



ALISSON SOUZA DE OLIVEIRA

**RECARGA SUBTERRÂNEA DE NASCENTES
EM AMBIENTES DISTINTOS DA REGIÃO
ALTO RIO GRANDE, MG**

LAVRAS – MG

2015

ALISSON SOUZA DE OLIVEIRA

**RECARGA SUBTERRÂNEA DE NASCENTES EM AMBIENTES
DISTINTOS DA REGIÃO ALTO RIO GRANDE, MG**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas, área de concentração em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas, para a obtenção do título de Doutor.

Orientador

Dr. Antônio Marciano da Silva

LAVRAS - MG

2014

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Oliveira, Alisson Souza de.

Recarga subterrânea de nascentes em ambientes distintos
da região Alto Rio Grande, MG / Alisson Souza de Oliveira. –
Lavras : UFLA, 2015.

165 p. : il.

Tese(doutorado)–Universidade Federal de Lavras, 2014.

Orientador(a): Antônio Marciano da Silva.

Bibliografia.

1. Áreas de recarga de nascentes. 2. Recarga subterrânea. 3.
Índice de qualidade do solo associado à recarga subterrânea. I.
Universidade Federal de Lavras. II. Título.

ALISSON SOUZA DE OLIVEIRA

**RECARGA SUBTERRÂNEA DE NASCENTES EM AMBIENTES
DISTINTOS DA REGIÃO ALTO RIO GRANDE, MG**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas, área de concentração em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas, para a obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 28 de novembro de 2014.

Dr. Carlos Rogério de Mello	UFLA
Dr. Gilberto Coelho	UFLA
Dr. Marcelo Ribeiro Viola	UFLA
Dra. Mirléia Aparecida de Carvalho	UFLA
Dr. Alexandre Silveira	UNIFAL/MG

Dr. Antônio Marciano da Silva
Orientador

LAVRAS - MG

2014

A todos os meus familiares que, de alguma maneira, contribuíram para
mais esta grande conquista.

Às minhas irmãs Márcia e Patrícia, pelo apoio e estímulo nos momentos de
dificuldade.

Aos meus pais e grandes incentivadores, Lêige (*in memoriam*) e Álvaro, por
toda a dedicação a mim e a minhas irmãs, sem eles nada seríamos.

A minha esposa, Raquel, pela paciência e companheirismo nos momentos de
aflições e provações.

Ao grande incentivo de nossas vidas, nosso filho, Rafael!

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pelo fôlego de vida e por não deixar faltar o pão de cada dia em minha vida! Embora, não tenham faltado as lutas, as provações, maior tem sido as bênçãos e maravilhas que Ele tem nos proporcionado.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA), em especial ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas, pela oportunidade e confiança a mim depositadas para a realização deste trabalho.

A CAPES, pela concessão de bolsas e ao CNPq pelos recursos disponibilizados para a montagem e condução dos experimentos.

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 professores Carlos Rogério de Mello e Gilberto Coelho, pela coorientação e colaboração para a realização deste trabalho.

A todos os amigos do Laboratório de Hidráulica, pelo companheirismo e amizade que, de alguma maneira, contribuíram para a realização deste trabalho.

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

MUITO OBRIGADO!

RESUMO GERAL

Em razão da enorme importância no contexto hidrológico, as nascentes vêm cada vez mais sendo alvo de estudos, visto que é a origem de todos os cursos d'água, havendo grande interesse na preservação da quantidade e qualidade de suas águas. Estudos sobre o uso do solo, topografia e pedologia nas áreas de recarga das nascentes, têm fornecido informações importantes a respeito do conhecimento de sua dinâmica. Nesse contexto, objetivou-se, neste trabalho, analisar o regime de escoamento de duas nascentes situadas em dois ambientes, geomorfológicos distintos da região Alto Rio Grande, Campo das Vertentes e Serra da Mantiqueira, visando ao entendimento da interação entre os fatores que governam esse processo e, sobretudo, a participação do deflúvio de base como fator de sustentabilidade. Para tanto, caracterizaram-se as áreas de recarga das nascentes quanto ao relevo, à cobertura vegetal, aos solos e seus atributos físico- hídricos, avaliando a participação do deflúvio de base no deflúvio total e no total precipitado. Realizou-se o aprimoramento de um Índice de Qualidade do Solo sob o contexto da recarga do lençol superficial, com a inclusão de informações do perfil, matéria orgânica e do relevo. Os resultados mostraram que não foram identificadas influências do relevo e do uso do solo na dinâmica da água nas áreas de recarga das nascentes. O deflúvio base gerado pelas nascentes nos dois ambientes, guardou relação direta com os atributos físico-hídricos dos solos e o regime pluvial. Fica evidente que solos com menor capacidade de retenção de água no seu perfil são mais eficazes no processo de recarga direta do lençol superficial. Solos com atributos físico-hídricos favoráveis ao processo de infiltração e redistribuição de água em seu perfil têm maior potencialidade para a recarga do lençol superficial. O balanço hídrico na zona saturada contém incertezas associadas à rede de poços de monitoramento do nível do lençol superficial, sobretudo em termos da abrangência espacial e da profundidade monitorada. O índice de qualidade do solo para recarga do aquífero superficial (IQS_{RA}) mostrou-se eficiente como indicador ambiental de geração de deflúvio base pelas áreas de recargas das nascentes e o processo de validação comprovou sua eficácia. A área de recarga que apresentou os maiores valores de deflúvio base e na proporção da precipitação (área de recarga da nascente L1), apresentou os maiores valores do IQR_{SA} .

Palavras-chave: Áreas de recargas de nascentes. Regime de escoamento. Atributos físico-hídricos do solo. Índice de Qualidade do solo para Recarga Subterrânea.

GENERAL ABSTRACT

Because of the immense importance in the hydrological context, springs are increasingly a target of studies, given that they are the source of all water bodies, with great interest in preserving the quantity and quality of the water. Studies on land use, topography and soil conditions in the areas of spring recharge have provided important information regarding its dynamics. In this context, the objective of this work was to analyze the flow regime of two springs situated in two geomorphologically distinct environments in the Upper Rio Grande region, Campo das Vertentes and Serra da Mantiqueira, aiming at understanding the interaction between the factors governing this process and, overall, the participation of the base runoff as a sustainability factor. To this end, we characterized the spring recharge areas regarding relief, vegetation, soils and their physical-hydric attributes, assessing the participation of the base runoff in relation to total runoff and total precipitation. We improved a Soil Quality Index under the context of the surface water table recharge, with the inclusion of profile information, organic matter and relief. The results showed that no relief or soil use influence over water dynamics was identified in the spring recharge areas. The base runoff generated by the springs in both environments were directly related to the physical-hydric attributes of the soils and with the pluvial regime. It is evident that soil with lower water retention capacity in the profile are more effective in the direct recharge process of the surface water table. Soils with physical-hydric attributes favorable to the water infiltration and redistribution process present higher potential for recharging the surface water table. The hydric balance in the saturated zone contains uncertainties associated to the surface water table network of monitoring wells, especially in terms of spatial coverage and depth monitoring. The soil quality index for aquifer recharge (SQI_{AR}) was efficient as an environmental indicator of base runoff generation for spring recharge areas and the validation process proved its effectiveness. The recharge area presenting the highest base runoff values and precipitation proportions (L1 spring recharge area), presented higher SQI_{AR} values.

Keywords: Springs of recharge areas. Flow regime. Physical-hydro soil properties. Subterranean recharge soil quality index.

LISTA DE SÍMBOLOS

BHRL	Bacia Hidrográfica do Ribeirão Lavrinha
BHRM	Bacia Hidrográfica do Ribeirão Marcela
WTF	<i>Water Table Fluctuation</i>
R_d	Recarga direta
S_y	Porosidade drenável
P	Precipitação
μ	Porosidade drenável
M	Microporosidade
K₀	Condutividade Hidráulica Saturada
D_s	Densidade do Solo
MO	Matéria Orgânica
ΔS	Varição de Armazenamento
IQS_{RA}	Índice de Qualidade do Solo associado à Recarga de Água Subterrânea

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

- Figura 1 Extrapolação da curva de recessão do nível d'água para
 estimativa da recarga28
- Figura 2 Posicionamento dos poços de observação do lençol freático na
 área de recarga da nascente L1.....33
- Figura 3 Posicionamento dos poços de observação do lençol freático na
 área de recarga da nascente M1.....33

CAPÍTULO 2

- Figura 1 Mapa de situação das bacias hidrográficas que contem as
 nascentes estudadas56
- Figura 2 Mapa de classes de declividade da área de recarga da nascente
 L160
- Figura 3 Mapa de uso do solo da área de recarga da nascente L161
- Figura 4 Mapa de classes de declividade da área de recarga da nascente
 M163
- Figura 5 Mapa de uso do solo da área de recarga da nascente M164
- Figura 6 Comportamento dos atributos físico-hídricos no perfil do solo
 nas áreas de recarga das nascentes L1 e M183

CAPÍTULO 3

- Figura 1 Pontos de coleta de amostras de solo deformadas e
 indeformadas na área de recarga da nascente L1129
- Figura 2 Pontos de coleta de amostras de solo deformadas e
 indeformadas na área de recarga da nascente M1130

Figura 3	Esquema representativo do comportamento da trajetória do fluxo no perfil do solo, descrevendo os elementos que compõem o índice topográfico 2.....	135
Figura 4	Distribuição espacial do IQS_{RA} para a área de recarga da nascente L1	157
Figura 5	Distribuição espacial do IQS_{RA} para a área de recarga da nascente M1	157
Figura 6	Distribuição espacial do IQS_{RA} na camada 0 – 20 cm para a área de recarga da nascente L1.....	160
Figura 7	Distribuição espacial do IQS_{RA} na camada 0 – 20 cm para a área de recarga da nascente M1.....	160

LISTA DE GRÁFICOS

CAPÍTULO 2

Gráfico 1	Hidrograma e hietograma para o ano hidrológico 2009/2010 na área de recarga da nascente L1.....	69
Gráfico 2	Hidrograma e hietograma para o ano hidrológico 2010/2011 na área de recarga da nascente L1	70
Gráfico 3	Hidrograma e hietograma para o ano hidrológico 2011/2012 na área de recarga da nascente L1	71
Gráfico 4	Hidrograma e hietograma para o ano hidrológico 2012/2013 na área de recarga da nascente L1	72
Gráfico 5	Hidrograma e hietograma para o ano hidrológico 2009/2010 na área de recarga da nascente M1	73
Gráfico 6	Hidrograma e hietograma para o ano hidrológico 2010/2011 na área de recarga da nascente M1	74
Gráfico 7	Hidrograma e hietograma para o ano hidrológico 2011/2012 na área de recarga da nascente M1	75
Gráfico 8	Hidrograma e hietograma para o ano hidrológico 2012/2013 na área de recarga da nascente M1	76
Gráfico 9	Comportamento do nível do lençol freático nos poços 1 , 2, 3, 4, 5 e 6 na área de recarga da nascente L1	88
Gráfico 10	Comportamento do nível do lençol freático nos poços 7, 8, 9, 10 e 11 na área de recarga da nascente L1	89
Gráfico 11	Comportamento do nível do lençol freático nos poços 12, 13, 14, 15, 16 e 17 na área de recarga da nascente L1	90
Gráfico 12	Comportamento do nível do lençol freático nos poços 18, 19, 20, 21, 22, 23 e 24 na área de recarga da nascente L1	91

Gráfico 13	Comportamento do lençol freático nos poços P1, P2, P3, P4, P5 e P6 na área de recarga da nascente M1	93
Gráfico 14	Comportamento do lençol freático nos poços P7, P8, P9, P10, P11 e P12 na área de recarga da nascente M1	94
Gráfico 15	Comportamento do lençol freático nos poços P13, P14, P15, P16 e P17 na área de recarga da nascente M1	95
Gráfico 16	Comportamento do lençol freático nos poços P18, P19, P20, P21, P22, P23 e P24 na área de recarga da nascente M1	96
Gráfico 17	Comportamento do lençol freático nos poços P25 e P26 na área de recarga da nascente M1	97
Gráfico 18	Comportamento do lençol freático nos poços P27 e P28 na área de recarga da nascente M1	98
Gráfico 19	Variações do nível do lençol freático e estimativa das variações dos níveis d'água (Δh) em relação às curvas de recessão para o Poço 1 na área de recarga da nascente L1	108
Gráfico 20	Variações do nível do lençol freático e estimativa das variações dos níveis d'água (Δh) em relação às curvas de recessão para o Poço 1 na área de recarga da nascente M1	109
Gráfico 21	Recarga direta (Rd) e precipitação (P) nas áreas de recargas das nascentes L1 e M1	117

CAPÍTULO 3

Gráfico 1	Curva de normalização para o indicador densidade do solo (Ds) na área de recarga da nascente L1 nas camadas 0 – 20 cm (a), 20 – 40 cm (b), 40 – 60 cm (c), 60 – 80 cm (d) e 80 – 100 cm (e)	141
-----------	---	-----

Gráfico 2	Curva de normalização para o indicador microporosidade na área de recarga da nascente L1 nas camadas 0 – 20 cm (a), 20 – 40 cm (b), 40 – 60 cm (c), 60 – 80 cm (d) e 80 – 100 cm (e)	142
Gráfico 3	Curva de normalização para os indicadores índices topográficos 1 (IT1) (a) e 2 (IT2) (b) na área de recarga da nascente L1	143
Gráfico 4	Curva de normalização para o indicador condutividade hidráulica saturada na área de recarga da nascente L1 nas camadas 0 – 20 cm (a), 20 – 40 cm (b), 40 – 60 cm (c), 60 – 80 cm (d) e 80 – 100 cm (e)	144
Gráfico 5	Curva de normalização para o indicador matéria orgânica na área de recarga da nascente L1 nas camadas 0 – 20 cm (a), 20 – 40 cm (b), 40 – 60 cm (c), 60 – 80 cm (d) e 80 – 100 cm (e)	145
Gráfico 6	Curva de normalização para o indicador porosidade drenável na área de recarga da nascente L1 nas camadas 0 – 20 cm (a), 20 – 40 cm (b), 40 – 60 cm (c), 60 – 80 cm (d) e 80 – 100 cm (e).....	146
Gráfico 7	Curva de normalização para o indicador densidade do solo na área de recarga da nascente M1 nas camadas 0 – 20 cm (a), 20 – 40 cm (b), 40 – 60 cm (c), 60 – 80 cm (d) e 80 – 100 cm (e)	149
Gráfico 8	Curva de normalização para o indicador microporosidade na área de recarga da nascente M1 nas camadas 0 – 20 cm (a), 20 – 40 cm (b), 40 – 60 cm (c), 60 – 80 cm (d) e 80 – 100 cm (e)	150
Gráfico 9	Curva de normalização para os indicadores índices topográficos 1 (IT1) (a) e 2 (IT2) (b) na área de recarga da nascente M1.....	151

Gráfico 10	Curva de normalização para o indicador condutividade hidráulica saturada na área de recarga da nascente M1 nas camadas 0 – 20 cm (a), 20 – 40 cm (b), 40 – 60 cm (c), 60 – 80 cm (d) e 80 – 100 cm (e)	152
Gráfico 11	Curva de normalização para o indicador matéria orgânica na área de recarga da nascente M1 nas camadas 0 – 20 cm (a), 20 – 40 cm (b), 40 – 60 cm (c), 60 – 80 cm (d) e 80 – 100 cm (e)	153
Gráfico 12	Curva de normalização para o indicador porosidade drenável na área de recarga da nascente M1 nas camadas 0 – 20 cm (a), 20 – 40 cm (b), 40 – 60 cm (c), 60 – 80 cm (d) e 80 – 100 cm (e).....	154

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2

Tabela 1	Classificação climática preliminar para a BHRL segundo o Método de Thornthwaite (1948).....	58
Tabela 2	Declividade da área de recarga da nascente L1	59
Tabela 3	Classificação climática preliminar para a BHRM segundo o Método de Thornthwaite (1948).....	62
Tabela 4	Declividade da área de recarga da nascente M1	63
Tabela 5	Análise do regime de escoamento das áreas de recarga das nascentes L1 e M1	68
Tabela 6	Distribuição das classes de solos, uso predominante e atributos físico-hídricos do solo na área de recarga das nascentes L1 e M1	78
Tabela 7	Atributos físico-hídricos presentes nas áreas de recarga das nascentes.....	80
Tabela 8	Valores médios do rendimento específico (Sy) no perfil do solo nas áreas de recarga das nascentes L1 e M1	86
Tabela 9	Variações do armazenamento subterrâneo para a área de recarga da nascente L1	101
Tabela 10	Variações do armazenamento subterrâneo para a área de recarga da nascente M1	104
Tabela 11	Variações do nível do lençol freático (Δh) e recarga direta (Rd) para a área de recarga da nascente L1	110
Tabela 12	Variações do nível do lençol freático (Δh) e recarga direta (Rd) para a área de recarga da nascente M1	113
Tabela 13	Componentes do balanço hídrico subterrâneo nas áreas de recargas das nascentes L1 e M1.....	118

CAPÍTULO 3

Tabela 1	Valores dos parâmetros utilizados para a normalização dos indicadores na área de recarga da nascente L1	139
Tabela 2	Valores dos parâmetros utilizados para a normalização dos indicadores área de recarga da nascente M1.....	147
Tabela 3	Indicadores hidrológicos das áreas de recargas das nascentes L1 e M1 utilizados na validação do IQS_{RA}	158
Tabela 4	Valores médios anuais dos indicadores hidrológicos das áreas de recargas das nascentes L1 e M1 utilizados na validação do IQS_{RA}	159
Tabela 5	Valores médios IQS_{RA} para as áreas de recargas das nascentes L1 e M1	161

SUMÁRIO

	CAPÍTULO 1 Introdução Geral.....	19
1	INTRODUÇÃO	19
2	REFERENCIAL TEÓRICO	22
2.1	Nascentes	22
2.2	Recarga de aquífero subterrâneo	23
2.2.1	Tipos de recarga subterrânea	24
2.2.2	Métodos de quantificação da recarga subterrânea	25
2.2.3	Método da flutuação da superfície livre	26
2.3	Índice de qualidade do solo	29
3	MONITORAMENTO HIDROLÓGICO DAS ÁREAS DE RECARGA DAS NASCENTES	31
3.1	Monitoramento da vazão	31
3.2	Monitoramento da precipitação	32
3.3	Monitoramento da variação de nível do lençol freático	32
4	HISTÓRICO DOS TRABALHOS REALIZADOS NAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DOS RIBEIRÕES LAVRINHA E MARCELA	35
	REFERÊNCIAS	45
	CAPÍTULO 2 Balanço hídrico na zona saturada do solo nas áreas de recarga das nascentes L1 e M1	51
1	INTRODUÇÃO	53
2	MATERIAL E MÉTODOS	56
2.1	Localização e caracterização das áreas de recarga das nascentes nos ambientes da Serra da Mantiqueira e Campo das Vertentes, Região Alto Rio Grande (GD1)	57
2.1.1	Ambiente Serra da Mantiqueira	57
2.1.2	Declividade da área de recarga da nascente L1 inserida na BHRL	59
2.1.3	Uso do solo na área de recarga da nascente L1	60
2.1.4	Ambiente Campo das Vertentes	61
2.1.5	Declividade da área de recarga da nascente M1	63
2.1.6	Uso do solo na área de recarga da nascente M1	64
2.2	Estimativa da recarga direta subterrânea	64
2.3	Recarga profunda	66
3	RESULTADOS E DISCUSSÕES	67
3.1	Análises do regime do escoamento – Deflúvio	67
3.1.1	Balanço hídrico na zona saturada do solo	86
3.1.2	Estimativa do rendimento específico (Sy)	86

3.1.3	Variação dos níveis do lençol freático.....	87
3.1.4	Avaliação da variação do armazenamento subterrâneo	100
3.1.5	Estimativa da recarga direta.....	106
3.1.6	Balço hídrico na zona saturada do solo	117
4	CONCLUSÕES.....	120
	REFERENCIAS.....	121
	CAPÍTULO 3 Aperfeiçoamento de um índice de qualidade do solo associado à recarga de água subterrânea para dois ambientes da região do Alto Rio Grande, MG	124
1	INTRODUÇÃO.....	126
2	MATERIAL E MÉTODOS	129
2.1	Caracterização dos atributos físico-hídricos do solo.....	129
2.2	Aperfeiçoamento do Índice de Qualidade do Solo associado à recarga de água subterrânea (IQS _{RA})	132
2.2.1	Mapeamento do IQS _{RA}	136
2.2.2	Validação do IQS _{RA} como indicador potencial de áreas de recarga de água subterrânea.....	136
3	RESULTADOS E DISCUSSÕES	138
3.1	Normalização dos indicadores do IQS _{RA}	138
3.1.1	Normalização dos indicadores na área de recarga da nascente L1.	138
3.1.2	Normalização dos indicadores na área de recarga da nascente M1.....	147
3.1.3	Mapeamento do IQR _{SA} na área de recarga da nascente	155
4	CONCLUSÃO.....	162
	REFERÊNCIAS.....	163

CAPÍTULO 1 Introdução Geral

1 INTRODUÇÃO

O Brasil tem 12% da reserva de água doce do mundo e mais de 70% das reservas hídricas do país se concentram na Amazônia. Em decorrência dessa aparente abundância, muitas vezes, o recurso não é tratado como bem escasso. Entretanto, a importância da preservação dos rios e nascentes é indiscutível.

