 249-256, 2006.

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

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA.
Caracterização dos solos em duas topossequências sobre diferentes litologias em áreas altimontanas na Serra da Mantiqueira. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2003. 31 p. (Documentos, 57).

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, 2006.

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

SILVA, L. A. **Regime de escoamento e recarga subterrânea de nascentes na região do Alto Rio Grande, MG**, 2009. 134 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

CAPÍTULO 3

**DINÂMICA DE RECARGA EM NASCENTES NA REGIÃO DO ALTO
RIO GRANDE, MG**

RESUMO

O monitoramento de aquíferos é praticado há décadas. Este trabalho intensificou-se nos últimos anos com os problemas crescentes da contaminação dos aquíferos, da superexploração e de suas consequências ambientais. As informações obtidas de uma rede de monitoramento são essenciais para detectar os impactos de mudanças do clima e de atividades humanas na quantidade e na qualidade dos aquíferos. Este trabalho apresenta o método de flutuação das superfícies livres (*Water Table Fluctuation* - WTF) para estimativa da recarga direta, e um balanço hídrico na zona não saturada do solo. O método WTF utiliza dados de monitoramento do nível do aquífero e a porosidade drenável (S_y) do solo 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 três áreas de recarga de nascentes, L1 pertencente à bacia do Ribeirão Lavrinha e as nascentes M1 e M5, da bacia do Ribeirão Marcela no período de outubro de 2009 a outubro de 2010. As estimativas de recarga foram de 456,94, 214,78 e 264,70 mm/ano, nas áreas de recarga L1, M1 e M5, respectivamente. O balanço hídrico realizado na zona não saturada do solo apresentou um saldo de 1082,65, 750,78 e 686,43 mm/ano, respectivamente para as áreas de recarga L1, M1 e M5. Estes valores são suficientes para suprir às possíveis deficiências naturais de umidade na zona não saturada do perfil e promover a recarga do aquífero.

Palavras-chave: Nascentes. Recarga aquífero. WTF.

ABSTRACT

The monitoring of groundwater has been practiced for decades. This work has intensified in recent years with the growing problems of contamination of aquifers from overexploitation and environmental consequences. Information obtained from a monitoring network is essential to detect the impacts of climate change and human activities in the quantity and quality of aquifers. This paper presents the method of free surface fluctuation (Water Table Fluctuation - WTF) to estimate direct recharge and water balance in the unsaturated zone soil. The WTF method uses data to monitor the level of the aquifer and the drainable porosity (S_y) of the soil to determine the direct recharge. The underground water balance assumes direct recharge estimated by the WTF as the water entering the system and exits as the base flow and deep recharge. Estimates of recharge were applied to three recharge areas of sources; L1 belongs to the basin of Lavrinha Stream and sources M1 and M5, the basin of Marcela Stream from October 2009 to October 2010. Estimates of recharge were 456.94, 214.78 and 264.70 mm / year in the recharge areas L1, M1 and M5, respectively. The water balance in the unsaturated zone soil had a balance of 1082.65, 750.78 and 686.43 mm / year respectively for the recharge areas L1, M1 and M5. These values are sufficient to meet the possible shortcomings of natural moisture in the unsaturated zone of the profile and promote aquifer recharge.

Keywords: Springs. Aquifer recharge. WTF.

1 INTRODUÇÃO

O Brasil ainda apresenta uma deficiência séria no conhecimento do potencial hídrico de seus aquíferos, seu estágio de exploração e a qualidade das suas águas. Os estudos regionais são poucos e encontram-se defasados. As maiores partes dos estudos de qualidade da água subterrânea publicados mais recentemente têm caráter mais localizado. A questão da vulnerabilidade e proteção dos aquíferos é ainda um tema pouco explorado e ainda necessita ser incorporado à gestão das águas subterrâneas e ao planejamento do uso e ocupação territoriais.

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 (SILVA, 2009). 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.

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 de um balanço hídrico na zona não saturada do solo no período de outubro de 2009 a outubro de 2010, em três áreas de recarga de nascentes da região do Alto Rio Grande, sendo uma na bacia do Ribeirão Lavrinha e duas na bacia do Ribeirão Marcela.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Poços de observação do aquífero não confinado

Nas nascentes L1, M1 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 outubro de 2009 a outubro de 2010. 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 1 a 3 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 (SILVA, 2009).

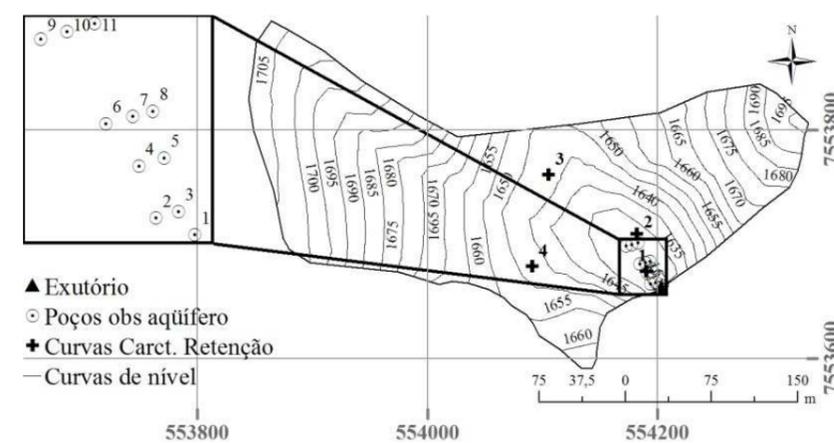


Figura 1 Mapa da nascente L1 com seus respectivos poços de observação do lençol freático e pontos onde foram determinadas as curvas características de retenção de água no solo