Nas últimas décadas, o desmatamento de encostas, das matas ciliares e o uso inadequado dos solos têm contribuído para a diminuição dos volumes e da qualidade da água, um bem natural insubstituível na vida do ser humano.

As atividades antrópicas em bacias hidrográficas, principalmente nas áreas de recarga das nascentes, contribuem para o rompimento do equilíbrio, proporcionando, especialmente, a diminuição da quantidade e da qualidade da água. O uso do solo com pastagem, sem o correspondente plano de manejo e conservação, tem alterado a paisagem em muitas regiões, expondo o solo aos agentes erosivos, modificando as condições de infiltração, propiciando perda de água e de solo pelo escoamento superficial direto, comprometendo a recarga dos aquíferos e produzindo assoreamento de cursos d'água nas partes mais baixas.

Nesse contexto a preservação das bacias hidrográficas, em especial as áreas de recarga das nascentes, é de suma importância, pois é a partir delas que se originam pequenos cursos d'água, que formam os córregos, que se juntam para formar os riachos e, dessa maneira, surgem os rios.

A quantidade e a qualidade da água das nascentes podem ser alteradas por diversos fatores, destacando-se o clima, o tipo de solo e seu uso, a cobertura vegetal, seus atributos físico-hídricos e relevo, principalmente das áreas de recarga, pois influenciam no armazenamento da água e no regime do escoamento da nascente e dos cursos d'água (PINHEIRO et al., 2011).

O uso do solo pode alterar a qualidade e quantidade da água, além de influenciar o armazenamento subterrâneo e o regime da nascente e dos cursos d'água (PINTO et al., 2004). Nesse contexto, insere-se o levantamento pedológico, que fornece bases para agrupar solos que têm funcionalidades hidrológicas semelhantes.

Ainda, analisando-se os aspectos relacionados ao solo, deve-se considerar o papel da vegetação na influência de atributos físico-hídricos, com consequente reflexo na dinâmica da água. Schuler (2003), estudando a influência de diferentes tipos de vegetação em microbacias no estado do Pará, observou redução na condutividade hidráulica e na porosidade do solo sob pastagem em relação à floresta, proporcionando aumento do escoamento superficial.

Desse modo, a caracterização do meio físico das bacias hidrográficas em especial as áreas de recarga das nascentes, com o intuito de levantar as áreas críticas visando à manutenção da água, são condições básicas para o sucesso do planejamento da conservação e produção de água.

A bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha (BHRL) com área de drenagem de 6,87 km² localiza-se no município de Bocaina de Minas, na região da Serra da Mantiqueira, no Sul de Minas Gérias, deságua diretamente no Rio Grande, cuja classe de solo predominante é a dos Cambissolos. O uso do solo predominante está associado à atividade pecuária, com destaque também, em caráter secundário, à cultura do eucalipto.

A bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela (BHRM) com área de drenagem de 4,7 km² está inserida na região Campo das Vertentes, no Alto Rio Grande, apresenta como classe de solo dominante os Latossolos. O uso do solo preponderante é à atividade pecuária extensiva que domina a paisagem com pastagens. Além da pastagem, ocorrem, também, à presença da cultura do milho, do café e o cultivo de eucalipto.

Ambas às bacias são importantes por contribuem para a formação dos reservatórios: UHE – Camargos/CEMIG com capacidade de geração de energia de 48MW, UHE – Itutinga/CEMIG com 52MW e da UHE – FUNIL com capacidade de 180MW.

Portanto, diante do exposto, como objetivos gerais, pretende-se analisar o regime de escoamento de duas nascentes situadas em ambientes geomorfológicos distintos da região Alto Rio Grande Serra da Mantiqueira (BHRL) e Campo das Vertentes (BHRM), visando ao entendimento da interação entre os fatores que governam esse processo e, sobretudo a participação do deflúvio de base como fator de sustentabilidade. Como objetivos específicos: caracterizar as áreas de recarga das nascentes quanto ao relevo, à cobertura vegetal, aos solos e seus atributos físico-hídricos; avaliar a participação do deflúvio de base no deflúvio total e relacioná-lo ao total precipitado e aprimorar o Índice de Qualidade do Solo sob o contexto da recarga do lençol superficial, com a inclusão de informações do perfil, matéria orgânica e do relevo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Nascentes

Como as nascentes são o início de todo curso d'água, cada vez mais vêm sendo alvo de estudos, pela 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 desse recurso hídrico.

Segundo Alvarenga (2004), a maioria das nascentes está localizada nas regiões montanhosas, nas chamadas bacias de cabeceira. A água que jorra de uma nascente formará um pequeno ribeirão que irá contribuir para o volume de água de outro curso e, assim, sucessivamente, formando grandes cursos d'água, fundamentais para o abastecimento urbano, agrícola, geração de energia, dentre outras funções (JUNQUEIRA JÚNIOR, 2006).

As nascentes são conhecidas como mina, fia 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.

A nascente ideal é aquela que fornece água de boa qualidade, abundante e contínua, localizada próxima do local de uso e de cota topográfica elevada, possibilitando sua distribuição por gravidade, sem gasto de energia (CALHEIROS et al., 2004).

Segundo Ferris (2009), as nascentes constituem a principal fonte de água de qualidade para as comunidades rurais onde, na maioria das vezes, é pura, cristalina, sadia e não necessita de tratamento para que seja consumida. As nascentes são também responsáveis pelo abastecimento de rios e lagos, formando importantes reservas de água, suprimindo as necessidades básicas dos

seres humanos, como saúde, produção de alimentos e manutenção de ecossistemas naturais.

É bom ressaltar que, além da quantidade de água produzida pela nascente, é desejável que tenha boa distribuição no tempo, ou seja, apresente pequena amplitude de variação entre a vazão no período de recarga e no período de recessão.

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 o seu uso, respondendo estes diretamente às ações antrópicas, principalmente nas áreas de recarga das nascentes, pois influenciam na recarga 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.

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

2.2 Recarga de aquífero subterrâneo

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).

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 conflitos pelo uso da água, já que tais recursos são frequentemente a chave do desenvolvimento econômico (BARRETO, 2006).

A recarga dos aquíferos está diretamente relacionada com as condições de superfície (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, pelo fato de que solos de granulação grosseira, geralmente resultam em taxas de recarga maiores que solos de granulação fina (PAIVA, 2006).

2.2.1 Tipos de recarga subterrânea

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

Recarga direta: A recarga direta pode ser definida como a parcela da precipitação que atravessa a zona não-saturada e soma-se ao aquífero.

Recarga indireta: corresponde aos processos em que a recarga ocorre por características introduzidas pelo homem, por meio de atividades de irrigação e urbanização, assim como por rios e depressões de superfícies topográficas (reservatórios, lagos etc).

Recarga localizada: refere-se àquela parcela de água que escoia superficialmente do ponto de impacto e se torna água de recarga em zonas específicas como riachos e depressões.

Segundo Scanlon, Healy e Cook (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.

2.2.2 Métodos de quantificação da recarga subterrânea

Considerando-se o meio hidrológico, no qual as informações de recarga são obtidas, os métodos podem ser classificados como pertencentes a três zonas (ou grupos): saturada, não saturada e de águas superficiais. 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, $^3\text{H}/^3\text{He}$ (Trítium); 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 envolvem refinamentos contínuos da taxa de recarga, quando dados adicionais são coletados.

Embora vários métodos de estimativa da recarga subterrânea sejam descritos na literatura, este estudo apresenta o método da flutuação da superfície livre para a estimativa da recarga.

2.2.3 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 aplicada para a estimativa da recarga (MAZIERO, 2005; GOMES, 2008; SILVA, 2009; DAMBRÓS; SILVA, 2011; COELHO; ALMEIDA; SILANS, 2012).

O método WTF só é aplicável aos aquíferos livres e requer o conhecimento da porosidade drenável da formação geológica e das variações dos níveis d'água ao longo do tempo (BARRETO, 2006). A porosidade drenável, ou água drenável, representa os poros de um solo que não conseguem reter água contra a força da gravidade. Expressa a diferença entre a porosidade total e a porosidade preenchida com água, mesmo após a drenagem.

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 no aquífero 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.

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):

$$R = S_y \cdot \frac{dh}{dt} = S_y \cdot \frac{\Delta h}{\Delta t} \quad (1)$$

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 1, 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, fluxo de base, entrada e saída de fluxo subsuperficial) sejam nulas, durante o período de recarga (WENDLAND; BARRETO; GOMES, 2007).

Healy e Cook (2002) definiram que a aplicação da equação 1 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 baixo da curva de recessão antes do início da subida, o qual é uma estimativa do nível do poço de observação, na ausência da elevação do nível d'água (FIGURA 1).

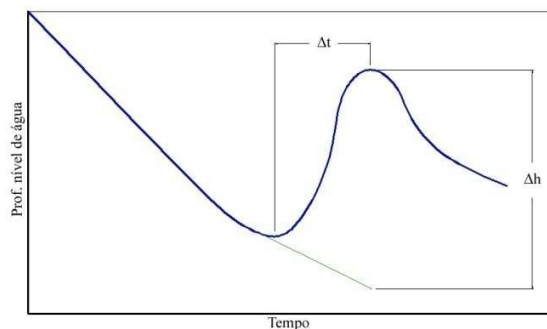


Figura 1 Extrapolação da curva de recessão do nível d'água para estimativa da recarga

Fonte: Adaptado de Barreto (2006).

Paiva (2006) estimou a recarga em uma unidade dentrítica de uma microbacia 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. 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. Carnier Neto e Kiang (2008) aplicaram o método WTF no aquífero Rio Claro para estimarem a recarga direta, encontrando valores que variaram entre 53,8 mm para o ano de 2003 e 29,3 mm para o ano de 2005. Silva et al. (2012), trabalhando em áreas de recargas de quatro nascentes denominadas L1, L2, M1 e M2 utilizaram o método WTF para estimar a recarga direta, obtendo valores de 121,11; 64,62; 83,99 e 152,46 mm/ano. Coelho, Almeida e Silans (2012) utilizaram o método WTF para estimar a recarga direta na bacia do Rio Gramame, no nordeste brasileiro e encontraram um valor de 73,8 mm correspondendo a 7,2% e total precipitado (1026 mm).

2.3 Índice de qualidade do solo

A qualidade do solo é definida como a capacidade deste de funcionar dentro do ecossistema para sustentar a produtividade biológica, manter a qualidade ambiental e promover a saúde das plantas e animais (DORAN; PARKIN, 1996).

A qualidade dos solos, segundo Gregorich e Carter (1997), tem duas feições: uma ligada à capacidade inerente do solo e outra ligada à parte dinâmica deste, influenciada pelo seu uso e manejo. A qualidade física de um solo depende de sua composição ou de características intrínsecas como profundidade efetiva, mineralogia e textura, assim como de propriedades que variam no tempo. A profundidade efetiva, mineralogia e textura são características importantes na comparação de sítios diferentes, enquanto que a quantificação de propriedades dinâmicas é importante para detectar efeitos de sistemas de manejo de solos, ao longo do tempo, no mesmo sítio ou solo.

A utilização de indicadores de qualidade do solo tem sido muito difundida em países de clima temperado, com maior ênfase na listagem de indicadores e sua influência em dada propriedade do solo (SCHOENHOLTZ; VAN MIEGROET; BURGER, 2000) do que propriamente na sua utilização, em termos práticos, na mensuração da qualidade do solo (SNAKIN et al., 1996; ANDREWS et al., 2004).

A utilização de indicadores de qualidade do solo, relacionados à sua funcionalidade, constitui uma maneira indireta de mensurar a qualidade dos solos, sendo úteis para o monitoramento de mudanças no ambiente (ARAÚJO; KARLEN; CAMBARDELLA, 2012).

Karlen e Stott (1994) propuseram um Índice de Qualidade do Solo (IQS), sendo resultante da soma dos indicadores escolhidos para representar determinada qualidade do solo (como, por exemplo, recarga subterrânea de

água) multiplicado pelos seus respectivos pesos (ALAVARENGA, 2012). Em decorrência do fato de cada indicador normalmente apresentar uma unidade de medida diferente, é necessário um processo de normalização dos mesmos, para que possam ser expressos numa escala entre 0 e 1 (ALVARENGA et al., 2012). Para realizar essa normalização, Karlen e Stott (1994) propuseram uma equação desenvolvida por Wymore (1993), a qual permite a construção de curvas do tipo “mais é melhor”, “menos é melhor”, “valor máximo ou ótimo”. O tipo de curva a ser escolhida dependerá da função desempenhada pelo indicador no IQS. O somatório dos pesos que constituem o IQS deve ser igual a 1. Dessa forma, o IQS também apresentará magnitude variando entre 0 e 1.

3 MONITORAMENTO HIDROLÓGICO DAS ÁREAS DE RECARGA DAS NASCENTES

O monitoramento hidrológico nas áreas de recarga das nascentes L1 e M1 já vem sendo realizado desde o ano de 2007, sendo que, para este estudo, utilizou-se uma série histórica, obtida no período entre outubro de 2009 e março de 2014, com periodicidade aproximadamente quinzenal. Os dados hidrológicos monitorados foram: vazão, precipitação e variação de nível do lençol.

3.1 Monitoramento da vazão

Entre os anos de 2009 e 2012, a vazão foi quantificada com a utilização 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 ($L \cdot s^{-1}$), por meio de uma equação específica para cada calha utilizada. Como as vazões eram realizadas na ausência de chuva, estas foram consideradas como sendo o deflúvio de base.

A partir do ano de 2013, foram instaladas nas áreas de recargas das nascentes L1 e M1 calhas Parshall de 3 e 12 polegadas respectivamente, para monitoramento constante do nível d'água, o qual foi garantido pelo acoplamento lateral de um linígrafo, com armazenador de dados. Os registros de nível d'água na calha foram realizados em intervalos de 10 minutos, sendo os registros efetuados, baixados em média a cada 15 dias. A estimativa do deflúvio de base foi realizada com o emprego do método de Barnes (1939).

3.2 Monitoramento da precipitação

Entre os anos de 2009 e 2012, a precipitação foi quantificada utilizando-se de um pluviômetro instalado nas áreas de recarga das nascentes L1 e M1. A partir do ano de 2013, foi instalado em cada área de recarga um pluviógrafo com módulo de armazenamento de dados, para o monitoramento contínuo da precipitação, com registros a cada 10 minutos.

3.3 Monitoramento da variação de nível do lençol freático

Para o monitoramento da variação de nível do lençol freático, foram instalados 11 e 17 poços de monitoramento do nível do lençol freático nas áreas de recarga das nascentes L1 e M1, respectivamente. Os poços foram distribuídos de forma a subsidiar o entendimento do comportamento espacial e temporal da variação do nível do lençol freático nas áreas próximas ao afloramento da nascente. Para o presente estudo, os poços foram monitorados entre outubro de 2009 e setembro de 2011. A partir de 2011 foram acrescentados mais 13 e 11 poços, respectivamente nas áreas de recarga das nascentes L1 e M1, totalizando 24 e 28 poços, proporcionando maior representatividade das variações de nível do lençol freático (FIGURAS 2 E 3). Ao lado de cada poço, foi instalado um piquete para servir como referência de nível (RN), sendo este georreferenciado no levantamento topográfico.

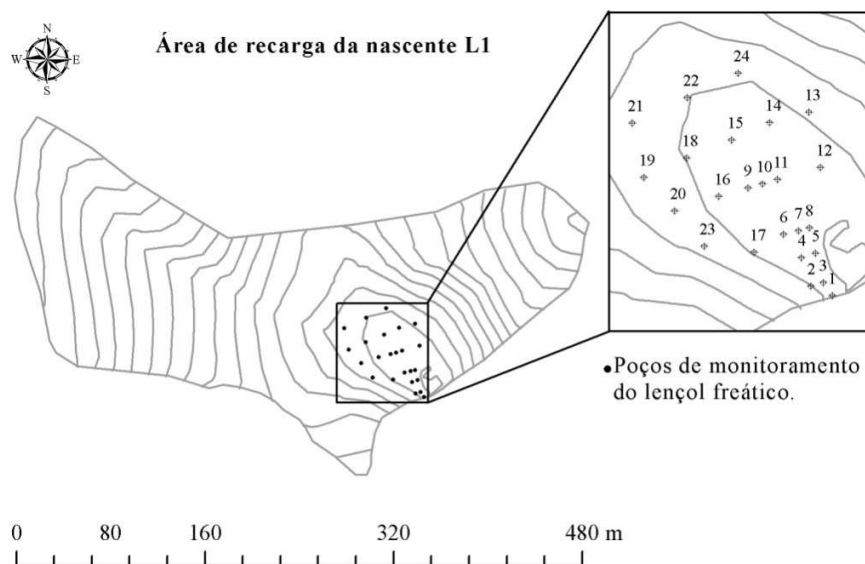


Figura 2 Posicionamento dos poços de observação do lençol freático na área de recarga da nascente L1

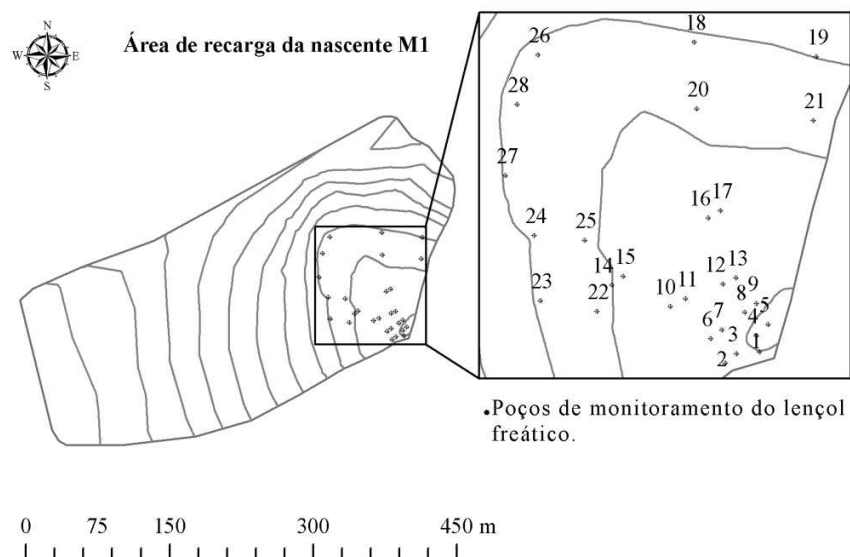


Figura 3 Posicionamento dos poços de observação do lençol freático na área de recarga da nascente M1

Inicialmente, a leitura de nível do lençol freático foi feita com a utilização de uma trena metálica graduada em milímetros, que contava com uma boia de isopor de 30mm de diâmetro conectada em sua extremidade. Posteriormente, a leitura de nível passou a ser realizada, utilizando-se de um medidor de nível eletrônico, constituído de uma fita de polietileno graduada em milímetros com uma sonda em sua extremidade que, ao tocar o nível d'água, emite um sinal sonoro indicando que a leitura na fita de polietileno já pode ser realizada.

4 HISTÓRICO DOS TRABALHOS REALIZADOS NAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DOS RIBEIRÕES LAVRINHA E MARCELA

A fim de destacar a importância das bacias hidrográficas em estudo, a seguir, será realizada uma descrição de todos os trabalhos já concretizados, a partir do ano de 2005 até a atualidade. Esses trabalhos envolvem estudos de solo; qualidade da água; simulações hidrológicas; atributos físico-hídricos do solo; qualidade do solo para a recarga de água subterrânea e estudos sobre a dinâmica da água em áreas de recarga de nascentes.

Gomes (2005), trabalhando na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela na região do Alto Rio Grande, MG estudou a variabilidade espacial de atributos físico-hídricos do solo, com o objetivo de avaliar sua estrutura de dependência espacial e promover seu mapeamento, associando o comportamento espacial dos mesmos às classes de solo, ao uso atual e à respectiva aptidão agrícola, fornecendo subsídios para calibração de modelos hidrológicos e de transporte de sedimentos, além de possibilitar a avaliação do estado de degradação ambiental da sub-bacia hidrográfica. Os principais resultados mostraram que o uso e manejo do solo não estavam em conformidade com a aptidão agrícola, prevalecendo pastagem de baixa qualidade e culturas de rentabilidade reduzida. Todos os atributos físico-hídricos mostraram forte variabilidade extrínseca, ou seja, sofrem influência do manejo, uso e ocupação do solo na sub-bacia hidrográfica. A krigagem mostrou-se eficiente na compreensão da variabilidade espacial dos atributos físico-hídricos do solo, sendo fundamental no auxílio à tomada de decisões no que tange ao uso, conservação e preservação da qualidade do recurso natural solo e dos demais recursos presentes em sub-bacias hidrográficas. Os principais resultados mostraram que o uso e manejo do solo não estão em conformidade com a aptidão agrícola, prevalecendo pastagem de baixa qualidade e culturas de

rentabilidade reduzida. Todos os atributos físico-hídricos mostraram forte variabilidade extrínseca, ou seja, sofrem influência do manejo, uso e ocupação do solo na sub-bacia hidrográfica. A krigagem mostrou-se eficiente na compreensão da variabilidade espacial dos atributos físico-hídricos do solo, podendo ser fundamental no auxílio à tomada de decisões no que tange ao uso, conservação e preservação da qualidade do recurso natural solo e dos demais recursos presentes em sub-bacias hidrográficas.