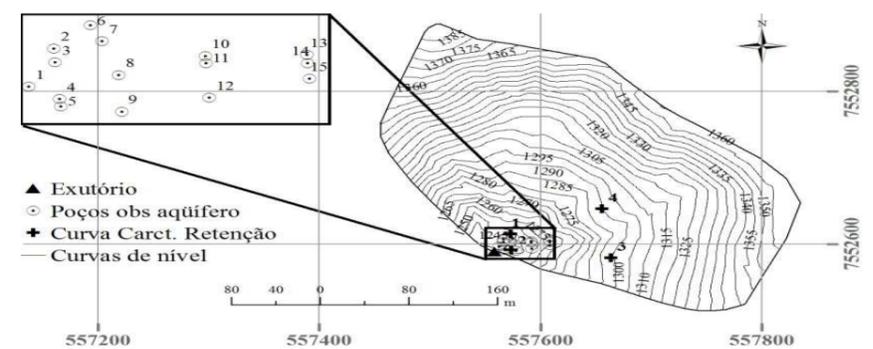


Figura 2 Mapa da nascente M1 com seus respectivos poços de observação do lençol freático e pontos onde foram determinadas as curva características de retenção de água no solo

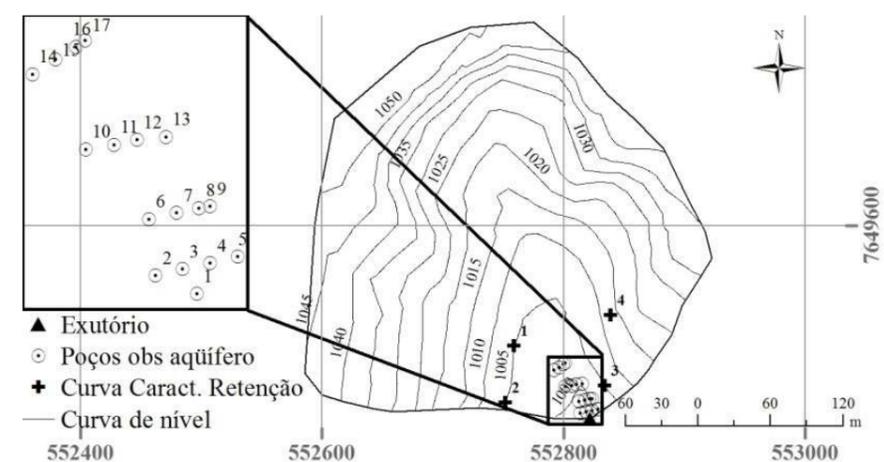


Figura 3 Mapa da nascente M5 com seus respectivos poços de observação do lençol freático e pontos onde foram determinadas as curva características de retenção de água no solo

Na área de recarga da nascente L1 foram instalados 11 poços de observação do aquífero não confinado. Esta nascente é pertencentes à bacia do Ribeirão Lavrinha, localizada na cidade de Bocaina de Minas-MG. Já nas áreas de recarga das nascentes M1 e M5 foram instalados 17 poços de observação do

aquífero não confinado em cada uma, sendo que essas áreas de recarga são pertencentes à bacia 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 (SILVA, 2009).

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 (VAN GENUCHTEN, 1980), sendo a escolha dos locais realizada para representar, ao máximo, toda área de recarga, e também levando em consideração a acessibilidade local (SILVA, 2009).

O monitoramento do nível da água superficial do aquífero foi feito com frequência aproximadamente quinzenal, no período de outubro de 2009 a outubro de 2010, 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.

Para obtenção das séries históricas das altitudes médias do aquífero não confinado em cada área de recarga no período de monitoramento, foi feita uma média aritmética por data, gerando-se ao final a série histórica de altitudes médias do aquífero. No intuito de verificar se haveria diferenças significativas entre obtenção das altitudes médias através da média aritmética por data, ou através da obtenção dessas médias de forma espacializadas, foi feita uma

espacialização dos dados de altitude no SIG ArcGIS® version 9.2, concluindo-se ao final que essa diferença não foi significativa, optando-se desta maneira pela obtenção das altitudes médias através da média aritmética por data.

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

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:

$$R_d = S_y \cdot \frac{dh}{dt} = S_y \cdot \frac{\Delta h}{\Delta t} \quad (06)$$

em que R_d é a recarga (mm/ano), S_y é a porosidade drenável; Δh é a variação do nível freático (mm), e o Δt é o intervalo entre o pico de subida e o ponto mais baixo da curva de recessão antes do início da subida. Foi calculado para cada evento de recarga identificado graficamente, a relação $\Delta h / \Delta t$, obtendo-se uma média que ao final foi multiplicada pelo intervalo de tempo total em dias entre o início e o final do monitoramento.

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

$$S_y = n - S_r \quad (07)$$

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):

$$S_y = P - \theta_{cc} \quad (08)$$

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

Foram determinadas nas áreas L1, M1 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 (VAN 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) estando às equações das curvas em anexo (TABELA 4A) (SILVA, 2009).

Para a obtenção da porosidade drenável do aquífero (S_y) conforme a Equação 04 foi determinada, 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):

$$\theta_{cc} = \theta_{res} + (\theta_s - \theta_{res}) \cdot \left[1 + \frac{1}{m} \right]^{-m} \quad (09)$$

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 a porosidade drenável (S_y) a partir da Equação 04 para cada ponto, a cada profundidade, para cada uma das áreas de recarga, foi feita uma média para representar a porosidade drenável (S_y) em cada uma destas áreas.

Em anexo (Tabela 4A) pode-se verificar uma tabela onde constam os dados provenientes das curvas características de retenção de água no solo para a obtenção da porosidade drenável.