Junqueira Júnior, (2006), trabalhando com duas nascentes inseridas na bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha, na Serra da Mantiqueira, MG, monitorou suas vazões com o objetivo de avaliar o regime de escoamento associado à variabilidade dos atributos físico e uso do solo. Os resultados mostraram que o comportamento dos valores dos atributos físicos e físico-hídricos mostrou coerência com o comportamento do rendimento específico das nascentes. O uso do solo, o porte e o estado de preservação de suas áreas de recarga, influenciaram no valor e no comportamento temporal do rendimento específico das mesmas.

Pinto, (2007), trabalhando nas sub-bacias do Ribeirão Marcela, Ribeirão Lavrinha e Vista Bela, na Região Alto Rio Grande, MG, estudou a qualidade das águas superficiais com o objetivo de avaliar sua qualidade ao longo do tempo, por meio do índice de qualidade de água proposto pelo Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), verificando o provável enquadramento dos ribeirões em classes estabelecidas pela Resolução CONAMA 357/05. Os principais resultados mostraram que o Índice de Qualidade da Água apresentou-se como uma boa ferramenta de suporte à gestão dos recursos hídricos, mostrando boa sintonia com o processo de enquadramento nas classes de uso da água. Ficou evidente que o uso e manejo das áreas das sub-bacias influenciaram de maneira negativa na qualidade das águas superficiais, sobretudo pela presença de

Coliformes fecais, sendo necessárias práticas de manejo para reduzir os problemas relacionados à poluição hídrica.

Gomes, (2008a), aplicou o modelo LISEM na bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, região do Alto Rio Grande MG, Brasil, com objetivo de calibrar e validar o modelo para alguns eventos de precipitação e sedimentos. O autor concluiu que o LISEM apresenta alta sensibilidade ao conteúdo de umidade do solo antecedente aos eventos de precipitação, sendo este o principal parâmetro calibrado, e que o LISEM se mostra pouco confiável a simulações hidrológicas de eventos isolados de precipitação que utilizam diretamente os parâmetros de calibração obtidos de outros eventos, mesmo que de igual intensidade e volume precipitado. Constatou-se, ainda, que o LISEM não produziu resultados satisfatórios para eventos cuja intensidade de precipitação foi menor ou igual à capacidade de infiltração de água no solo, porém mostrou-se adequado quando aplicado a eventos de precipitação cuja intensidade superou os 30 mm h⁻¹.

SILVA, (2006), realizou a modelagem do escoamento superficial e da erosão hídrica na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, na região Alto Rio Grande, MG. O objetivo foi estudar o comportamento da erosão hídrica, sob chuva natural, no intuito de obter parâmetros necessários à calibração de modelos empíricos de predição de erosão e dados relevantes para validação dos mesmos e simulação da sua distribuição no espaço geográfico da sub-bacia sob diferentes cenários de uso agrícola do solo e modelagem de hidrogramas de escoamento superficial direto. Os principais resultados indicaram que a sub-bacia hidrográfica apresentou baixa susceptibilidade à erosão, apesar da ausência de práticas conservacionistas. A utilização da Equação Universal de Perdas de Solo, aliada a técnicas de geoestatística, revelou-se uma ferramenta de boa qualidade para simulação e mapeamento da erosão hídrica. Tendo em vista os cenários simulados, avaliou-se que, a sub-bacia hidrográfica não apresentou

elevadas taxas de erosão, com exceção das áreas ocupadas por eucalipto e pastagem em Cambissolos. O escoamento superficial direto apresentou boa contribuição ao escoamento total no período chuvoso, mas ao longo do ano, o mesmo foi menor que os valores médios característicos de outras bacias hidrográficas. O método CN-SCS superestimou o deflúvio produzido, não se mostrando adequado para aplicação a eventos isolados, mesmo com os ajustes dos parâmetros na sub-bacia hidrográfica com o auxílio do estudo de continuidade espacial desenvolvido. O modelo de Nash mostrou-se adequado para a modelagem do escoamento de cheia na sub-bacia hidrográfica, embora subestimando a vazão de pico.

Viola, (2008), realizou a simulação hidrológica na região Alto Rio Grande com o objetivo de produzir uma ferramenta capaz de expressar o comportamento hidrológico das bacias de drenagem dos rios Grande e Aiuruoca, gerando uma ferramenta simples e de boa precisão, capaz de ser aplicada no planejamento do desenvolvimento sustentável da região. Os resultados mostraram que o modelo hidrológico desenvolvido possibilitou com êxito a simulação hidrológica das bacias hidrográficas dos rios Grande e Aiuruoca. O modelo hidrológico concentrado, embora com desempenho inferior ao semidistribuído, simulou adequadamente os hidrogramas, mesmo em aplicações complexas, como o *proxybasintest*, sendo recomendado em aplicações no gerenciamento dos recursos hídricos, dadas a sua praticidade operacional e a facilidade de implementação. Com base na simulação preliminar dos impactos hidrológicos decorrentes de alterações no uso do solo, identificou-se que o processo de substituição de pastagem por eucalipto, na porção da bacia do Rio Grande, implica em importante tendência de redução no escoamento para o reservatório de Camargos, sendo de até 17,3% (105 mm ano^{-1}), por consequência da alteração de 28,2% ($586,6 \text{ km}^2$) da cobertura vegetal.

Ávila (2008), estudou a variabilidade espacial da umidade do solo em um remanescente de Mata Atlântica na bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha, com o objetivo de avaliar comportamento espacial e temporal da umidade do solo, na sua camada superficial. A umidade do solo foi monitorada em 69 pontos distribuídos em função do uso do solo (pastagem, mata nativa, área de regeneração e várzea), utilizando-se de um equipamento portátil TDR (*Times Domain Reflectometry*) com periodicidade quinzenal. Os resultados mostraram forte influência da Mata Atlântica na manutenção da umidade do solo, onde o menor percentual de umidade do solo ocorreu na primeira quinzena de outubro, atingindo em torno de 21% (base em volume). Já, o maior teor de umidade ocorreu no último decêndio de dezembro atingindo 40%. Foi constatado que as pequenas variações de armazenamento de água no solo aconteceram, em razão da espessa camada de resíduos vegetais (serapilheira) provenientes do processo de desfolha natural da Mata Atlântica, conferindo maior eficácia no armazenamento hídrico nesse ecossistema.

Silva (2009), trabalhando em áreas de recarga de 10 nascentes inseridas nas áreas de recarga das bacias hidrográficas dos Ribeirões Marcela e Lavrinha, ambas na Região Alto Rio Grande, verificou a influência das características morfoométricas, do uso e manejo do solo, no regime do escoamento das nascentes. Os resultados mostraram que as nascentes pertencentes à área da bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha, apresentaram os melhores resultados com relação à regularização das vazões e proporcionaram os maiores valores de recarga direta. Fatos atribuídos aos maiores valores de precipitação média e ao uso e manejo do solo.

Alvarenga (2010), trabalhando na bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha, na região Alto Rio Grande propôs um indicador hidrológico do solo para a identificação de áreas potenciais de recarga subterrânea (IQSRA). Objetivou-se, neste trabalho, propor um indicador de solo capaz de identificar

áreas com maior potencial para recarga subterrânea, e avaliar sua sensibilidade à ocupação e manejo do solo e se o mesmo era consistente com alguns indicadores hidrológicos (deflúvio base ou subterrâneo). Os resultados mostraram que o IQSRA foi sensível ao uso e manejo do solo e o processo de validação comprovou sua eficácia, visto que as áreas que apresentaram os maiores valores do escoamento de base foram, também, as que apresentaram os maiores valores do IQSRA. Verificou-se, também, a forte influência da Mata Atlântica no processo de recarga subterrânea, pois os maiores valores do IQSRA ocorreram nas áreas cujo solo estava sob domínio desse ambiente.

Pinto (2011), trabalhando na bacia hidrográfica Ribeirão Lavrinha na Serra da Mantiqueira, MG realizou estudos com o objetivo de calibrar e validar o modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) em vários processos como a simulação hidrossedimentológica, qualidade da água, além, de simular cenários alternativos de uso do solo, com o intuito de avaliar o impacto na redução da produção e transporte de sedimentos na bacia. O modelo SWAT mostrou-se adequado nas simulações de escoamento, de produção e transporte de sedimentos, e estimativa de indicadores de qualidade da água. Na simulação de diferentes cenários, também foi comprovada a sua eficácia e sensibilidade, seja na avaliação da produção, como do transporte de sedimentos. A substituição de pastagem, por eucalipto (cenário 1), resultou na redução da produção de sedimentos. Já, a simulação com a adoção de matas ciliares, ao longo de toda a rede de drenagem (cenário 2), evidenciou a redução da concentração de sedimentos na calha do Ribeirão Lavrinha. Nas simulações dos indicadores de qualidade de água (nitrogênio total e fósforo total, OD/DBO e *Echerichia coli*) os resultados foram satisfatórios somente para períodos mensais.

Pinto (2011), trabalhando na bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha na serra da Mantiqueira, MG propôs um índice de qualidade da água (IQA) para as condições da região da Serra da Mantiqueira, baseado na estatística

multivariada, pela análise de componentes principais (ACP). Conduziu-se, este trabalho, com o objetivo de realizar um monitoramento de indicadores físicos, químicos e biológicos vinculados à qualidade de água, em duas sub-bacias, uma ocupada essencialmente por Mata Atlântica e outra em sua maior parte por pastagem extensiva, comparando o comportamento desses indicadores ao longo do tempo e do espaço. Os principais resultados mostraram a qualidade da água em ambas as situações de uso do solo, foi afetada nos períodos de maior precipitação do ano, onde os valores de alguns indicadores violaram os limites estabelecidos pela Resolução CONAMA 357/05. As elevadas concentrações de Coliformes fecais afetaram a qualidade dos cursos d'água nos períodos de maiores precipitações na região, e estão associadas à agropecuária, principal atividade econômica exercida na Serra da Mantiqueira. A aplicação da ACP reduziu o número de indicadores de qualidade de água utilizados no cálculo do IQA. Os índices de qualidade de água da sub-bacia sob Mata Atlântica apresentaram melhores resultados em comparação à sub-bacia sob pastagem comprovando a importância das florestas nativas da região na manutenção da qualidade da água dos corpos hídricos.

Oliveira (2011), estudando a dinâmica da água em áreas de recarga de 8 nascentes pertencentes às bacias hidrográficas dos Ribeirões Marcela e Lavrinha, realizou a modelagem das vazões, no período de recessão, segundo modelo de Maillet e um balanço hídrico na zona saturada do solo, onde a recarga direta foi estimada pelo método *Water Table Fluctuation* (WTF). Os resultados evidenciaram a superioridade das nascentes da área da bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha em promover a recarga subterrânea e regularização natural das vazões, mesmo apresentando um tipo de solo (Cambissolo) desfavorável ao processo de infiltração e recarga, quando comparado às áreas de recarga das nascentes do Ribeirão Marcela (Latossolo). O fator que determinou a diferença entre as áreas de recarga das nascentes foi o elevado índice pluviométrico.

Viola (2011), trabalhou com a simulação hidrológica de cenários de usos do solo e mudanças climáticas A1B, com o objetivo de calibrar e validar o modelo hidrológico LASH, distribuído por sub-bacias hidrográficas, para a simulação dos recursos hídricos superficiais nas bacias hidrográficas dos rios Aiuruoca (BRA), Grande (BRG-MD), Sapucaí (BRS) e Verde (BRV), simulando os impactos hidrológicos decorrentes dos cenários tendenciais de uso do solo na região. Avaliou, também, a capacidade do modelo regional EtaCPTEC/HadCM3 reproduzir o escoamento do clima presente (1961 a 1990) acoplado ao modelo hidrológico LASH, simulando as alterações nos recursos hídricos superficiais nas bacias hidrográficas de cabeceira do rio Grande associadas ao cenário A1B de emissões futuras de gases de efeito estufa projetado pelo IPCC, entre 2011 e 2098. Os principais resultados mostraram que o modelo LASH representou adequadamente os principais fenômenos do ciclo hidrológico frente a distintas pressões sobre o uso do solo. A avaliação dos escoamentos superficial direto, subsuperficial e subterrâneos simulados permitiu constatar que o modelo foi capaz de reproduzir adequadamente a variabilidade anual dos componentes do escoamento nas quatro bacias hidrográficas em estudo. Nos cenários C₁, C₂ e C₃, que abordaram o reflorestamento por eucalipto da área atual de pastagem, os resultados da simulação indicaram redução das vazões médias, mínimas e máximas, sendo esses cenários os mais impactantes no contexto da geração de deflúvio na região de cabeceira da bacia hidrográfica do Rio Grande. A paisagem retratada pelos cenários C₄ e C₅ contemplou o desmatamento dos fragmentos florestais na serra da Mantiqueira para abertura de pastagens. Nessa situação, o reflexo hidrológico simulado foi de aumento do escoamento, como resposta ao aumento dos escoamentos subterrâneo, subsuperficial e superficial direto. O impacto simulado sobre as vazões mínimas e máximas para esse cenário foi de ampliação, especialmente das últimas. Os resultados do escoamento simulado evidenciaram a existência de forte

interdependência entre a gestão do uso do solo e o gerenciamento de recursos hídricos, mostrando que a utilização agrícola do solo tem reflexos diretos na produção de água das bacias hidrográficas BRA, BRG-MD, BRS e BRV. O modelo hidrológico LASH forçado pelo modelo climático EtaCPTEC/HadCM3 foi capaz de reproduzir o escoamento do clima presente (1961 a 1990) razoavelmente bem, com destaque para a performance na estimativa dos valores mínimos e máximos extraídos da curva de frequência de excedência de vazões. As projeções do modelo Eta-CPTEC/HadCM3 para o cenário climático SRES A1B na região sul de Minas Gerais evidenciaram que poderão ocorrer importantes modificações climáticas durante o século XXI, afetando, adversamente, o escoamento nas bacias hidrográficas de cabeceira do rio Grande.

Entre 2011 e 2040, os resultados mostraram que poderá ocorrer redução do escoamento anual nas bacias hidrográficas BRA, BRG-MD, BRS e BRV. Todavia, a partir de 2041 e se estendendo até o final do século, as projeções indicaram que poderá ocorrer forte incremento do escoamento médio anual.

Ávila (2011), trabalhando em um remanescente de Mata Atlântica da Serra da Mantiqueira, MG realizou um balanço hídrico com o objetivo de avaliar o comportamento dos elementos do ciclo hidrológico numa microbacia hidrográfica essencialmente ocupada por Mata. Os dados climáticos foram obtidos com a utilização de uma estação meteorológica automática e o monitoramento da precipitação interna realizado com a utilização de pluviômetros instalados em toda a área, sendo próximo a cada um deles instalado um medidor de umidade do solo do tipo “Profile Probe”. Os principais resultados mostraram que a evapotranspiração correspondeu, em média, a 47,7% do total precipitado no ano hidrológico, enquanto a parcela interceptada foi de 22,7%. O deflúvio subterrâneo correspondeu a 75,82% do deflúvio total, sendo um importante indicativo do potencial de produção de água. A parcela de

água que atravessa o dossel vegetativo da Mata Atlântica e efetivamente atinge a superfície do solo, contribuindo para o abastecimento dos aquíferos, é proporcionalmente maior em períodos com menores índices pluviométricos, podendo-se associar tal comportamento às características florestais da Mata Atlântica.

Frente aos diversos e variados trabalhos realizados nas bacias hidrográficas dos ribeirões Lavrinha e Marcela, fica evidente a importância das mesmas no contexto hidrológico, justificando a realização de mais este trabalho. Ressalta-se, ainda, que a drenagem das bacias converge para o reservatório da usina hidrelétrica de Itutinga/Camargos sob gestão da CEMIG.

REFERÊNCIAS

- 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.
- ALVARENGA, C. C. et al. Índice de qualidade do solo associado à recarga de água subterrânea (iqsra) na bacia hidrográfica do alto rio grande, MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 5, p. 1608-1619, 2012.
- ALVARENGA, C. C. **Indicadores hidrológicos do solo para identificação de áreas potenciais de recarga subterrânea**. 2010. 81 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.
- ANDREWS, S. S.; KARLEN, D. L.; CAMBARDELLA, C. A. The soil management assessment framework: a quantitative soil quality evaluation method. **Soil Science Society of America Journal**, Washington, v. 68, p. 1945-1962, 2004.
- ARAÚJO, E. et al. Qualidade do solo: conceitos, indicadores e avaliação. **Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia**, Guarapuava, v. 5, n. 1, p. 187-206, jan./abr. 2012.
- ÁVILA, L. F. **Balço hídrico em um remanescente de Mata Atlântica da Serra da Mantiqueira, MG**. 2011. 179 p. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.
- ÁVILA, L. F. **Comportamento espacial e temporal da umidade do solo numa bacia hidrográfica na Serra da Mantiqueira, MG**. 2008. 110 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008.
- BARNES, B. S. The structure of discharge-recession curves. **Transactions/ American Geophysical Union**, Washington, v. 20, n. 4, p.721-725, July1939.

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

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.

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

CARNIER NETO, D.; KIANG, C. H. Aplicação do método de flutuação de nível da água para a estimativa de recarga: exemplo do Aquífero Rio Claro. **Águas Subterrâneas**, São Paulo, v. 22, n. 1, p. 39-48, 2008.

COELHO, V. H. R.; ALMEIDA, C. N.; SILANS, A. M. B. P. Análise da flutuação do nível d'água para estimativa da recarga subterrânea da Bacia Representativa do Rio Gramame no Nordeste Brasileiro. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 17 n. 2, p. 241-252, abr./jun. 2012.

DAMBRÓS, C.; SILVA, J. L. S. da. Comportamento do nível da água subterrânea em sub-bacia representativa em área de afloramento do Sistema Aquífero Guarani. In: WORLD WATER CONGRESS, 14., 2011, Recife. **Anais...** Recife: GBP, 2011.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Quantitative indicators of soil quality: a minimum data set. In: DORAN, J. W.; JONES, A. J. (Ed.). **Methods for assessing soil quality**: volume 49. Madison: Soil Science Society of America, 1996. p. 25-37.

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

FERRIS, V. **Caracterização e proposta de adequação ambiental das nascentes da propriedade rural Cabeceira Sol e Ouro no município de Medianeira- Paraná.** Foz do Iguaçu: União Dinâmica de Faculdade Catarata, 2009.

GOMES, L. H. **Determinação da recarga profunda na bacia-piloto do Ribeirão da Onça em zona de afloramento do sistema Aquífero Guarani a partir de balanço hídrico em zona saturada.** 2008. 167 p. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

GOMES, N. M. **Aplicação LISEM (limburg soil erosion model) para simulação hidrológica em bacia hidrográfica tropical.** 2008. 191 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola s) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008a.

GOMES, N. M. **Variabilidade espacial de atributos físico-hídricos do solo da sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela na Região do Alto Rio Grande, MG.** 2005. 125 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2005.

GREGORICH, E. G.; CARTER, M. R. **Soil quality for crop production and ecosystem health.** Amsterdam: Elsevier, 1997.

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

HUDSON, N. W. **Soil conservation.** 3. ed. Ames: State University Press, 1995.

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.

KARLEN, D. L.; STOTT, D. E. A framework for evaluating physical and chemical indicators of soil quality. In: DORAN, J. W. et al. (Ed.). **Defining soil quality for a sustainable environment.** Madison: Soil Science Society of America, 1994. p. 53-72.

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 p. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Carlos, São Carlos, 2005.

OLIVEIRA, A. S. **Dinâmica do escoamento em nascentes na região do Alto Rio Grande, MG**. 2011. 130 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.

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, 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, 6., 2003, Cabo Verde. **Anais...** Cabo Verde: INGRH, 2003.

PINHEIRO, R. C. et al. Ocupação e caracterização hidrológica da microbacia do Córrego Ipaneminha, Sorocaba-Sp. **Irriga**, Botucatu, v. 16, n. 3, p. 234-245, jul./set. 2011.

PINTO, D. B. F. **Aplicação do modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) na simulação hidrossedimentológica em bacia hidrográfica da Serra da Mantiqueira, MG**. 2011. 225 p. Tese (Mestrado em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.

PINTO, D. B. F. **Qualidade dos recursos hídricos superficiais em sub-bacias hidrográficas da região Alto Rio Grande – MG**. 2007. 89 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2007.

PINTO, L. C. **Índice de qualidade de água com base na normalização dos dados e análise de componentes principais**. 2011. 89 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.

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.

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

SCHOENHOLTZ, S. H.; VAN MIEGROET, H.; BURGER, J. A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: challenges and opportunities. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 138, n. 1-3, p. 335-356, Mar. 2000.