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 4). 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:

$$R_p = -R_d + q_b + \Delta S \quad (10)$$

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 da

porosidade drenável do aquífero (S_y), expresso pela Equação 08 abaixo (WENDLAND; BARRETO; GOMES, 2007):

$$\Delta S = (h_f - h_i) \cdot S_y \quad (11)$$

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

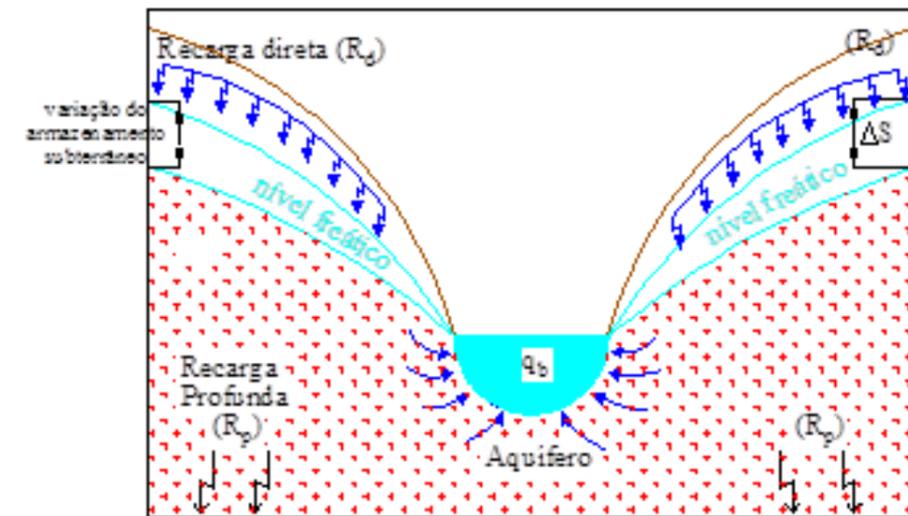


Figura 4 Volume de controle conceitual para o balanço hídrico subterrâneo
Fonte: (WENDLAND; BARRETO; GOMES, 2007)

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Bacia do Ribeirão Lavrinha – inserida no ambiente da Serra da Mantiqueira

Análise e discussão dos resultados obtidos do monitoramento da nascente L1.

3.1.1 Estimativa da porosidade drenável da nascente L1

A estimativa do rendimento específico médio a partir das curvas características de retenção de água no solo para a área de recarga pode ser observado pela da Tabela 1.

Tabela 1 Valores médios da porosidade drenável obtido a partir da curva característica de retenção de água no solo

Nascente	S_y	σ	CV
L1	0,105	0,027	25,46

3.1.2 Variação do nível d'água subterrâneo

Foram obtidos para a área de recarga, dados representativos do nível médio do aquífero em da nascente, por meio da média aritmética para as data de monitoramento, permitindo determinar e quantificar 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. O Gráfico 1 mostra a determinação gráfica de tais variações. A curva de recessão mostrada na cor verde é o traço que o nível do poço de observação teria seguido na ausência de elevação do nível do aquífero (recarga).

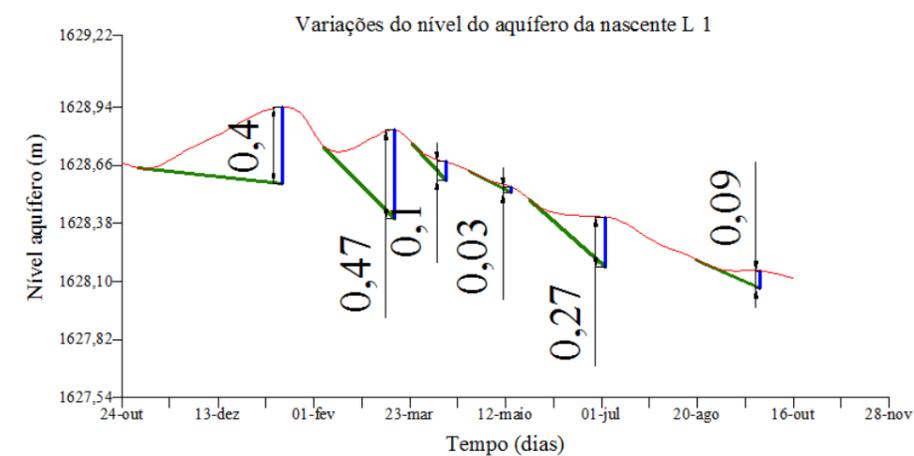


Gráfico 1 Representação do nível médio do aquífero da área L1, e a estimativa das variações no nível d'água (Δh) em relação às curvas de recessão

O somatório das variações médias do nível do aquífero ocorrido na área de recarga da nascente entre outubro de 2009 e outubro de 2010 foi de 4586 mm/ano.

Analisando-se os dados da Tabela 13, observa-se que na área de recarga L1 onde o uso atual do solo, é em sua maioria, pastagem, a declividade média do terreno é de 28,7% e a unidade pedológica é o CX A moderado forte ondulado, ocorreu uma variação do nível do aquífero de 4586 mm. Apesar de ser uma área com declividade média acentuada e ser formada basicamente por pastagem, a presença do Cambissolo citado acima aliado aos altos índices pluviométricos, provavelmente estão contribuindo para essa elevada variação do aquífero, pois como já discutido no capítulo 2, esse tipo de solo apresenta bom potencial para recarga do aquífero.

O nível médio dos aquíferos apresentou grande variação em suas medidas ao longo do período monitorado. Observa-se pelo Gráfico 2, que

ocorreu no período monitorado o que era esperado, ou seja, no início do período chuvoso no mês de setembro/outubro de 2009 houve contribuição da precipitação para a recarga do aquífero. Posteriormente, após o término da estação chuvosa a partir do mês de março o aquífero entrou em depleção, e esta se estende 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.

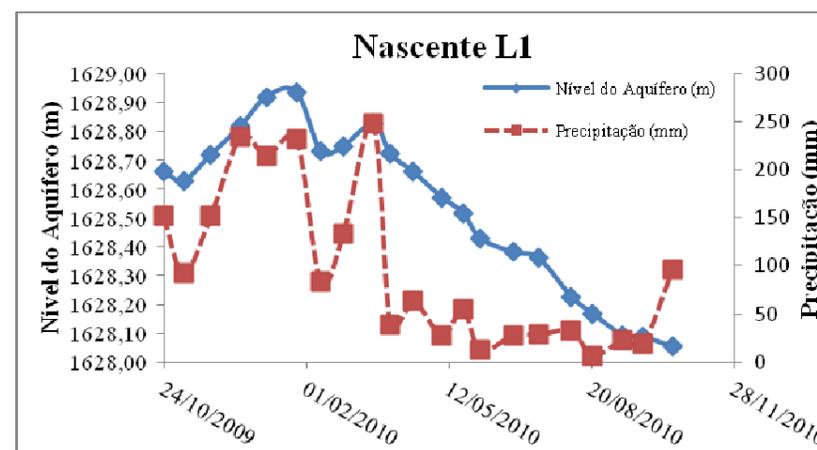


Gráfico 2 Comportamento temporal da precipitação e do nível médio do aquífero em quatro áreas de recargas de nascente

Com base no Gráfico 3, observa-se que as alterações ocorridas na precipitação são correspondidas com variações nos níveis dos aquíferos, mas estes níveis apresentaram uma defasagem na resposta à precipitação. Este fato é indicativo que a recarga do aquífero pode ocorrer em um período posterior às precipitações, devido ao tempo de resposta/opportunidade 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.

3.1.3 Estimativa da recarga direta

A estimativa da recarga direta pela análise da variação do nível do aquífero e extrapolação das curvas de recessão, baseado no método WTF para o período de outubro de 2009 e outubro de 2010 está apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 Recarga direta para o período de outubro de 2009 a outubro de 2010

Nascentes	L1
R _d (mm/ano)	456,94
% precipitação	18,39

Observa-se pela da tabela 1 que a recarga direta ocorreu de forma intensa na área L1 correspondendo a 18,39% do total precipitado no período que foi de 2485 mm.

3.1.4 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 da porosidade drenável do aquífero, para o período de outubro de 2009 e outubro de 2010. Na Tabela 3 são apresentados seus valores.

Tabela 3 Variação do armazenamento subterrâneo para o período de outubro de 2009 a outubro de 2010

Nascente	L1
$h_f - h_i$ (mm)	-610,00
ΔS (mm/ano)	-64,28

A variação do armazenamento subterrâneo anual foi de -64,28 mm. O valor de variação do armazenamento representa que, em média, a variação do volume de água no aquífero, entre o período de 24/10/2009 a 16/10/2010 foi deficitária em 64,28 em lâmina de água equivalente.

3.1.5 Estimativa da recarga profunda

Para estimativa da recarga profunda foi feita 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. Na Tabela 4 apresentam-se os componentes envolvidos no balanço hídrico subterrâneo e o seu saldo, para o período de outubro de 2009 a outubro de 2010.

Tabela 4 Balanço hídrico subterrâneo (mm) para o período de outubro de 2009 a outubro de 2010

Componentes do balanço	Nascente L1
Recarga Direta (R_d) (mm/ano)	456,90
ΔS (mm/ano)	-64,30
Deflúvio anual (mm/ano)	514,90
Recarga / Drenagem Profunda (R_p) (mm/ano)	-6,30

Pela Tabela 4 observa-se que a recarga direta foi estimada em 456,9 mm/ano, como ocorreu uma variação de armazenamento de -64,3 mm/ano, gerou um excedente de -6,3 mm/ano, que foi a drenagem profunda, contribuindo para recarga do aquífero.

3.1.6 Balanço hídrico simplificado

Tabela 5 Balanço hídrico simplificado na zona não saturada da área de recarga da nascente da nascente L1

P	ET	ΔS	DSD	SALDO
(mm/ano)	(mm/ano)	(mm/ano)	(mm/ano)	(mm/ano)
2484,97	1341,6	-50,02	110,74	1082,65

P = Precipitação; ET = Evapotranspiração; D = Deflúvio base; DSD = Deflúvio Superficial Direto

O deflúvio superficial direto (DSD) foi estimado levando-se em conta a sua participação relativa no deflúvio total calculada com base na análise das hidrógrafas Tabela 6.

O saldo hídrico resultante do balanço se disponibiliza para promover a recarga dos aquíferos bem como, repor a deficiência de umidade natural porventura existente na zona não saturada do perfil do solo. Deve-se considerar que o saldo pode estar sub ou superestimado, pois o valor de evapotranspiração (ET) considerado é da bacia como um todo e o deflúvio superficial direto (DSD) foi estimado de forma relativa.

Tabela 6 Monitoramento hidrológico da bacia do Ribeirão Lavrinha

Ano hidrológico	P	ET (mm/ano)	%	D
	(mm/ano)		(Db/D)	(mm/ano)
2009-2010	2162	1341,6	82,3	820,4

3.2 Bacia do Ribeirão Marcela inserida no ambiente - Campo das Vertentes

Análise e discussão dos resultados obtidos dos monitoramentos das nascentes M1, M5.

3.2.1 Estimativa da porosidade drenável das nascentes M1 e M5

A estimativa da porosidade drenável a partir das curvas de retenção de água no solo para cada área de recarga pode ser observada através da Tabela 7.