SCHULER, A. E. **Fluxos hidrológicos em microbacias com floresta e pastagem na Amazônia Oriental, Paragominas, Pará**. 2003. 119 p. Tese (Doutorado em Ciências) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

SILVA, L. A. Groundwater recharge estimate at Alto Rio Grande – MG watershed. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 32, n. 6, p. 1097-1108, nov./dez. 2012.

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.

SILVA, P. M. O. **Modelagem do escoamento superficial e da erosão hídrica na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, Alto Rio Grande, MG**. 2006. 155 p. Tese (Doutorado Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2006.

SNAKIN, V. V. et al. The system of assessment of soil degradation. **Soil Technology**, Amsterdam, v. 8, n. 4, p. 331-343, July 1996.

VIOLA, M. R. **Simulação hidrológica na cabeceira da Bacia Hidrográfica do Rio Grande de cenários de usos do solo e mudanças climáticas A1B**. 2011. 286 p. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.

VIOLA, M. R. **Simulação hidrológica na região Alto Rio Grande a montante do Reservatório de Camargos/CEMIG**. 2008. 120 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008.

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

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.

WYMORE, A. W. **Model-based systems engineering**. Boca Raton: CRC Press, 1993.

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

CAPÍTULO 2 Balanço hídrico na zona saturada do solo nas áreas de recarga das nascentes L1 e M1

RESUMO

A água é um recurso essencial para a manutenção da vida na Terra. Apesar de toda sua importância não se tem tido os cuidados necessários para conservar sua quantidade e qualidade. Não se pode esquecer que a água é um recurso cuja disponibilidade pode reduzir ou mesmo acabar e, por isso, exige cuidados em relação à quantidade de uso, à sua qualidade, às suas fontes, à sua distribuição desigual pelo planeta, além de planejamento e custeio de tratamento, de conservação e proteção. Diante disso, objetivou-se, neste trabalho, gerar informações que deem subsídio ao entendimento da dinâmica da água em áreas de recarga de nascentes. Para tanto, realizou-se o monitoramento da vazão, precipitação e variação do nível do lençol freático nas áreas de recargas das nascentes L1 (ambiente Serra da Mantiqueira) e M1 (ambiente Campo das Vertentes) ambas pertencente à região Alto Rio Grande, MG. Para a estimativa da recarga direta, foi utilizado o método de Flutuação das Superfícies Livres (*Water Table Fluctuation* - WTF) e a realização de um balanço hídrico na zona saturada do solo. Tudo isso foi avaliado em associação ao relevo, atributos físico-hídricos, uso do solo e tipo de solo. Os resultados mostraram que não foram identificadas influências do relevo e do uso do solo na dinâmica da água nas áreas de recarga das nascentes. O deflúvio base gerado pelas nascentes nos dois ambientes, guardou relação direta com os atributos físico-hídricos dos solos e o regime pluvial. Fica evidente que solos com menor capacidade de retenção de água no seu perfil são mais eficazes no processo de recarga direta do lençol superficial. Solos com atributos físico-hídricos favoráveis ao processo de infiltração e redistribuição de água em seu perfil têm maior potencialidade para a recarga do lençol superficial. O balanço hídrico na zona saturada contém incertezas associadas à rede de poços de monitoramento do nível do lençol superficial, sobretudo em termos da abrangência espacial e da profundidade monitorada.

Palavras-chave: Área de recarga de Nascentes. Água subterrânea. Balanço Hídrico. Método WTF.

ABSTRACT

Water is an essential resource for sustaining life on Earth. Despite all its importance, it has not received the care necessary to preserve its quality and quantity. We cannot forget that water is a resource of which availability can decrease or even cease to exist, thus requiring care regarding its use, quality, sources, unequal distribution throughout the planet, in addition to plans and cost for treatment, conservation and protection. In light of this, the objective of this work was to generate information that subsidizes the understanding of water dynamics in spring recharge areas. In order to do this, we monitored flow, rainfall and variation of water table levels in the recharge areas of springs L1 (Serra da Mantiqueira environment) and M1 (Campo das Vertentes environment) both belonging to the Alto Rio Grande region, in MG, Brazil. To estimate the direct recharge, we used the Water Table Fluctuation (WTF) method and performed a water balance in the soil's saturated zone. All was evaluated in association with relief, physical-hydric properties, land use and soil type. The results showed that there were no relief or land use influence over water dynamics in the spring recharge areas. The base runoff generated by the springs in both environments held direct relation to the physical-hydric properties of soils and rainfall patterns. It is evident that soils with lower water retaining capacity are more effective in the direct recharge of surface water table. Soils with physical-hydric properties favorable to water infiltration and redistribution processes present greater potential for recharging the surface water table. The water balance in the saturated zone contains uncertainties associated to the surface water table monitoring wells network, especially in terms of spatial coverage and monitored depth.

Keywords: Springs recharge area. Groundwater. Water Balance. WTF method.

1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso essencial para a manutenção da vida na Terra. Ela é quem sustenta a vida de todos os seres vivos, é quem garante a sobrevivência e a perpetuação da espécie. Apesar de toda a sua importância, não se tem tido os cuidados necessários para conservar sua quantidade e qualidade. Não se pode esquecer que a água é um recurso cuja disponibilidade pode reduzir ou mesmo acabar e, por isso, exige cuidados em relação à quantidade de uso, à sua qualidade, às suas fontes, à sua distribuição desigual pelo planeta, além de planejamento e custeio de tratamento, de conservação e proteção.

A exploração desordenada desse recurso vem provocando inúmeros problemas ambientais, principalmente em áreas de recarga de nascentes, provocando alterações na quantidade e qualidade da água drenada. Por isso, a água potável de fácil acesso, está relativamente escassa e, sem dúvida, essa escassez será um dos principais problemas ambientais a serem enfrentados pela população mundial nas próximas décadas. Para que se tenha um uso sustentável desse recurso, é necessário compreender como ocorrem os processos que promovem a recarga subterrânea dessas águas, e os fatores que o influenciam, para uma melhor gestão desses recursos.

A qualidade e quantidade de água de uma nascente podem ser alteradas por diversos fatores, destacando-se a declividade, o tipo de solo e o uso da terra, principalmente das áreas de recarga, pois influenciam no armazenamento da água subterrânea e no regime de escoamento da nascente e dos cursos d'água.

No Brasil, apesar do aumento no número de investimentos das pesquisas em recursos hídricos, o conhecimento das variáveis hidrológicas, por meio de redes de monitoramento, ainda é limitado, principalmente no que tange aos estudos a respeito dos mananciais subterrâneos (MESTRINHO, 2008).

Nesse sentido o conhecimento da dinâmica da água no processo de recarga subterrânea na área de recarga de nascentes é de suma importância, pois fornecerá informações relevantes sobre o manejo e conservação da água.

A recarga da água subterrânea pode ser definida como o fluxo de água descendente que alcança o nível do lençol superficial, formando uma reserva de água adicional para as águas subterrâneas (ANA; CHAVES, 2011).

A dificuldade na quantificação da recarga subterrânea é minimizada quando se dispõe de dados de monitoramento da flutuação dos níveis do lençol freático, resultando na simplificação de sua quantificação, além de resultar em dados confiáveis. No entanto, em razão da grande quantidade de fatores intervenientes no processo de recarga e a variabilidade diferenciada de cada um desses fatores no tempo e no espaço a quantificação da recarga subterrânea será tão mais precisa quanto maior for o período de monitoramento e quanto mais detalhada for a observação das variáveis envolvidas nesse processo.

Segundo Coelho, Almeida e Silans (2012), os métodos físicos estão entre os mais utilizados para estimar a taxa de recarga em aquíferos livres, principalmente aqueles baseados na flutuação do nível d'água subterrâneo. Um dos principais métodos utilizados é o WTF (*Water Table Fluctuation*) pela sua simplicidade e por apresentar resultados satisfatórios quando comparados a outras técnicas. Vários trabalhos têm sido desenvolvidos utilizando-se essa metodologia, podendo-se destacar os trabalhos de Wendland, Barreto e Gomes (2007), Mazieiro e Wendland (2008), Carnier Neto e Kiang (2008), Gomes (2008), Oliveira (2011), todos com resultados satisfatórios.

Nesse sentido, objetivou-se, neste trabalho, estimar a recarga subterrânea direta, utilizando-se o método WTF (*Water Table Fluctuation*) e realizar um balanço hídrico na zona saturada do solo nas áreas de recarga das nascentes L1 e M1, inseridas, respectivamente nas bacias hidrográficas dos

Ribeirões Lavrinha e Marcela, na região Alto do Rio Grande, à montante da UHE de Camargos/CEMIG.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido em duas nascentes cujas áreas de recarga estão inseridas nas BHRL (ambiente Serra da Mantiqueira) e BHRM (ambiente Campo das Vertentes), ambas pertencentes à Unidade de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos do Alto Rio Grande (UPGRH-GD1), em Minas Gerais, sendo suas localizações apresentadas na Figura 1.

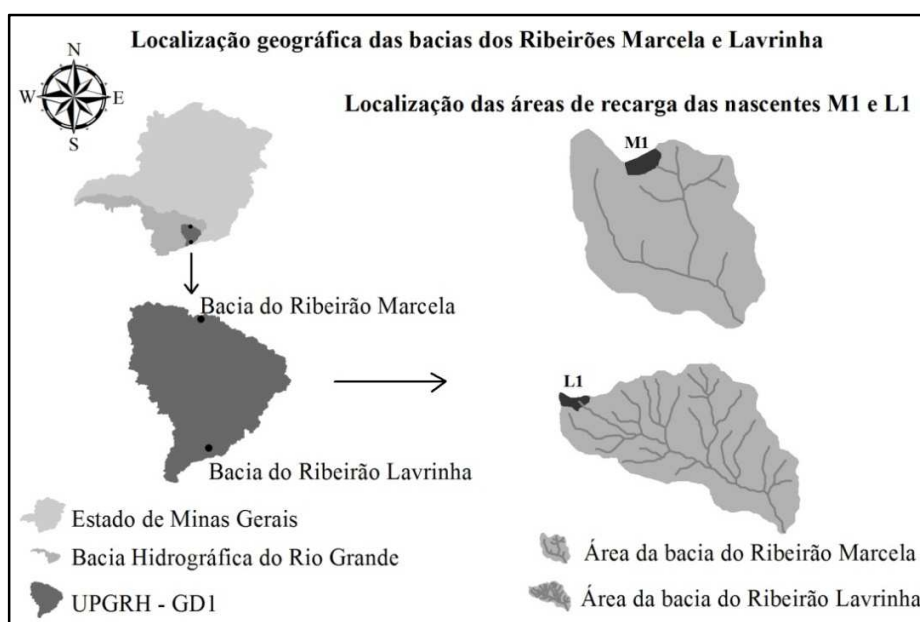


Figura 1 Mapa de situação das bacias hidrográficas que contêm as nascentes estudadas

2.1 Localização e caracterização das áreas de recarga das nascentes nos ambientes da Serra da Mantiqueira e Campo das Vertentes, Região Alto Rio Grande (GD1)

A delimitação das áreas de recarga das nascentes foi realizada levando-se em consideração as linhas de cumeadas (linhas que unem pontos de cotas mais elevadas do terreno), a partir da seção controle de cada nascente (SILVA, 2009). Com base no Modelo Digital de Elevação (MDE), foram geradas curvas de nível equidistantes de 5 m no software ArcGIS® version 9.2, facilitando a visualização das linhas de cumeadas e, manualmente, no software AutoCAD, delimitaram-se as áreas de recarga das nascentes. Para verificar a correta delimitação das áreas, realizou-se, em campo, a locação dos pontos dos divisores de água, utilizando-se de um receptor GPS. Quando ocorreram inconsistências nas delimitações, estas foram devidamente corrigidas (SILVA, 2009).

2.1.1 Ambiente Serra da Mantiqueira

A área de recarga da nascente L1 está inserida na BHRL, a qual desagua diretamente no Rio Grande, localizada na cidade de Bocaina de Minas – MG. Está posicionada 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, ao sul da UPGRH-GD1, na Serra da Mantiqueira. Essa 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 BHRL segundo o Método de Thornthwaite (1948)

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

Fonte: YANAGI (2008).

A temperatura média no mês mais quente e no mês mais frio é 19 °C e 11 °C, respectivamente, com ocorrência de geadas. Verifica-se pela classificação climática que há excedentes hídricos consideráveis, contribuindo para a geração de deflúvio superficial na região.

A BHRL é representativa dos ambientes associados aos Cambissolos da região da Serra da Mantiqueira, Alto Rio Grande, tendo sido escolhida para realização de estudos hidrológicos associados ao deflúvio de base (água subterrânea).

Os Cambissolos são solos desde rasos a medianamente profundos, de sequências de horizontes 'A', 'Bi' (B incipiente) e 'C'. Nessa bacia, segundo Menezes et al. (2014) as profundidades do solo variam entre 0,60 e 1,20 m. 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. Segundo Menezes et al. (2009), essa

bacia apresenta baixa capacidade de recarga de aquíferos do ponto de vista pedológico (92,7% da área composta por Cambissolos) e elevadas declividades.

2.1.2 Declividade da área de recarga da nascente L1 inserida na BHRL

Na Tabela 2, apresenta-se um resumo de algumas das características morfométricas da área de recarga da nascente L1.

Tabela 2 Declividade da área de recarga da nascente L1

Área de recarga da nascente L1	
Área (A) (ha)	7,24
Declividade máx. (%)	218,50
Declividade média (I%)	28,70
Declividade mín. (%)	0,50

As características da declividade podem ser observadas na Figura 2, juntamente com um gráfico referente às informações quantitativas do percentual de área correspondente a cada classe de declividade em relação à área total de recarga da nascente (SILVA, 2009).

Verifica-se 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).

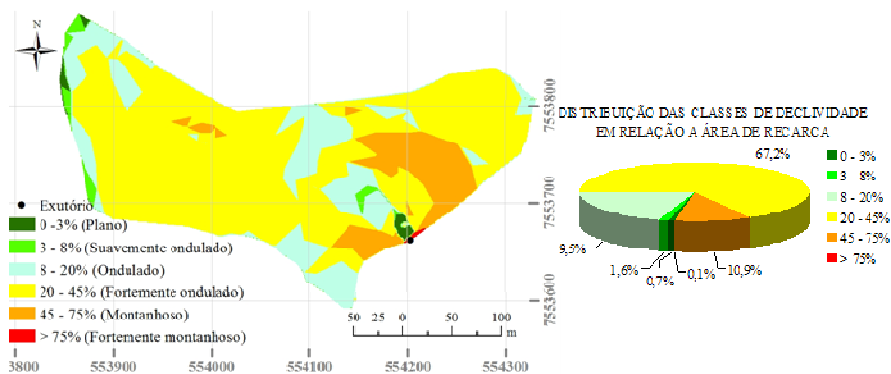


Figura 2 Mapa de classes de declividade da área de recarga da nascente L1
Fonte: (SILVA, 2009)

2.1.3 Uso do solo na área de recarga da nascente L1

Apresenta-se, na Figura 3, o mapa de uso do solo da área de recarga da nascente L1 e sua distribuição percentual.

A área de recarga da nascente L1 com 7,24 ha é ocupada por pastagem em 92,9% da área total e 6,9% por samambaia silvestre e 0,2% por mata. No entorno do ponto de afloramento d'água encontram-se pequenos arbustos onde foi construído pelo proprietário uma cerca de arame num raio médio de 5 metros. Esse local é utilizado para a dessedentação do gado por se tratar do único ponto de acesso à água (SILVA, 2009).

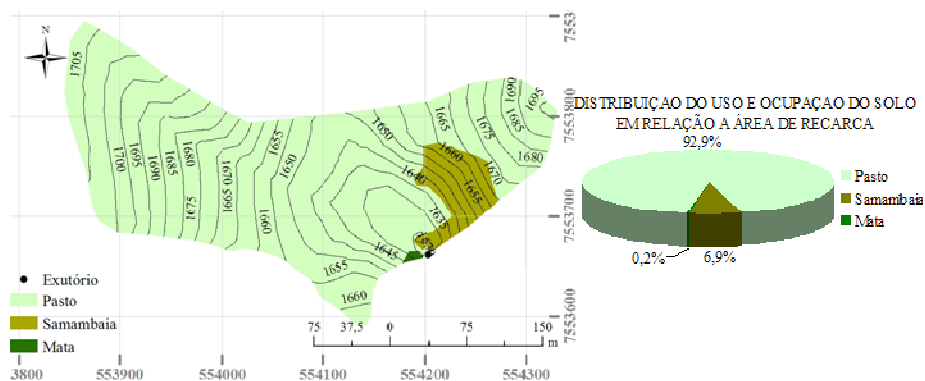


Figura 3 Mapa de uso do solo da área de recarga da nascente L1
Fonte: (SILVA, 2009).

2.1.4 Ambiente Campo das Vertentes

A área de recarga da nascente M1 está inserida na BHRM, desaguando no Córrego Jaguará, que, por sua vez, deságua diretamente no reservatório da UHE de Camargos/CEMIG, localizada no município 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, localizando-se mais ao norte da UPGRH-GD1. Essa bacia possui uma 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 3, apresenta-se o detalhamento da classificação preliminar do seu clima, como B_{1r}B'3a'.

Tabela 3 Classificação climática preliminar para a BHRM segundo o Método de Thornthwaite (1948)

Tipo climático	Índice de Umidade (Iu)
Úmido – Tipo: B₁	$20 \leq Iu < 40$
Clima Úmido	Índice de Aridez (Ia)
Deficiência de água pequena ou nula: r	$0 \leq Ia < 16,7$
Tipo climático	ETP anual
Mesotémico: B₃	$997 > ETP \geq 855$
Subtipo Climático	ETP verão
Subtipo: a'	$ETP_v < 48\%$

Fonte: (YANAGI, 2008)

Conforme registros da estação meteorológica localizada na BHRM, a precipitação e temperatura médias anuais são, respectivamente, de 1300 mm e 19,7 °C, com ocorrência de temperaturas máxima e mínima diária, ao longo do ano, de 36,2 e 2,6 °C. A classificação climática sinaliza um índice de umidade que supera a evapotranspiração, porém o excedente hídrico não é tão expressivo quanto o observado na área de recarga da nascente L1.

Segundo Gomes (2008), o solo predominante é o Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico (LVAd), ocupando cerca de 65% da área. Essa 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. Mesclado ao LVAd, ocorre o Latossolo Vermelho Distrófico típico (LEd), em cerca de 14% da área da bacia. Já, os Cambissolos (C) ocupam menos de 5% e os Hidromórficos (Hi), compreendendo as várzeas, cerca de 16% da área da bacia.

2.1.5 Declividade da área de recarga da nascente M1

Na Tabela 4, apresenta-se um quadro resumo de algumas das características morfométricas da área da nascente estudada.

Tabela 4 Declividade da área de recarga da nascente M1

Área de recarga da nascente M1	
Área (A) (ha)	9,14
Declividade máx. (%)	72,4
Declividade média (I%)	17,0
Declividade mín. (%)	0,5

Na área de recarga da nascente M1, Figura 4, 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).

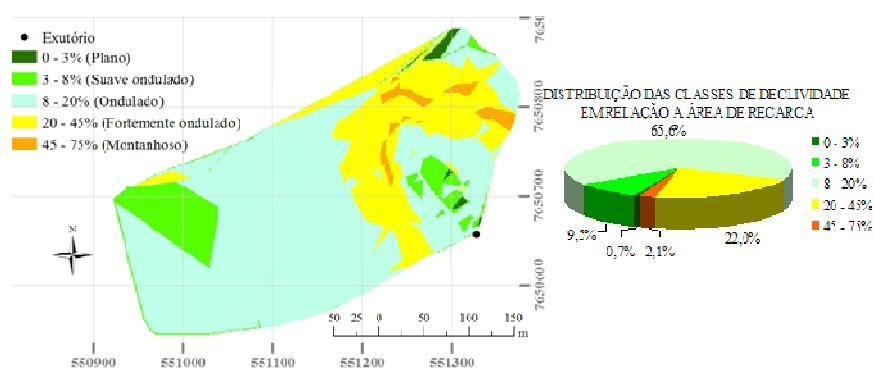


Figura 4 Mapa de classes de declividade da área de recarga da nascente M1

Fonte: (SILVA, 2009).

2.1.6 Uso do solo na área de recarga da nascente M1

Na Figura 5, apresenta-se o mapa de uso do solo da área de recarga da nascente M1 e sua distribuição percentual.

A área de recarga da nascente M1 com 9,14 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 contra o pisoteio do gado no local de afloramento d'água e, anualmente, no período seco, há ocorrência de queimadas.

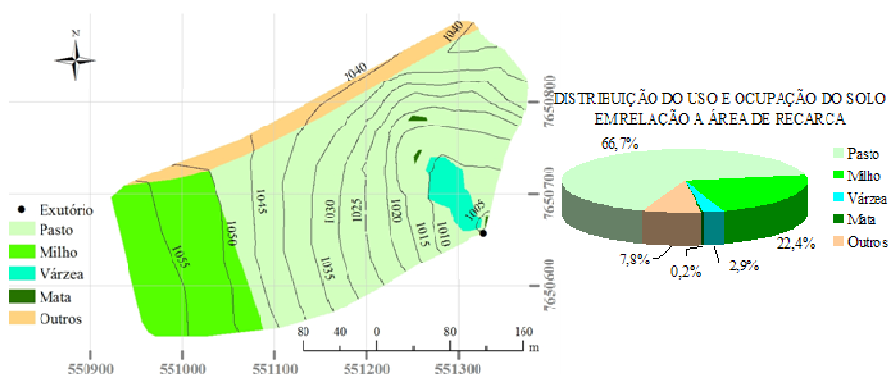


Figura 5 Mapa de uso do solo da área de recarga da nascente M1

Fonte: (SILVA, 2009)

2.2 Estimativa da recarga direta subterrânea

Para a estimativa da recarga direta (R_d), foi utilizado o método *Water Table Fluctuation* (WTF) que consiste na identificação das variações de nível do lençol freático e extrapolação das curvas de recessão, curvas que o nível do lençol freático teria seguido na ausência de recarga (HEALY; COOK, 2002;

SCANLON; HEALY; COOK, 2002; WAHNFREID; HIRATA, 2005). A recarga direta foi estimada para cada poço de observação do lençol freático, obtendo-se, ao final, o valor médio de todos os poços para representar a recarga direta para a área de recarga da nascente. A partir dos níveis do aquífero, é possível determinar as variações do nível d'água subterrâneo (Δh).

Para extrapolar a curva de recessão, utilizou-se uma equação do tipo potencial, conforme Wendland, Barreto e Gomes (2007).

$$Ne = a * (Dj)^b \quad (1)$$

onde Ne é o nível extrapolado; Dj é o dia contado a partir do primeiro dia de monitoramento dos níveis; a e b parâmetros de ajuste.

A recarga direta foi determinada pela seguinte equação:

$$R_d = S_y \cdot \frac{dh}{dt} = S_y \cdot \frac{\Delta h}{\Delta t} \quad (2)$$

em que R_d é a recarga direta [$L \cdot T^{-1}$], S_y é a porosidade drenável [$L^3 \cdot L^{-3}$]; Δh é a variação do nível freático [L], e o Δt é o intervalo de tempo entre o pico de subida e o ponto mais baixo da curva de recessão antes do início da subida [T^{-1}].

O valor de S_y foi obtido pela equação 3:

$$S_y = P - \theta_{cc} \quad (3)$$

em que P é a porosidade do solo, e θ_{cc} é a umidade volumétrica na capacidade de campo [$L^3 \cdot L^{-3}$].

O valor de S_y para a zona saturada do solo foi considerado igual ao da zona não saturada. Para sua obtenção, considerou-se o valor médio do perfil do

solo, obtido de um processo de espacialização da porosidade drenável na área de recarga das nascentes para cada poço de observação do lençol freático.

2.3 Recarga profunda

Para a estimativa da recarga profunda (R_p) o método assume o volume de controle do balanço hídrico como sendo a região saturada do solo da área de recarga da nascente. A entrada no sistema será dada pela recarga direta, R_d , estimada pelo método WTF. A variação do armazenamento subterrâneo (ΔS) foi 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) estimada como o resíduo da equação a seguir:

$$R_p = R_d - q_b + \Delta S \quad (4)$$

em que q_b corresponde ao deflúvio base para cada uma das áreas de recarga das nascentes, todas as variáveis com dimensão [L].

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 (S_y), expresso pela Equação 5 (WENDLAND; BARRETO; GOMES, 2007):

$$\Delta S = (h_f - h_i) \cdot S_y \quad (5)$$

em que h_f e h_i [L] correspondem, respectivamente, ao nível do aquífero no último e no primeiro dia de monitoramento.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Análises do regime do escoamento – Deflúvio

Na Tabela 5, é apresentada a síntese dos deflúvios e das precipitações ocorridos nas áreas de recargas das nascentes L1 e M1 e suas participações na precipitação.

Ao se analisar os dados da Tabela 5, percebe-se que, na área de recarga da nascente L1, em todos os anos hidrológicos ocorreu um total de chuva superior ao ocorrido na área de recarga da nascente M1, conseqüentemente, maior potencialidade para gerar escoamento.

Em termos relativos, a maior capacidade da área de recarga da nascente L1 gerar escoamento é comprovada quando se analisa a relação Db/P que, em média, foi 43% superior à área de recarga da nascente M1, mostrando maior eficiência no processo de infiltração e, conseqüentemente, de recarga subterrânea.

Tabela 5 Análise do regime de escoamento das áreas de recarga das nascentes L1 e M1

Nascente L1	Análise do escoamento			
	Out 2009 - Set 2010	Out 2010 – Set 2011	Out 2011 – Set 2012	Out 2012 – Jan 2013
P (mm)	1879,08	1360,98	1704,34	1511,66
Db (mm/ano)	506,51	649,34	594,83	295,11
Db/P (%)	26,96	47,71	34,9	19,53

Nascente M1	Análise do escoamento			
	Out 2009 - Set 2010	Out 2010 – Set 2011	Out 2011 – Set 2012	Out 2012 – Jan 2013
P (mm)	1227,91	1331,7	1413,14	1019,44
Db (mm/ano)	245,39	207,57	274,26	150,24
Db/P (%)	19,98	15,59	19,41	14,74

P = precipitação; Db = deflúvio de base.

A seguir, estão apresentados os Gráficos 1 a 8, contendo as hidrógrafas e os hietogramas de todos os anos hidrológicos, visando a subsidiar as análises a respeito dos deflúvios.

Embora o ano hidrológico 2009/2010 tenha apresentado o maior volume de chuva dentre os anos analisados, o deflúvio base não correspondeu na mesma proporção, pois apresentou um dos menores valores. Uma possível explicação pode ser obtida ao se analisar o Gráfico 1, onde ficam evidentes valores de chuva acumulada bastante elevados, concentrados em curtos períodos de tempo, o que favorece o deflúvio superficial direto e concorre com o processo de infiltração e recarga. Outro possível condicionante para tal situação é a umidade antecedente do solo, caso esta esteja muito baixa, também concorrerá com o processo de recarga e sustentação do deflúvio de base.

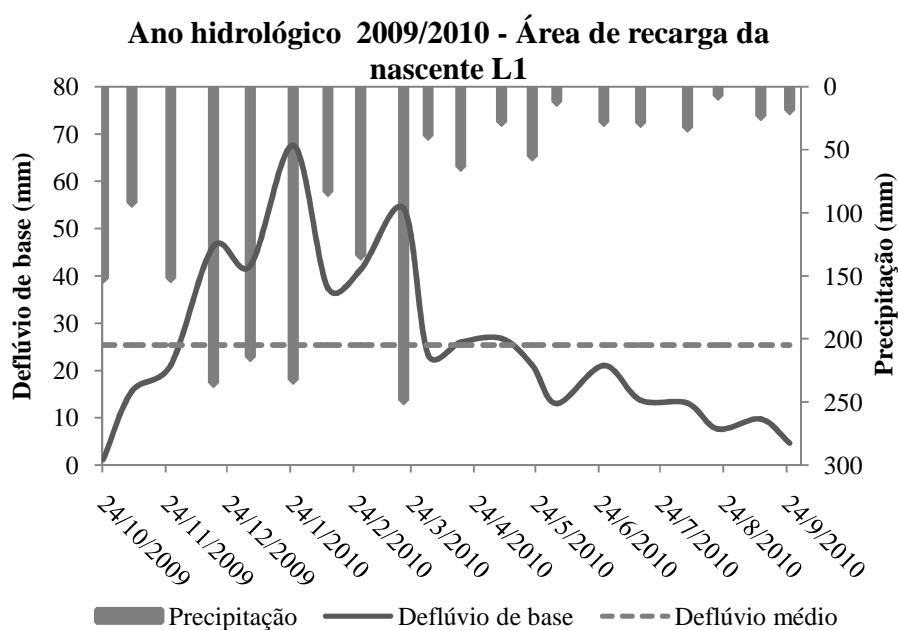


Gráfico 1 Hidrograma e hietograma para o ano hidrológico 2009/2010 na área de recarga da nascente L1

Para o ano hidrológico 2010/2011, embora tenha ocorrido diminuição do total de chuva em relação ao ano anterior, ocorreu aumento no deflúvio de base. Indicando uma melhor distribuição das chuvas, o que pode ser observado quando se analisa o Gráfico 2, onde a precipitação máxima acumulada foi de 221 mm, enquanto que no ano anterior ocorreram vários eventos com total acima de 200 mm.

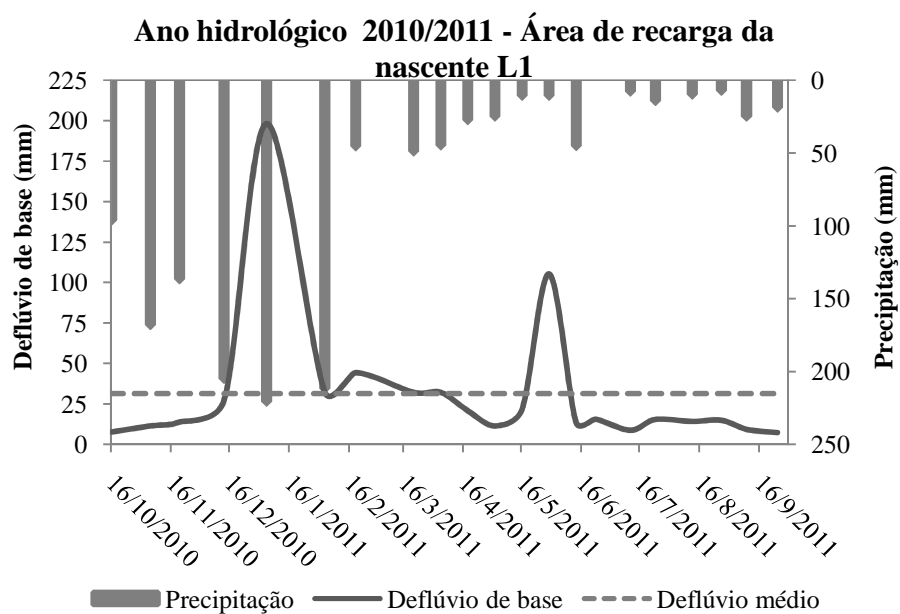


Gráfico 2 Hidrograma e hietograma para o ano hidrológico 2010/2011 na área de recarga da nascente L1

No ano hidrológico 2011/2012 ocorreu uma situação intermediária entre o ano 2009/210 e 2010/2011, com algumas precipitações elevadas em curtos períodos, porém com menor frequência, resultando um valor ainda relativamente alto para a relação D_b /Precipitação (Gráfico 3).

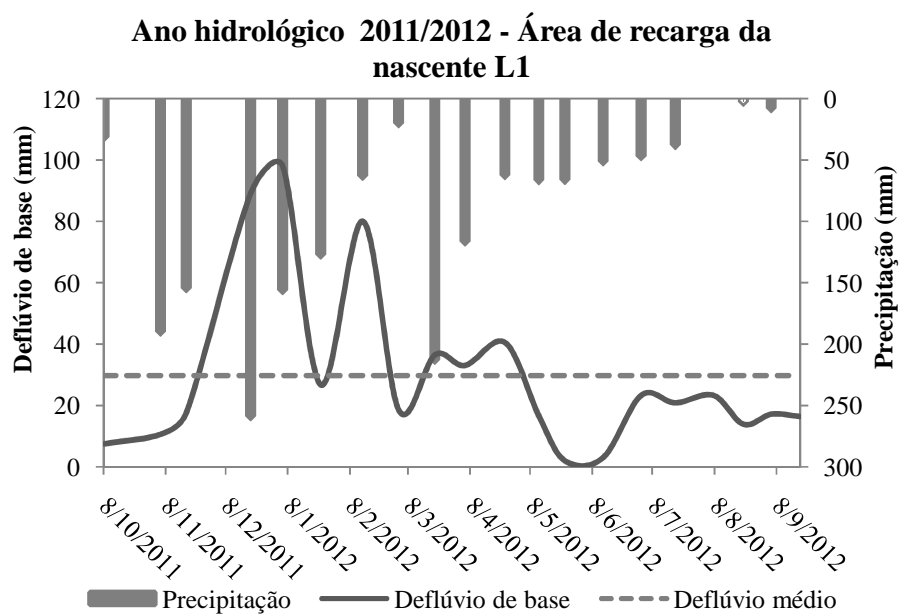


Gráfico 3 Hidrograma e hietograma para o ano hidrológico 2011/2012 na área de recarga da nascente L1

Para o ano hidrológico 2012/2013, como foi apresentado somente parte do tempo, a análise fica prejudicada, porém o valor não se pode inferir sobre seu comportamento (GRÁFICO 4).

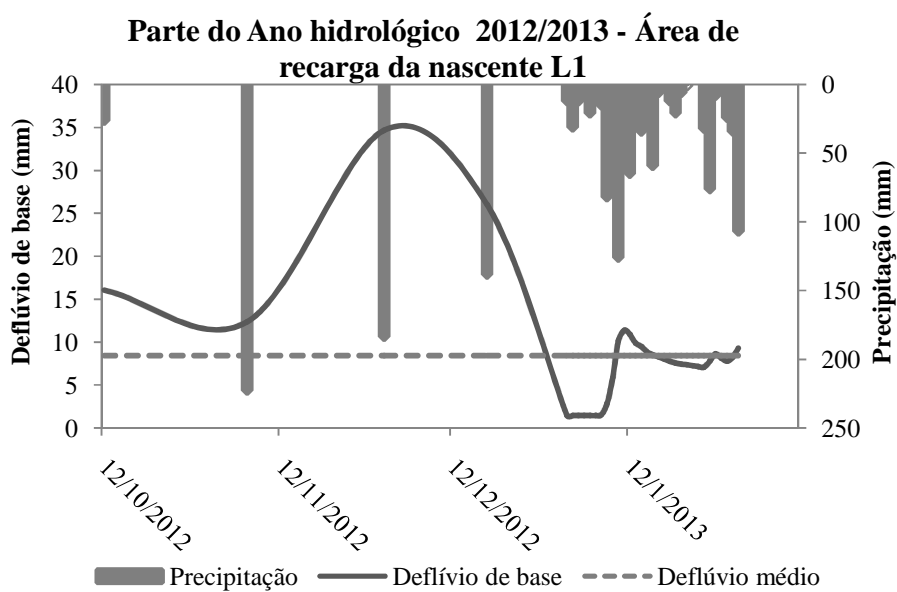


Gráfico 4 Hidrograma e hietograma para o ano hidrológico 2012/2013 na área de recarga da nascente L1

Com relação à área de recarga da nascente M1, o ano hidrológico 2009/2010 apresentou um dos menores totais de chuva, porém, o segundo maior deflúvio de base, além de um valor médio superior aos demais anos. O que pode ter contribuído para o deflúvio mais elevado foi a melhor distribuição temporal das chuvas (GRÁFICO 5).

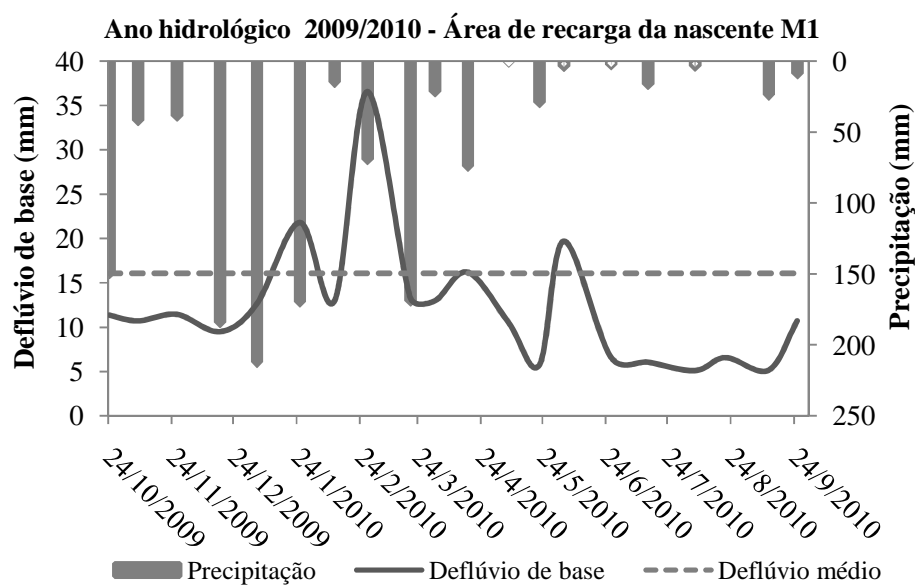


Gráfico 5 Hidrograma e hietograma para o ano hidrológico 2009/2010 na área de recarga da nascente M1

Para o ano hidrológico 2010/2011, ocorreu um aumento no total de chuvas, porém, uma redução no deflúvio em relação ao ano anterior. Ao se analisar o Gráfico 6, percebem-se pontos com elevados valores de chuva, contribuindo para um menor tempo de oportunidade para que ocorra o processo de infiltração e recarga, contribuindo, portanto, para a redução do deflúvio de base.

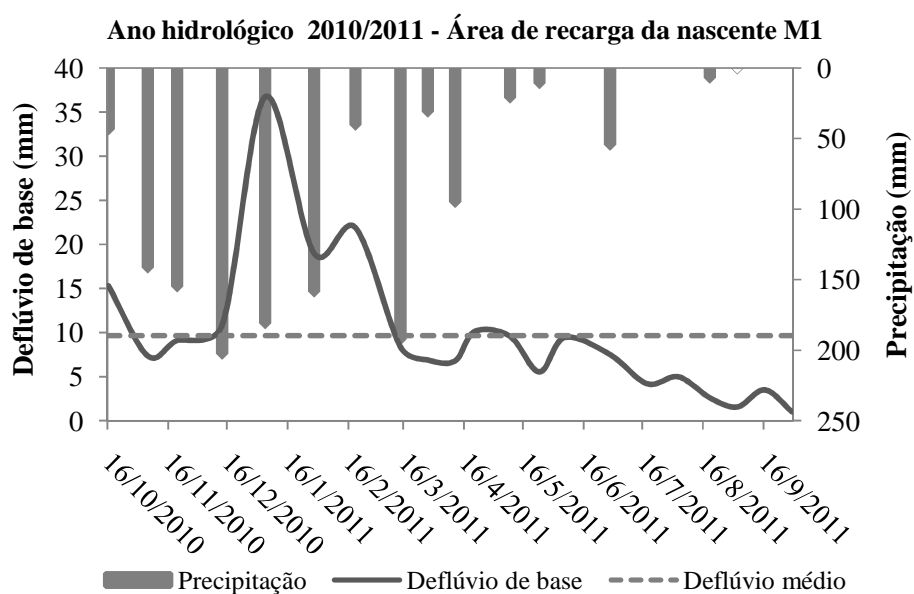


Gráfico 6 Hidrograma e hietograma para o ano hidrológico 2010/2011 na área de recarga da nascente M1

No ano hidrológico 2011/2012, houve um atraso no início do período chuvoso, que se prolongou até o mês de julho. Esse fato, aliado a uma melhor distribuição temporal das chuvas, contribuiu para que ocorresse o maior deflúvio de base dentre os anos hidrológicos analisados (GRÁFICO 7).

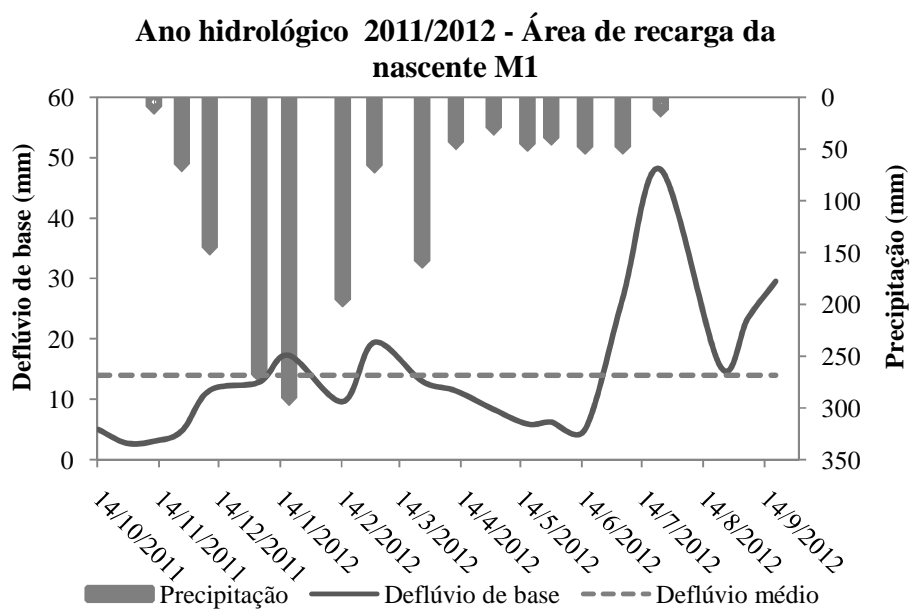


Gráfico 7 Hidrograma e hietograma para o ano hidrológico 2011/2012 na área de recarga da nascente M1

Como foi apresentado somente parte do ano hidrológico 2012/2013, não se pode inferir sobre seu comportamento (GRÁFICO 8).