Tabela 7 Estimativa da porosidade drenável

Nascente	S _y	σ	CV
M1	0,125	0,012	9,97
M5	0,086	0,012	13,77

3.2.2 Variações do nível d'água subterrâneo

Foram obtidos para cada área de recarga, dados representativos do nível médio do aquífero em cada nascente, por meio da média aritmética para as data de monitoramento, permitindo determinar e quantificar 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. Os Gráficos 3 e 4 mostram a determinação gráfica de tais variações. A curva de recessão mostrada na cor verde é o traço que o nível do poço de observação teria seguido na ausência de elevação do nível do aquífero (recarga).

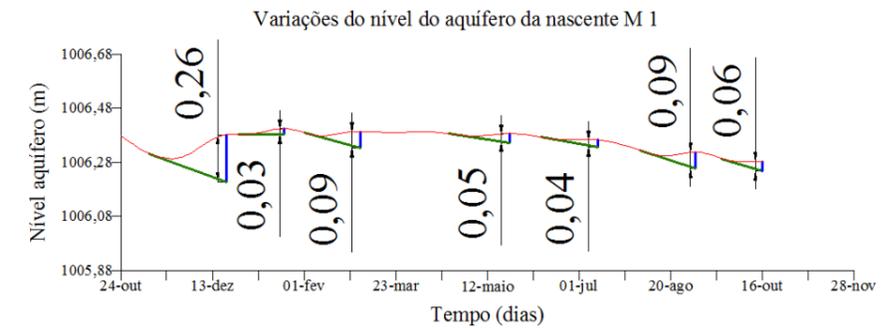


Gráfico 3 Representação do nível médio do aquífero da área M1, e a estimativa das variações no nível d'água (Δh) em relação às curvas de recessão

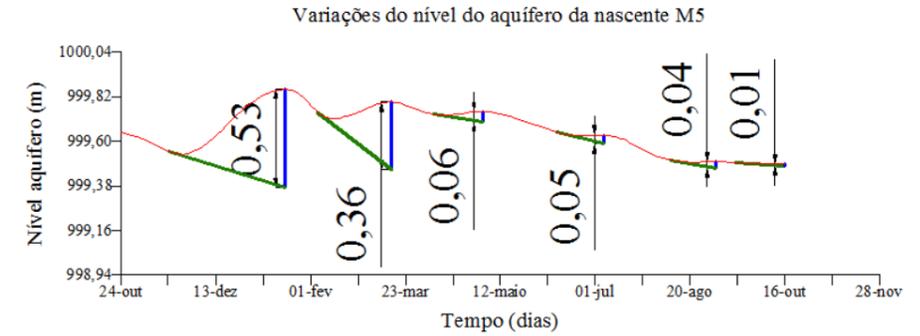


Gráfico 4 Representação do nível médio do aquífero da área M5, e a estimativa das variações no nível d'água (Δh) em relação às curvas de recensão

A Tabela 8 apresenta os valores do somatório das variações médias dos níveis dos aquíferos ocorridas nas duas áreas de recarga das nascentes entre outubro de 2009 a outubro de 2010.

Tabela 8 Valores das variações acumuladas no ano, dos níveis médios dos aquíferos

Nascentes	M1	M5
Δh (mm/ano)	1823	3260

Na área de recarga M1 onde o uso atual do solo é composto em sua maioria por pastagem e milho com declividade média do terreno de 17,0% e unidades pedológicas em aproximadamente 3/4 da área com domínio dos Latossolos Vermelho Amarelo e Vermelho distrófico típico e o restante sendo o Cambissolo, ocorreu uma variação acumulada do nível do aquífero de 1823 mm. Já na área de recarga M5 onde o uso atual do solo é composto em sua maioria por mata e pastagem, a declividade média do terreno de 25,4%, com respeito à unidade pedológica, não se pode afirmar com certeza, devido ao fato de a área de recarga dessa nascente estar fora da bacia do Ribeirão Marcela, porém, de

acordo com o mapa de solo Figura 6, possivelmente a predominância do solo na área seja o Latossolo Vermelho Amarelo. Esse fato associado à presença de mata nativa na área de recarga, explicaria a maior variação acumulada do nível do aquífero ocorrida, que foi da ordem de 3260 mm, pois os Latossolos apresentam elevado potencial de recarga do aquífero conforme já discutido no capítulo 2. Outra justificativa deste fato pode ser devido aos poços estarem locados em uma área com pequena camada de zona saturada, onde pode ocasionar uma rápida elevação do nível freático em respostas aos eventos de chuva. Segundo (WENDLAND; BARRETO; GOMES, 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 período monitorado. Observa-se através dos Gráficos 5 e 6 o mesmo comportamento conforme descrito para a área de recarga da bacia do Ribeirão Lavrinha.

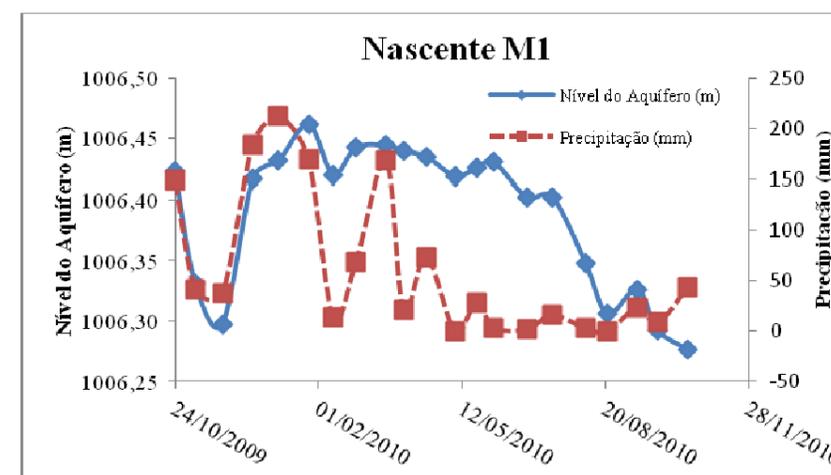


Gráfico 5 Comportamento temporal da precipitação e do nível médio do aquífero em quatro áreas de recargas de nascente

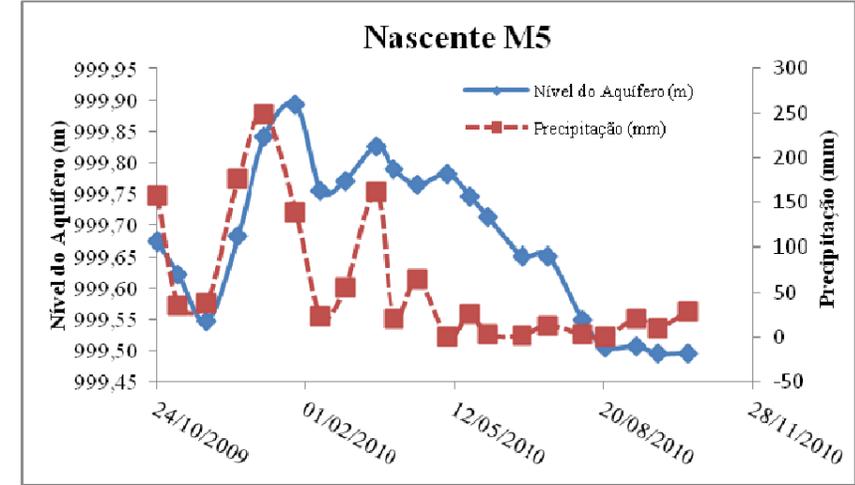


Gráfico 6 Comportamento temporal da precipitação e do nível médio do aquífero em quatro áreas de recargas de nascente

3.2.3 Estimativa da recarga direta

A estimativa da recarga direta pela análise da variação do nível do aquífero e extrapolação das curvas de recessão, baseado no método WTF para o período de outubro de 2009 e outubro de 2010 está apresentada na Tabela 9.

Tabela 9 Recarga direta para o período de outubro de 2009 a outubro de 2010

Nascentes	M1	M5
R _d (mm/ano)	214,78	264,70
% Precipitação	10,99	13,54

Observa-se pela da tabela 9, que as áreas de recarga M1 e M5 apresentaram respectivamente recarga direta de 214,78 e 264,70 mm/ano, correspondendo a 10,83 e 13,74% do total precipitado no período, que foi de 1955 mm. Conforme discutido acima, a área de recarga da nascente M5 pode

estar sendo favorecida devido à presença de mata e a possível predominância do Latossolo em sua área de recarga.

3.2.4 Avaliação da variação do armazenamento subterrâneo

A avaliação da variação do armazenamento subterrâneo foi feita a partir dos dados dos níveis nos poços de monitoramento e da estimativa da porosidade drenável do aquífero, para o período de outubro de 2009 e outubro de 2010. Seus valores podem ser visualizados na Tabela 10.

Tabela 10 Variação do armazenamento subterrâneo para o período de outubro de 2009 e outubro de 2010

Nascentes	M1	M5
$h_f - h_i$ (mm)	-140	-170
ΔS (mm/ano)	-17,44	-14,6

A variação do armazenamento subterrâneo anual foi de -17,44 e -14,60 mm para as áreas de recarga das nascentes M1 e M5 pertencentes.

Os valores de variação do armazenamento representam que, em média, a variação do volume de água no aquífero, entre o período de 24/10/2009 a 16/10/2010 nas áreas das duas nascentes monitoradas M1 e M5 foram deficitárias em 17,44 e 14,60 mm respectivamente, em lâmina de água equivalente.

3.2.5 Estimativa da recarga profunda

Tabela 11 Balanço hídrico subterrâneo (mm) para o período de outubro de 2009 e outubro de 2010

Componentes do balanço	Nascentes	
	M1	M5
Recarga Direta (R_d) (mm/ano)	214,80	264,70
ΔS (mm/ano)	-17,40	-14,60
Deflúvio anual (mm/ano)	244,40	196,80
Recarga / Drenagem Profunda (R_p) (mm/ano)	12,20	-82,50

Analisando Tabela 11 observa-se que a recarga direta foi estimada em 214,8 264,70 mm/ano, respectivamente para as áreas M1 e M5. Para a área de recarga da nascente M1, onde ocorreu uma variação de armazenamento de -17,4 mm/ano, e a recarga foi de apenas 214,8 mm/ano, gerou um déficit de 12,2 mm/ano, sendo necessária uma recarga do aquífero profundo para suprir essa deficiência. Já para a área de recarga da nascente M5, a recarga direta somada à variação do armazenamento foi suficiente para gerar um excedente de 82,5 mm/ano que foi drenado para o aquífero profundo contribuindo para sua recarga.

3.2.6 Balanço hídrico simplificado

Tabela 12 Síntese do balanço hídrico simplificado

Nascentes	P	ET	ΔS	DSD	SALDO
	(mm/ano)	(mm/ano)	(mm/ano)	(mm/ano)	(mm/ano)
M1	1983,83	1098,80	-4,42	138,67	750,78
M5	1926,42	1098,80	29,53	111,66	686,43

P = Precipitação; ET = Evapotranspiração; D = Deflúvio base; DSD = Deflúvio Superficial Direto

O deflúvio superficial direto (DSD) foi estimado levando-se em conta a sua participação relativa no deflúvio total calculada com base na análise das hidrógrafas Tabela 13.