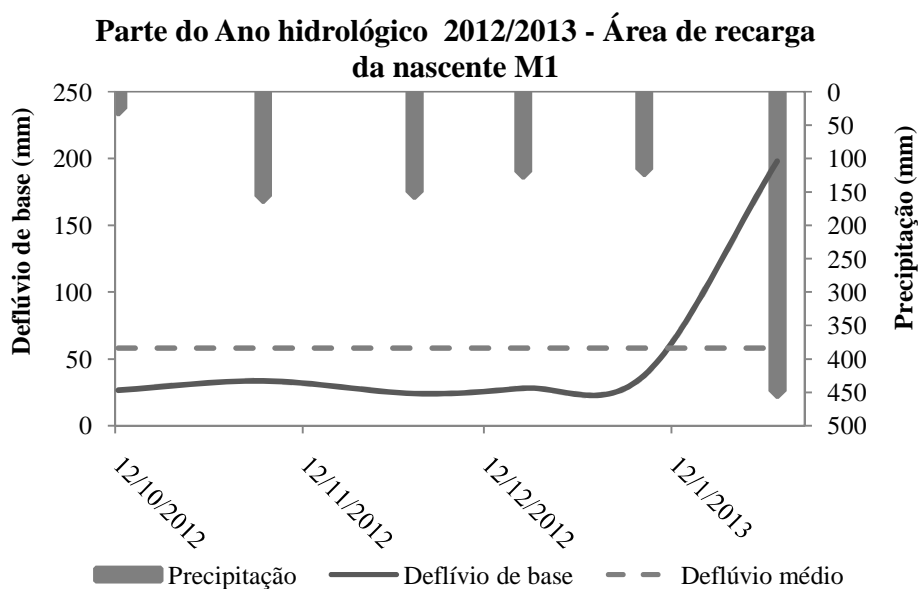


Gráfico 8 Hidrograma e hietograma para o ano hidrológico 2012/2013 na área de recarga da nascente M1

A análise simultânea do ocorrido nas duas áreas de recarga das nascentes, permite constatar que no ano hidrológico 2009/2010, Gráfico 1 e Gráfico 5, as chuvas concentram-se entre os meses de outubro a março em ambas as áreas. A parcela da precipitação do período chuvoso representou 79% do total anual na área da nascente L1 e 85% na área da nascente M1. Portanto, na área da L1, além da precipitação ter sido maior, houve uma menor concentração das chuvas, favorecendo o processo de infiltração e, conseqüentemente, recarga do lençol freático. Esse fato se repetiu em todos os anos hidrológicos, comprovado pelos maiores valores de deflúvios gerados na L1 quando comparados aos da nascente M1.

Outro aspecto importante a ser analisado é a resposta imediata no deflúvio base aos eventos de precipitação. Observa-se que na área de recarga da nascente L1 em, praticamente, todos os eventos de precipitação ocorre uma

elevação no deflúvio base, fato que pode ser atribuído à associação entre os processos de infiltração e redistribuição da água e à menor profundidade do Cambissolo presente nessa área, os quais favorecem a recarga mais rápida do aquífero, quando comparado à área de recarga da nascente M1, que apresenta menor efetividade na redistribuição da água, além de um solo muito profundo, o Latossolo.

Embora a área de recarga da nascente L1 apresente maiores totais precipitados, uma melhor distribuição das chuvas e maiores valores de deflúvios, esta apresenta menor capacidade de regularização natural dos deflúvios do que a área de recarga da nascente M1. Fato percebido quando se analisa a decomposição dos deflúvios nos períodos de recarga e depleção, onde, em média, 60% do deflúvio total é drenado no período de recarga, já, na área de recarga da nascente M1. Essa proporção é da ordem de 53%, demonstrando melhor regularização. Além disso, ao final do ano hidrológico, apresenta menor amplitude de variação do deflúvio em relação a sua média do que na área de recarga da nascente L1, o que pode ser atribuído à maior capacidade de retenção de água pelo Latossolo, promovendo uma drenagem mais eficiente ao longo do tempo.

Nos demais anos hidrológicos a análise desenvolvida também se aplica, pois os valores dos indicadores praticamente se repetem.

Nas Tabelas 6 e 7, são apresentadas algumas características relevantes presentes nas áreas das duas nascentes, cuja análise permite ter uma melhor compreensão do processo de geração de deflúvio nas duas áreas de recarga.

Tabela 6 Distribuição das classes de solos, uso predominante e atributos físico-hídricos do solo na área de recarga das nascentes L1 e M1

	ÁREA DE RECARGA DAS NASCENTES	
	L1	M1
	Cambissolo CX A fraco forte ondulado	Predominância Latossolo Vermelho Amarelo
Classe de Solos*		
Área Recarga (ha)**	7,24	9,14
Classes de Relevo**	Distribuição das classes de relevo (%)	
Fortemente montanhoso (>75%)	0,1	-
Montanhoso (45-75%)	10,9	2,1
Fortemente ondulado (20-45 %)	67,2	22,1
Ondulado (8-20%)	19,5	65,6
Suavemente ondulado (3-8%)	1,6	9,5
Plano (0-3%)	0,7	0,7
Declividade média (%)	28,7	17,0
Uso predominante (%)**		
Pastagem	92,9	66,7
Samambaia	6,9	-
Mata nativa	0,2	0,2
BR 265	-	7,8
Milho	-	22,4
Várzea	-	2,9

Fontes: *Menezes et al. (2009); **Silva (2009).

Ao se analisar a Tabela 6, constata-se que os grandes diferenciais entre as áreas de recargas são a classe de solo e a declividade média. Sendo que, com base nessas características, e no contexto pedológico, há um maior potencial da área de recarga da nascente M1 ser mais efetiva no processo de recarga do lençol d'água superficial, do que a área da nascente L1, pois os Latossolos, em geral, são solos com maior capacidade de infiltração e estão associados à uma declividade média menor. Por outro lado, o Cambissolo, em geral, apresenta

menor capacidade de infiltração, maior declividade, pouca profundidade e menor capacidade de armazenamento de água no solo (ALMEIDA; RESENDE, 1985; CURI; CHAGAS; GIAROLA, 1994; SANTOS et al., 1998), estando ainda associado a uma maior declividade média.

Com relação ao porte da área de recarga e uso do solo, as diferenças entre elas são menos significativas. O porte da área da nascente M1 é cerca de 26% maior do que o da L1, o que pode representar um reservatório maior e conferir à nascente M1 uma maior capacidade de regularização do escoamento quando comparado à nascente L1. Com relação à ocupação, a área de recarga da nascente L1 apresenta 92,9% de pastagem enquanto a área de recarga da nascente M1 66,7%, que apresenta, porém, 22,4% com cultura do milho, a qual permanece no campo por aproximadamente 5 meses, sendo o restante do tempo utilizada como pastagem. A porcentagem de mata nativa presente em ambas as áreas de recargas é de apenas 0,2%, não havendo, portanto, neste particular diferenças significativas.

Na Tabela 7, estão apresentados os valores médios dos atributos físico-hídricos, das camadas de solos presentes nas áreas das nascentes L1 e M1, obtidos pelo processo de espacialização.

Tabela 7 Atributos físico-hídricos presentes nas áreas de recarga das nascentes

L1	0 - 20 cm	20 - 40 cm	40 - 60 cm	60- 80 cm	80 - 100 cm
μ (%)	8,31	12,05	13,53	13,57	15,00
M (%)	44,70	35,45	37,05	36,03	36,19
K_0 (m/dia)	2,27	2,00	7,33	4,02	1,08
Ds (g/cm ³)	1,22	1,28	1,30	1,33	1,39
MO (Dag/kg)	3,71	2,89	2,09	1,46	1,12
Areia (%)	54,50	53,46	53,58	52,33	57,75
Silte (%)	12,50	12,33	13,54	15,41	13,81
Argila (%)	31,72	33,63	34,39	30,15	27,44
M1	0 - 20 cm	20 - 40 cm	40 - 60 cm	60- 80 cm	80 - 100 cm
μ (%)	10,10	11,60	14,06	15,14	15,41
M (%)	40,68	40,85	40,47	40,15	40,09
K_0 (m/dia)	2,12	0,45	0,86	0,46	0,18
Ds (g/cm ³)	1,25	1,22	1,17	1,14	1,15
MO (Dag/kg)	3,01	2,34	1,68	1,23	0,95
Areia (%)	31,61	31,27	26,12	25,85	30,57
Silte (%)	17,21	17,84	18,84	17,77	16,35
Argila (%)	50,99	51,00	52,99	54,13	51,76

*Valores médios das áreas de recarga das nascentes obtidos no processo de espacialização dos dados.

Os valores da porosidade drenável (μ) das diferentes camadas não diferem substancialmente, quando são analisados comparativamente entre as duas nascentes. Os valores de porosidade drenável aumentam à medida que se aprofundam no perfil do solo, em ambas as áreas de recarga, com exceção para a camada de 60 – 80 cm na área de recarga da nascente L1, onde ocorreu uma pequena redução em seu valor (FIGURA 6). Esse atributo tem relação direta com o movimento de água no solo, e, por consequência, na infiltração e capacidade de recarga subterrânea.

Já, a microporosidade (M) que tem relação oposta à porosidade drenável, ou seja, quanto maior seu valor, maior é o reservatório de água no perfil do solo, o que concorre com o processo de redistribuição e recarga, e, conseqüentemente, de sustentação do deflúvio base. A área de recarga da nascente L1 apresenta em todas as camadas, com exceção da camada de 0 – 20, cm valores menores do que os encontrados na área de recarga da nascente M1 (FIGURA 6), esse fato proporciona menores retenções de água pela matriz do solo, permitindo uma drenagem mais eficiente, favorecendo o processo de recarga subterrânea. Um dos principais fatores a determinar essa diferença, é a distribuição das unidades texturais dos solos. Os menores valores da microporosidade apresentado pelo Cambissolo na área de recarga da nascente L1 podem estar associados aos maiores teores de areia, variando entre 52,33 a 57,75%, e aos menores teores de argila (27,44 a 34,39%), enquanto que o Latossolo presente na área de recarga da nascente M1 apresentou menores teores de areia (25,85 a 31,61%) associados aos maiores teores de argila (50,99 a 54,13%). Teores maiores de areia, em geral, resultam em solos com menor superfície de contato, menor retenção e maior facilidade para o processo de redistribuição da água no perfil. Por outro lado, teores maiores de argila e silte, resultam em solos com maior superfície de contato, maior retenção de água e maior dificuldade para o processo de infiltração.

Na área de recarga da nascente L1, a densidade do solo aumenta à medida que se aprofunda no perfil do solo, fato consistente com as características do Cambissolo que ocorre na área, que é pouco intemperizado, quando comparado ao Latossolo presente na área de recarga da nascente M1, onde a densidade do solo diminui com a profundidade do perfil (FIGURA 6).

A matéria orgânica está presente em maiores quantidades em todas as camadas analisadas da área de recarga da nascente L1, apresentando decréscimo à medida que se aprofunda no perfil do solo em ambas as áreas de recargas das

nascentes (FIGURA 6). Ela é fator importante na estruturação do solo, que vai influenciar na condutividade hidráulica do mesmo.

A condutividade hidráulica saturada do solo apresentou valores mais elevados para a área de recarga da nascente L1, variando entre 1,08 a 2,27 m/dia enquanto na área de recarga da nascente M1 os valores variaram entre 0,18 a 2,12 m/dia. À medida que se aprofunda no perfil do solo, os valores da condutividade hidráulica saturada do solo na área de recarga da nascente M1 reduzem, dificultando a percolação da água em profundidade e a recarga subterrânea. Esse comportamento está consistente com o comportamento dos atributos físico-hídricos que influenciam na condutividade hidráulica saturada, como porosidade drenável, teor de areia, matéria orgânica entre outros, que se mostraram com valores distintos entre as áreas, com valores superiores para a área da nascente L1, o que explica os maiores valores de condutividade hidráulica, ao longo perfil do solo, na área de recarga da nascente L1.

Diante das análises apresentadas, pode-se que, destacar que, embora o solo presente na área de recarga da nascente L1 seja o Cambissolo, o que em termos pedológicos sinaliza para condições mais desfavoráveis à recarga do lençol superficial, o mesmo, converteu maior proporção do volume precipitado em deflúvio base. Embora haja uma grande discrepância nas classes de relevo entre as áreas de recarga das duas nascentes, sendo a área da nascente L1 mais acidentada, esse efeito não foi suficiente para reduzir o processo de recarga.

As condições de uso do solo, não foram substancialmente diferentes a ponto de influenciar no processo de infiltração. O grande diferencial pode estar associado aos atributos físico-hídricos que influenciam na condutividade hidráulica saturada que, nesse caso, mostraram-se mais favoráveis na área da nascente L1, e a menor capacidade de retenção de água no perfil do Cambissolo.

Assim sendo, pode-se afirmar que a grande diferença entre as áreas de recargas das nascentes na capacidade de gerar deflúvio base, explicou-se pelos

atributos físico-hídricos e índice pluviométrico que, nesse caso, resultaram numa associação mais efetiva na área da nascente L1.

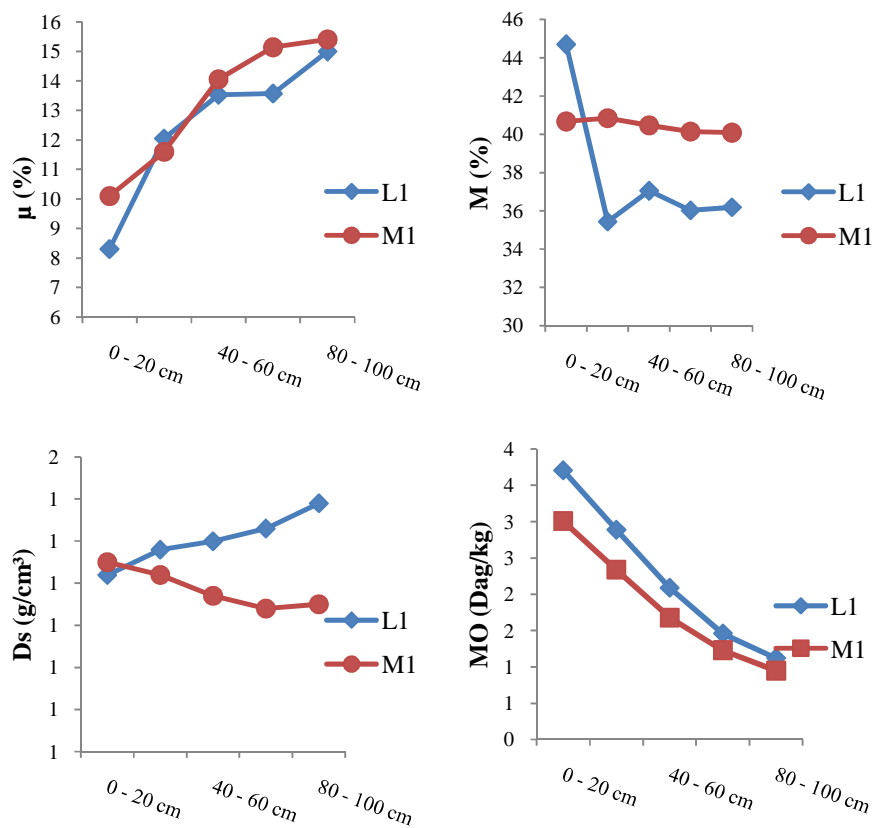
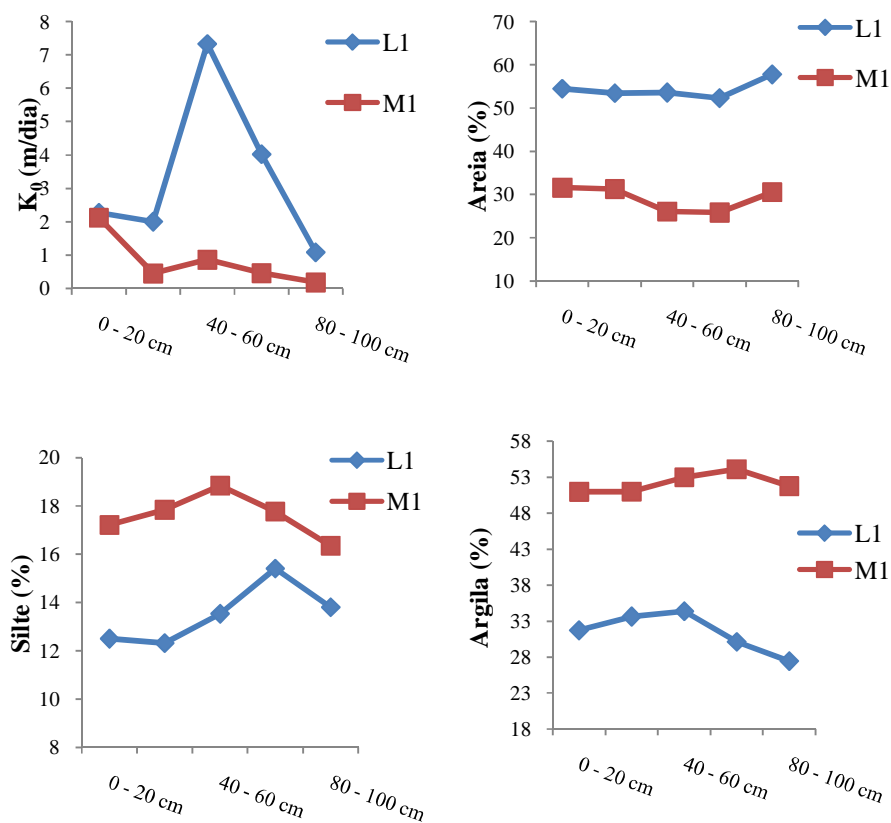


Figura 6 Comportamento dos atributos físico-hídricos no perfil do solo nas áreas de recarga das nascentes L1 e M1

(...continua...)



Considerando a metodologia proposta por Souza (1993) e adaptada por Silva (2014) que classifica as regiões segundo sua potencialidade hidrológica para gerar deflúvio superficial às áreas de recarga das nascentes L1 e M1 teriam tipologias correspondentes a 422 (precipitação anual acima de 1500mm, declividade média de 28,7% e solo classe Cambissolo) e 333 (precipitação anual entre 1200 e 1500mm, declividade média de 17% e solo Latossolo Vermelho Amarelo), respectivamente. Portanto, o único fator que L1 supera a M1 é o elevado índice pluviométrico e, nos demais, relevo e classe de solo, condições potencialmente inferiores. Entretanto os resultados obtidos neste trabalho, bem como por Oliveira et al. (2014), Silva et al. (2012) mostram que as áreas de

recargas das nascentes no ambiente Serra da Mantiqueira têm sido mais eficientes na formação de deflúvio superficial.

Um dos aspectos que vale destacar é que a metodologia de Souza (1993) tem um caráter mais genérico e é recomendável em termos de planejamento, porém em termos de manejo há que se conhecer com detalhes as características do ambiente a ser trabalhado. Nesse caso, tomando-se como base as características dos atributos físico-hídricos do Cambissolo em particular em relação a sua condutividade hidráulica e porosidade drenável, seus valores são melhores do que os do Latossolo Vermelho Amarelo. Um fator que pode estar contribuindo para essa condição é o elevado teor de matéria orgânica. Essa situação de contradição reforça a necessidade de conhecer com detalhes e precisão esses atributos, pois o simples enquadramento pela classe de solo pode resultar em conclusões errôneas.

Dois aspectos a mais devem ser incluídos nessa análise. O primeiro deles diz respeito à microporosidade e, portanto à capacidade de retenção de água que é maior no Latossolo e, nesse caso, em relação ao processo de recarga do lençol superficial, essa característica é desfavorável. O segundo diz respeito à profundidade da camada de solo que, normalmente, fica insaturada e, portanto, a um reservatório que concorre com o processo de recarga. O Latossolo apresenta maior profundidade do que o Cambissolo que possui horizonte B incipiente e profundidades menores (MENEZES et al., 2014). Portanto, considerando um regime pluvial mais favorável com elevado excedente hídrico, esse ambiente torna-se muito propício para gerar deflúvio, sobretudo, o componente de base.

3.1.1 Balanço hídrico na zona saturada do solo

Nas áreas de recarga das nascentes L1 e M1 foi realizado um balanço hídrico na zona saturada do solo, sendo os componentes do balanço apresentados a seguir.

3.1.2 Estimativa do rendimento específico (Sy)

Os valores médios do rendimento específico (Sy), para cada poço de observação do lençol freático, está apresentado na Tabela 8, a seguir.