O saldo hídrico resultante do balanço se disponibiliza para promover a recarga dos aquíferos bem como, repor a deficiência de umidade natural porventura existente na zona não saturada do perfil do solo. Deve-se considerar que o saldo pode estar sub ou superestimado, pois o valor de evapotranspiração (ET) considerado é da bacia como um todo e o deflúvio superficial direto (DSD) foi estimado de forma relativa.

Tabela 13 Monitoramento hidrológico da bacia do Ribeirão Marcela

Ano hidrológico	P (mm)	ET (mm)	% (Db/D)	D (mm)
2009-2010	1708	1098,8	63,8	609,2

4 CONCLUSÕES

- a) A bacia do Ribeirão Lavrinha, embora, apresente predominância dos Cambissolos, caracteristicamente de baixo potencial de infiltração e, portanto de recarga do aquífero, o elevado índice pluviométrico, associado ao uso atual do solo, determinou uma maior recarga do aquífero.
- b) A bacia do Ribeirão Marcela, cuja predominância dos solos é o Latossolo Vermelho Amarelo, solos com bom potencial de recarga do aquífero, apresentou uma menor recarga quando comparada a bacia do Ribeirão Lavrinha, este fato pode ser devido a grande diferença pluviométrica existente entre as bacias.
- c) A relação uso atual do solo, declividade, índice pluviométrico e principalmente a pedologia do solo, influenciaram a estimativa da recarga direta.
- d) O balanço hídrico na zona não saturada apresenta saldo para promover a recarga do aquífero superficial em taxa suficiente para sustentar o deflúvio base monitorado nas nascentes.

REFERÊNCIAS

DEXTER, A. R. Soil physical quality Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, Tucson, v. 120, p. 201–214, 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 Geociências) – Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2007.

GEE, G. W. et al. Variations in water balance and recharge potential at three western desert sites. **Soil Science Society of America Journal**, Madson, v. 58, 1994, p. 63-71.

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

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, 2006.

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**, Washington, p. 67, 1998. Paper 2482.

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

SILVA, L. A. **Regime de escoamento e recarga subterrânea de nascentes na região do Alto Rio Grande, MG**. 2009. 134 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

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

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**, Rio de Janeiro, v. 10, n. 2, p. 15-25, 2005.

WENDLAND, E.; BARRETO, C.; GOMES, L. H. Water balance in the Guarani aquifero outcrop zone based on hydrogeologic monitoring. **Journal of Hydrology**, Wellington, v. 342, p. 261-269, 2007.

ANEXOS

Tabela 1A	Vazões das nascentes monitoradas na bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha, no período de outubro de 2009 a dezembro 2010.....	125
Tabela 2A	Vazões das nascentes monitoradas na bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, no período de outubro de 2009 a dezembro 2010.....	126
Tabela 3A	Níveis do aquífero nas áreas de recarga de nascentes nas bacias hidrográficas dos Ribeirões Lavrinha e Marcela, no período de outubro de 2009 a outubro 2010.....	127
Tabela 4A	Equações das curvas características de retenção de água no solo.....	128

Tabela 1A Vazões das nascentes monitoradas na bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha, no período de outubro de 2009 a dezembro 2010

Data	L1	L2	L3	L4
	Vazão (L·s ⁻¹)			
24/10/2009	0,958	0,345	0,046	0,743
07/11/2009	0,933	0,504	0,030	0,699
26/11/2009	0,933	0,616	0,011	1,923
17/12/2009	1,846	1,178	0,078	1,627
04/01/2010	1,962	1,178	0,068	2,164
25/01/2010	2,697	0,933	0,200	3,407
11/02/2010	1,846	0,721	0,125	2,890
27/02/2010	2,164	0,540	0,112	-----
20/03/2010	2,164	1,011	0,125	2,744
01/04/2010	1,627	0,678	0,100	3,194
17/04/2010	1,360	0,522	0,063	2,697
07/05/2010	1,120	0,359	0,038	2,164
22/05/2010	1,178	0,160	0,024	1,771
03/06/2010	0,908	0,304	0,029	1,698
26/06/2010	0,765	0,209	0,020	1,923
14/07/2010	0,637	0,231	-----	0,958
06/08/2010	0,475	0,133	0,015	1,120
21/08/2010	0,423	0,109	0,006	0,811
11/09/2010	0,386	0,104	0,010	0,545
25/09/2010	0,275	0,127	0,010	0,374
16/10/2010	0,306	0,133	-----	0,545
05/11/2010	0,475	0,181	0,012	0,475
20/11/2010	0,769	0,503	0,040	0,545
13/12/2010	0,993	0,859	0,151	1,735

Tabela 2A Vazões das nascentes monitoradas na bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, no período de outubro de 2009 a dezembro 2010

Data	M1	M2	M4	M5
	Vazão (L·s ⁻¹)			
24/10/2009	0,859	0,296	0,201	0,621
07/11/2009	0,597	0,168	0,112	0,374
26/11/2009	0,577	0,050	0,068	0,246
17/12/2009	0,558	0,734	0,236	0,668
04/01/2010	0,637	0,840	0,558	0,840
25/01/2010	1,360	1,074	0,231	1,293
11/02/2010	0,859	0,246	0,304	0,621
27/02/2010	1,846	0,621	0,410	0,605
20/03/2010	1,178	0,668	0,489	0,192
01/04/2010	0,859	0,701	0,522	1,116
17/04/2010	0,859	0,701	0,135	0,751
07/05/2010	0,743	0,374	0,522	0,652
22/05/2010	0,504	0,410	0,135	0,636
03/06/2010	0,908	0,449	0,179	0,590
26/06/2010	0,389	0,246	0,135	0,410
14/07/2010	0,278	0,285	0,119	0,386
06/08/2010	0,359	0,118	0,091	0,296
21/08/2010	0,331	0,083	0,057	0,227
11/09/2010	0,389	0,068	0,135	0,386
25/09/2010	0,540	0,010	-----	0,246
16/10/2010	0,811	0,046	0,135	0,184
05/11/2010	0,522	0,317	0,067	0,410
20/11/2010	0,420	0,786	0,091	0,605
13/12/2010	0,522	0,786	0,637	1,074