Tabela 8 Valores médios do rendimento específico (Sy) no perfil do solo nas áreas de recarga das nascentes L1 e M1

Área de recarga nascente L1				Área de recarga nascente M1			
Poços	Sy	σ	CV (%)	Poços	Sy	σ	CV (%)
1	0,1486	0,046	30,73	1	0,1408	0,025	17,63
2	0,1513	0,049	32,19	2	0,1423	0,024	16,53
3	0,1492	0,052	34,73	3	0,1524	0,031	20,67
4	0,1533	0,074	48,46	4	0,1523	0,036	23,41
5	0,1535	0,082	53,18	5	0,1557	0,041	26,43
6	0,1496	0,054	35,88	6	0,1534	0,032	20,56
7	0,1529	0,075	48,77	7	0,1336	0,045	33,89
8	0,1533	0,077	50,42	8	0,1489	0,034	22,70
9	0,1540	0,029	19,04	9	0,1475	0,036	24,68
10	0,1554	0,033	21,45	10	0,1685	0,039	23,44
11	0,1620	0,041	25,23	11	0,1677	0,037	21,78
12	0,1544	0,035	22,47	12	0,1533	0,041	27,04
13	0,1357	0,027	19,59	13	0,1782	0,065	36,49

“Tabela 8, conclusão”

Área de recarga nascente L1				Área de recarga nascente M1			
Poços	S _y	σ	CV (%)	Poços	S _y	σ	CV (%)
14	0,1365	0,047	34,25	14	0,1371	0,042	30,63
15	0,1391	0,050	36,09	15	0,1438	0,040	27,54
16	0,1517	0,023	15,28	16	0,1771	0,069	38,70
17	0,1443	0,043	29,69	17	0,1548	0,085	55,12
18	0,1558	0,025	16,29	18	0,1630	0,033	20,43
19	0,1810	0,032	17,45	19	0,1301	0,021	15,89
20	0,1565	0,021	13,14	20	0,1800	0,044	24,45
21	0,1479	0,044	29,53	21	0,1439	0,044	30,38
22	0,1222	0,029	23,73	22	0,1306	0,046	34,96
23	0,1461	0,022	15,18	23	0,1093	0,045	41,40
24	0,1191	0,036	30,30	24	0,1432	0,017	11,92
-	-	-	-	25	0,1505	0,029	19,11
-	-	-	-	26	0,1402	0,065	46,10
-	-	-	-	27	0,1534	0,045	29,20
-	-	-	-	28	0,2300	0,179	77,87

Verifica-se que ambas as áreas de recarga apresentam grande variabilidade nos valores médios de S_y, apresentando coeficiente de variação entre 13,14 a 53,18% na área de recarga da nascente L1 e 11,92 a 77,87% na área de recarga da nascente M1.

3.1.3 Variação dos níveis do lençol freático

Nos Gráficos 9, 10, 11 e 12 são apresentadas as variações do nível do lençol freático ocorridas nos poços na área de recarga da nascente L1.

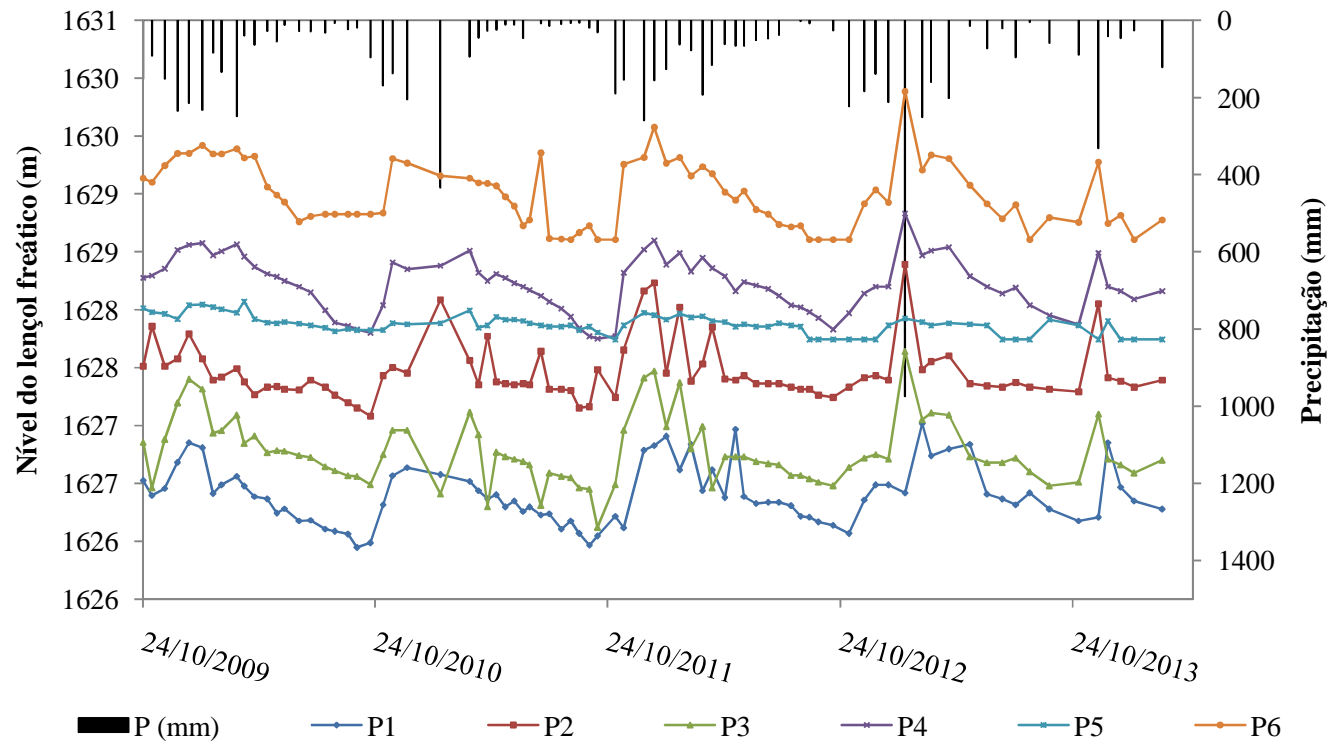


Gráfico 9 Comportamento do nível do lençol freático nos poços 1, 2, 3, 4, 5 e 6 na área de recarga da nascente L1
 Obs.: a precipitação foi acumulada em períodos aproximadamente quinzenal.

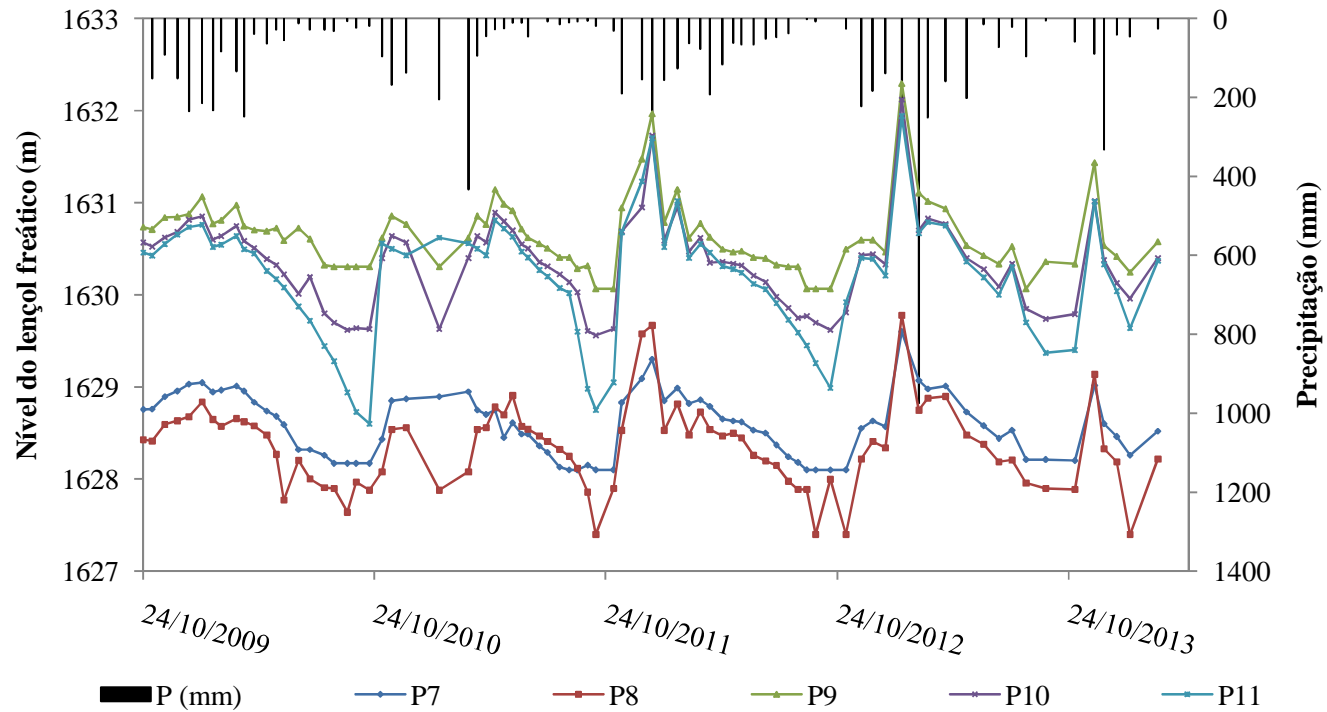


Gráfico 10 Comportamento do nível do lençol freático nos poços 7, 8, 9, 10 e 11 na área de recarga da nascente L1
 Obs.: a precipitação foi acumulada em períodos aproximadamente quinzenal.

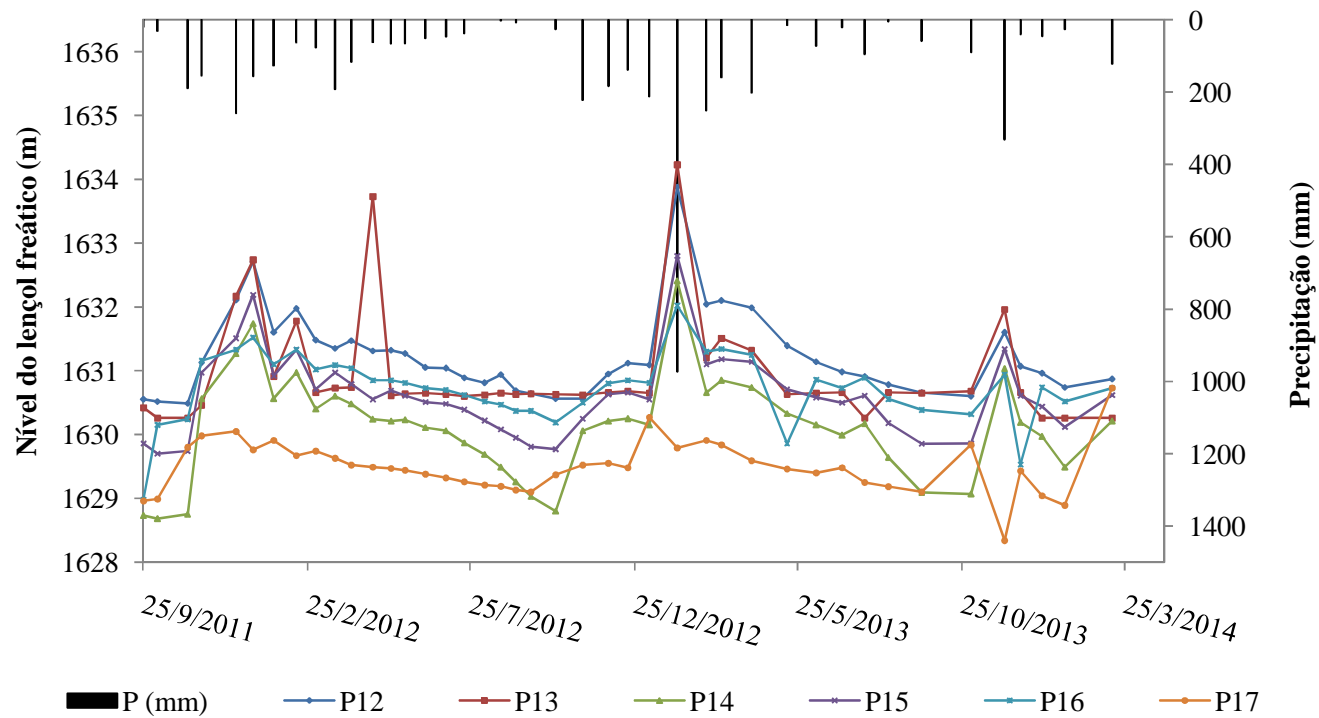


Gráfico 11 Comportamento do nível do lençol freático nos poços 12, 13, 14, 15, 16 e 17 na área de recarga da nascente L1
 Obs.: a precipitação foi acumulada em períodos aproximadamente quinzenal

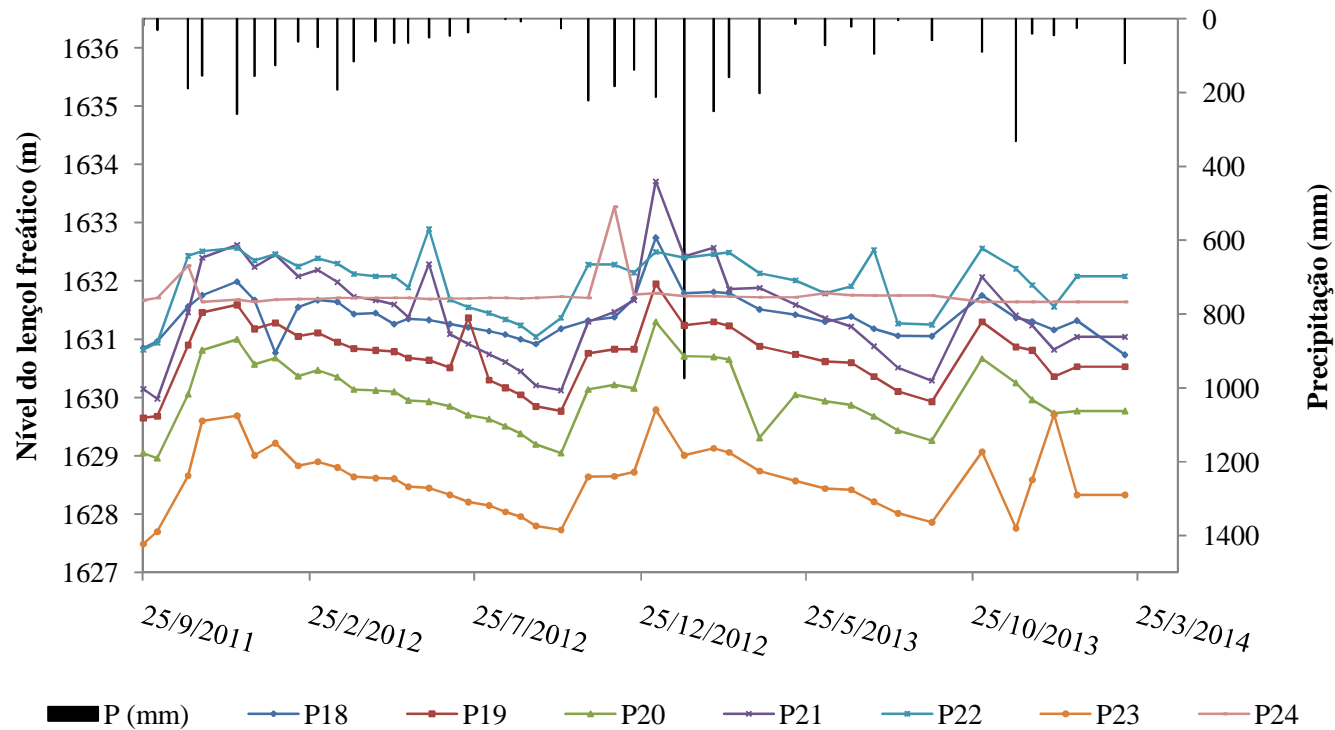


Gráfico 12 Comportamento do nível do lençol freático nos poços 18, 19, 20, 21, 22, 23 e 24 na área de recarga da nascente L1

Obs.: a precipitação foi acumulada em períodos aproximadamente quinzenal

Ao se analisar os Gráficos 9, 10, 11 e 12, percebe-se que os poços P1, P3, P4, P6 (GRÁFICO 9), P7, P8, P9, P10, P11 (GRÁFICO 10), P12, P14, P15, P16, P17 (GRÁFICO 11), P18, P19, P20, P21, P22, P23 (GRÁFICO 12), apresentam comportamentos semelhantes com relação às variações do nível do lençol freático. À medida que se inicia o período chuvoso, os níveis do lençol freático em cada poço começam a se elevar, atingindo um pico entre janeiro e fevereiro, a partir deste tem início o processo de depleção do nível do lençol freático, atingindo valores mínimos entre os meses de setembro e outubro em todos os anos hidrológicos analisados, caracterizando os processos de recarga e depleção.

Os poços P2 (GRÁFICO 9) e P13 (GRÁFICO 11) apresentam comportamento diferente dos demais, onde, no período chuvoso, ocorrem picos de variações do nível do lençol freático, como nos demais, porém, no período seco onde se espera uma depleção natural do nível do lençol freático, nesses poços ele permanece praticamente constante em todo o período de monitoramento, não ficando evidentes os períodos de recarga e depleção.

Já, os poços P5 (GRÁFICO 9) e P24 (GRÁFICO 12) as alterações ocorridas na precipitação não foram correspondidas com as variações de níveis do lençol freático, permanecendo constantes em quase todo o período monitorado.

As variações do nível do lençol freático ocorridos na área de recarga da nascente M1 são apresentados nos Gráficos 13, 14, 15, 16, 17 e 18.

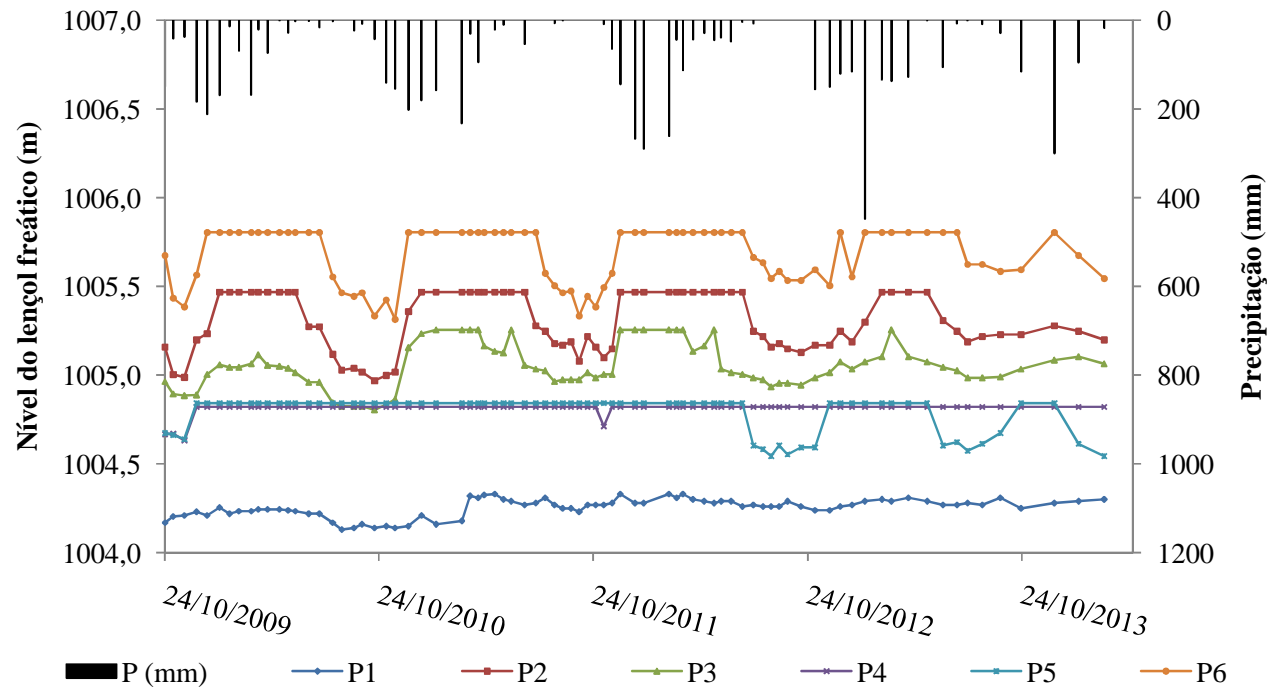


Gráfico 13 Comportamento do lençol freático nos poços P1, P2, P3, P4, P5 e P6 na área de recarga da nascente M1
 Obs.: a precipitação foi acumulada em períodos aproximadamente quinzenal.