Tabela 3A Níveis do aquífero nas áreas de recarga de nascentes nas bacias hidrográficas dos Ribeirões Lavrinha e Marcela, no período de outubro de 2009 a outubro 2010

L1		M1		M5
Data	Altitude média do aquífero	Data	Altitude média do aquífero	
24/10/2009	1628,66	24/10/2009	1006,42	999,67
07/11/2009	1628,63	07/11/2009	1006,33	999,62
26/11/2009	1628,72	26/11/2009	1006,30	999,55
17/12/2009	1628,82	17/12/2009	1006,42	999,68
04/01/2010	1628,92	04/01/2010	1006,43	999,84
25/01/2010	1628,94	25/01/2010	1006,46	999,89
11/02/2010	1628,73	11/02/2010	1006,42	999,75
27/02/2010	1628,75	27/02/2010	1006,44	999,77
20/03/2010	1628,83	20/03/2010	1006,44	999,83
01/04/2010	1628,72	01/04/2010	1006,44	999,79
17/04/2010	1628,66	17/04/2010	1006,44	999,76
07/05/2010	1628,57	07/05/2010	1006,42	999,78
22/05/2010	1628,52	22/05/2010	1006,43	999,75
03/06/2010	1628,43	03/06/2010	1006,43	999,71
26/06/2010	1628,38	26/06/2010	1006,40	999,65
14/07/2010	1628,36	14/07/2010	1006,40	999,65
06/08/2010	1628,23	06/08/2010	1006,35	999,55
21/08/2010	1628,17	21/08/2010	1006,31	999,51
11/09/2010	1628,09	11/09/2010	1006,33	999,51
25/09/2010	1628,09	25/09/2010	1006,29	999,50
16/10/2010	1628,05	16/10/2010	1006,28	999,50

Tabela 4A Equações das curvas características de retenção de água no solo

Área L1			
Ponto	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 M1			
	20	$\theta = 0,344 + (0,548 - 0,344) \cdot [1 + (0,429 \cdot \psi_m)^{1,676}]^{-0,403}$	0,990
1	50	$\theta = 0,337 + (0,536 - 0,337) \cdot [1 + (1,905 \cdot \psi_m)^{1,403}]^{-0,287}$	0,979
	100	$\theta = 0,327 + (0,477 - 0,327) \cdot [1 + (1,179 \cdot \psi_m)^{1,387}]^{-0,279}$	0,988
	20	$\theta = 0,233 + (0,570 - 0,233) \cdot [1 + (0,979 \cdot \psi_m)^{1,531}]^{-0,347}$	0,983
2	50	$\theta = 0,212 + (0,627 - 0,212) \cdot [1 + (0,759 \cdot \psi_m)^{1,626}]^{-0,385}$	0,992
	100	$\theta = 0,210 + (0,648 - 0,210) \cdot [1 + (0,420 \cdot \psi_m)^{1,801}]^{-0,445}$	0,996
	20	$\theta = 0,240 + (0,605 - 0,240) \cdot [1 + (1,220 \cdot \psi_m)^{1,383}]^{-0,277}$	0,974
3	50	$\theta = 0,177 + (0,606 - 0,177) \cdot [1 + (0,418 \cdot \psi_m)^{1,518}]^{-0,341}$	0,985
	100	$\theta = 0,243 + (0,580 - 0,243) \cdot [1 + (1,293 \cdot \psi_m)^{1,493}]^{-0,330}$	0,985
	20	$\theta = 0,261 + (0,551 - 0,261) \cdot [1 + (0,368 \cdot \psi_m)^{1,596}]^{-0,373}$	0,966
4	50	$\theta = 0,173 + (0,569 - 0,173) \cdot [1 + (0,493 \cdot \psi_m)^{1,579}]^{-0,367}$	0,991
	100	$\theta = 0,191 + (0,612 - 0,191) \cdot [1 + (0,884 \cdot \psi_m)^{1,462}]^{-0,316}$	0,979
Área M5			
	20	$\theta = 0,275 + (0,510 - 0,275) \cdot [1 + (1,079 \cdot \psi_m)^{1,352}]^{-0,260}$	0,952
1	50	$\theta = 0,322 + (0,424 - 0,365) \cdot [1 + (0,365 \cdot \psi_m)^{2,097}]^{-0,523}$	0,977
	100	$\theta = 0,360 + (0,446 - 0,360) \cdot [1 + (0,175 \cdot \psi_m)^{1,603}]^{-0,376}$	0,966

“Tabela 4ª, conclusão”

	20	$\theta = 0,394 + (0,539 - 0,394) \cdot \left[1 + (0,363 \cdot \psi_m)^{1,449} \right]^{-0,310}$	0,944
2	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
	20	$\theta = 0,274 + (0,590 - 0,274) \cdot \left[1 + (0,255 \cdot \psi_m)^{1,309} \right]^{-0,236}$	0,946
3	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
	20	$\theta = 0,388 + (0,551 - 0,388) \cdot \left[1 + (0,583 \cdot \psi_m)^{1,570} \right]^{-0,363}$	0,992
4	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