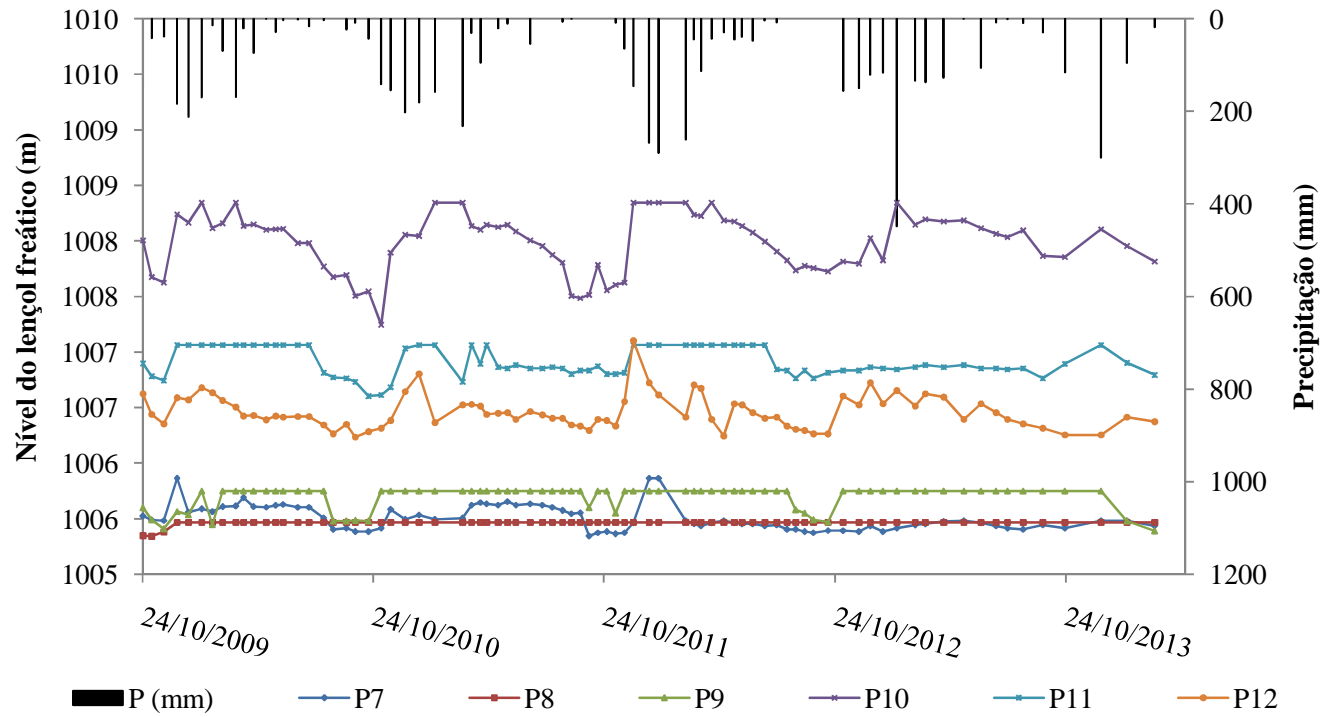


Gráfico 14 Comportamento do lençol freático nos poços P7, P8, P9, P10, P11 e P12 na área de recarga da nascente M1

Obs.: a precipitação foi acumulada em períodos aproximadamente quinzenal.

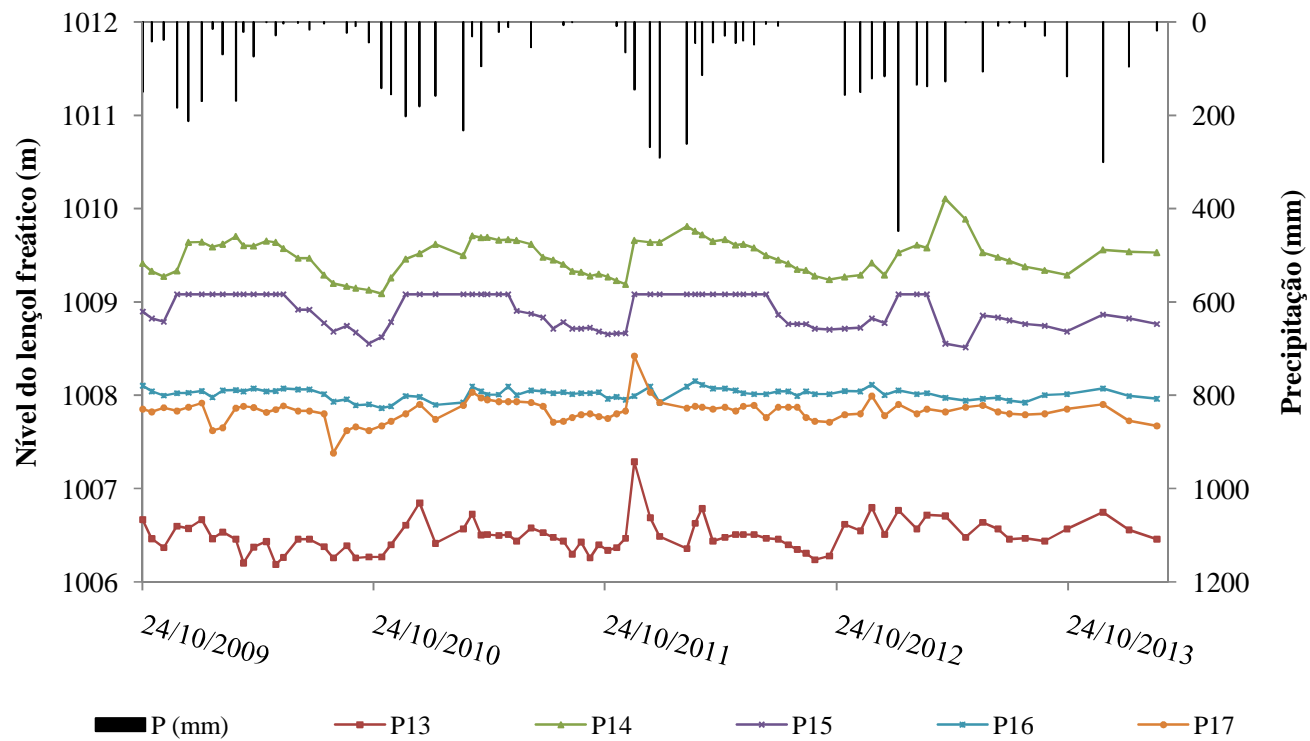


Gráfico 15 Comportamento do lençol freático nos poços P13, P14, P15, P16 e P17 na área de recarga da nascente M1
 Obs.: a precipitação foi acumulada em períodos aproximadamente quinzenal.

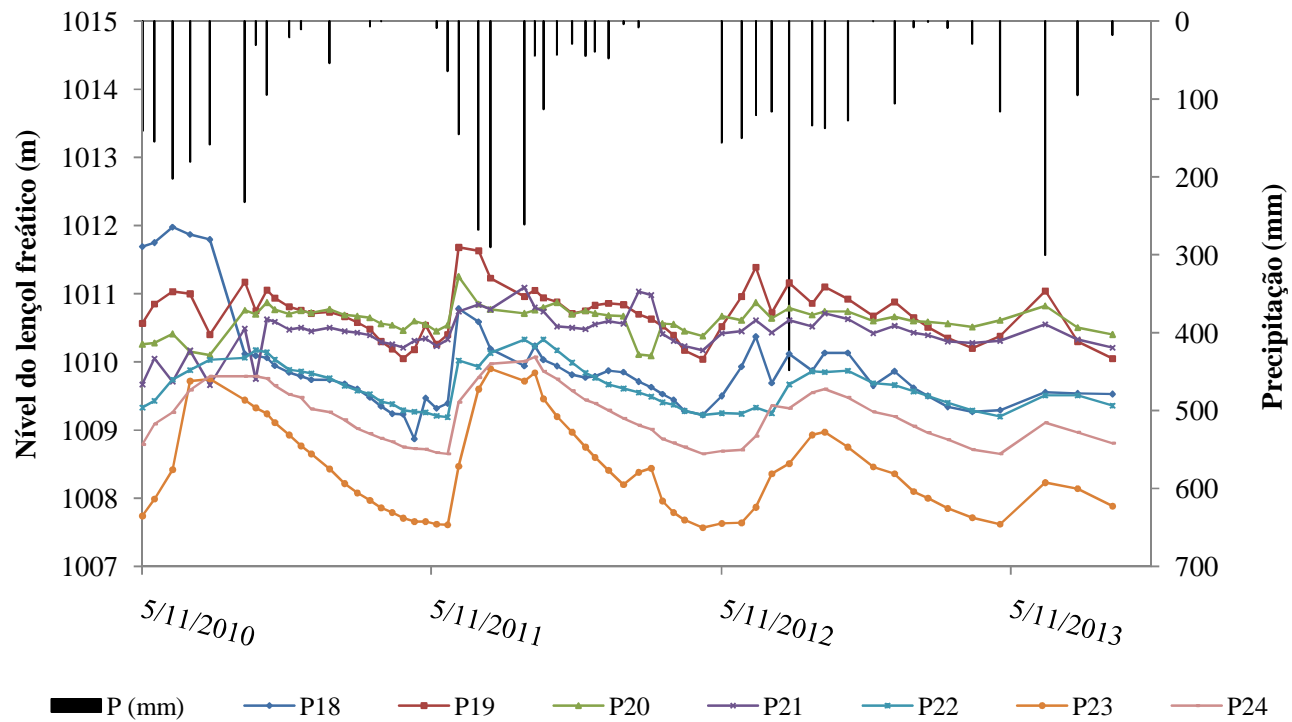


Gráfico 16 Comportamento do lençol freático nos poços P18, P19, P20, P21, P22, P23 e P24 na área de recarga da nascente M1

Obs.: a precipitação foi acumulada em períodos aproximadamente quinzenal.

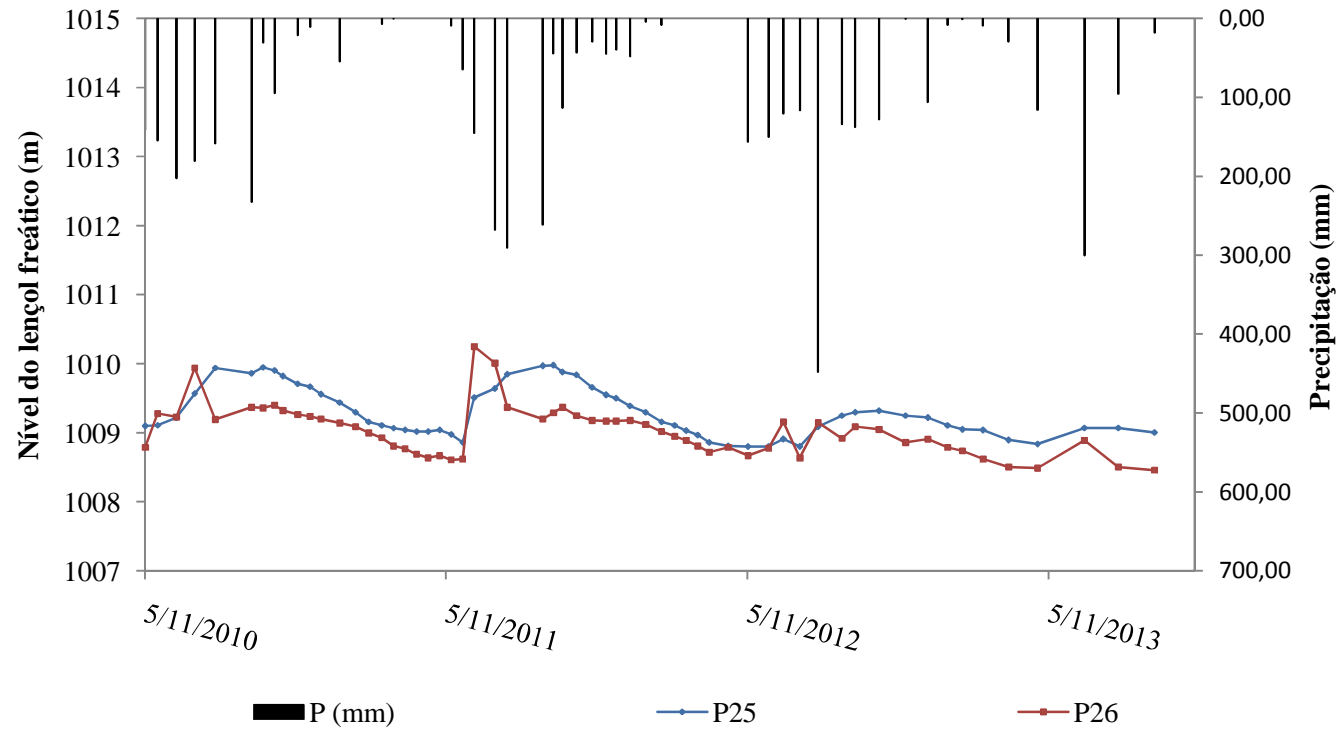


Gráfico 17 Comportamento do lençol freático nos poços P25 e P26 na área de recarga da nascente M1
 Obs.: a precipitação foi acumulada em períodos aproximadamente quinzenal.

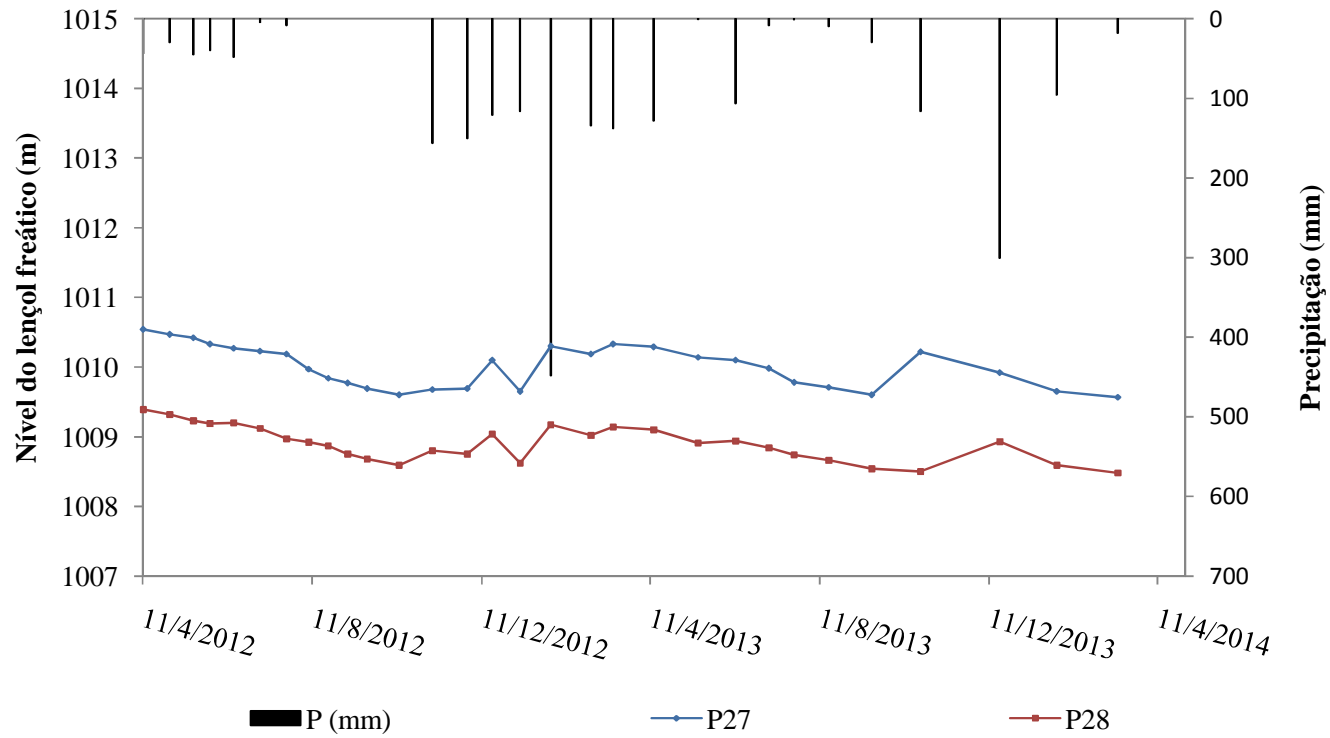


Gráfico 18 Comportamento do lençol freático nos poços P27 e P28 na área de recarga da nascente M1.

Obs.: a precipitação foi acumulada em períodos aproximadamente quinzenal.

Os poços P1 (GRÁFICO 13), P7 (GRÁFICO 14), P13 e P17 (GRÁFICO 15) apresentaram poucas variações do nível do lençol freático durante todo o período de monitoramento, não correspondendo de maneira expressiva às variações ocorridas nas precipitações, mantendo o nível do lençol freático praticamente constante.

Já, os poços P2, P 6 (GRÁFICO 13), P9, P11 (GRÁFICO 14) e P15 (GRÁFICO 15), após atingirem um pico do nível do lençol freático entre os meses de dezembro e janeiro, mantêm-se nesse nível até os meses de maio/junho, atingindo um valor mínimo entre setembro e outubro.

Os poços P4 (GRÁFICO 13), P8 (GRÁFICO 14) e P16 (GRÁFICO 15) não respondem às variações de precipitação, mantendo os níveis do lençol freático, praticamente constante, durante o período monitorado.

Os demais poços semelhantes, à medida que aumenta a precipitação, tem início à elevação do nível do lençol freático, atingindo seu pico máximo entre os meses de dezembro e janeiro (período de recarga). A partir de então, tem início o decaimento do nível do lençol freático, caracterizando o período de depleção.

A pouca profundidade do Cambissolo presente na área de recarga da nascente L1, aliado aos melhores valores dos atributos físico-hídricos em relação à área de recarga da nascente M1 (Latossolo), promoveu as maiores variações dos níveis do lençol freático. Essa maior variação indica maior capacidade de infiltração e recarga, porém, em razão da menor profundidade do solo, a drenagem acontece muito mais rápida do que ocorre na área de recarga da nascente M1, indicando menor capacidade regulatória da área de recarga dessa nascente. Como a área de recarga da nascente M1 apresenta um solo com maior profundidade, o Latossolo, e atributos físico-hídricos menos favoráveis à infiltração e recarga, ocorrem menores oscilações dos níveis do lençol freático e, conseqüentemente, maior capacidade regulatória.

3.1.4 Avaliação da variação do armazenamento subterrâneo

Na Tabela 9, são apresentados os valores das variações de armazenamento ocorridos em cada poço, na área de recarga da nascente L1 para cada ano hidrológico.

A variação do armazenamento subterrâneo de água em um lençol freático é igual à variação de água que ocorre quando seu nível muda de posição em relação ao nível anterior.

Ao se analisar o ano hidrológico 2009/2010, percebe-se que, em todos os poços monitorados, ocorreu uma variação de armazenamento negativa (-89,76 mm), indicando que os níveis do lençol freático não recuperaram de maneira a atingir os níveis no início do monitoramento, significando que o processo de drenagem foi mais eficiente do que o processo de recarga, gerando o menor deflúvio de base.

Tabela 9 Variações do armazenamento subterrâneo para a área de recarga da nascente L1

Poços	Out 2009 - Set 2010		Out 2010 - Set 2011		Out 2011 - Set2012	
	(hf - hi)	ΔS (mm)	(hf - hi)	ΔS (mm)	(hf - hi)	ΔS (mm)
1	-600	-89,13	-30	-4,46	160	23,77
2	-360	-54,48	0	0,00	-220	-33,29
3	-300	-44,75	-40	-5,97	390	58,17
4	-480	-73,57	-20	-3,07	-30	-4,60
5	-200	-30,70	30	4,60	-225	-345,37
6	-310	-46,36	-90	-13,46	0	0,00
7	-590	-90,22	-20	-3,06	0	0,00
8	-460	-70,52	-20	-3,07	0	0,00
9	-420	-64,70	10	1,54	-10	-1,54
10	-920	-142,93	0	0,00	200	31,07
11	-1729	-280,03	970	157,10	570	92,32
12	-	-	-	-	100	15,44
13	-	-	-	-	220	29,86
14	-	-	-	-	350	47,77
15	-	-	-	-	80	11,13
16	-	-	-	-	130	19,72
17	-	-	-	-	130	18,76
18	-	-	-	-	-30	-4,67
19	-	-	-	-	350	63,34
20	-	-	-	-	350	54,77
21	-	-	-	-	260	38,45
22	-	-	-	-	290	35,44
23	-	-	-	-	450	65,75
24	-	-	-	-	60	7,15
ΔS (mm)*		-89,76	-	11,83	-	9,31

“Tabela 9, conclusão”

Poços	Out 2012 - Set 2013		Out 2013 - Março 2014	
	(hf - hi)	ΔS (mm)	(hf - hi)	ΔS (mm)
1	180	26,74	-20	-2,97
2	2760	417,69	-2610	-394,99
3	110	16,41	220	32,81
4	210	32,19	200	30,65
5	170	26,09	-170	-26,09
6	190	28,42	-20	-2,99
7	110	16,82	310	47,41
8	300	45,99	320	49,06
9	300	46,21	216	33,27
10	150	23,30	660	102,54
11	710	114,99	1001	162,12
12	160	24,71	-30	-4,63
13	10	1,36	-390	-52,93
14	850	116,02	1120	152,88
15	430	59,80	-4380	-609,15
16	340	51,59	350	53,11
17	-260	-37,52	1620	233,78
18	-150	-23,36	-300	-46,73
19	260	47,05	380	68,77
20	260	40,69	290	45,38
21	255	37,71	525	77,64
22	220	26,89	810	98,99
23	190	27,76	310	45,29
24	50	5,96	-10	-1,19
ΔS (mm)*	-	48,90	-	3,83

*Média aritmética das variações do armazenamento.

Já, para o ano hidrológico 2010/2011 os valores negativos para a variação de armazenamento ocorreram em 6 dos 11 poços monitorados, gerando um saldo 11,83 mm.

De maneira semelhante, ocorreram para os demais anos hidrológicos, onde todos eles apresentaram um saldo positivo na variação do armazenamento, variando de 3,83 a 48,90 mm.

Os dados referentes à variação de armazenamento para a área de recarga da nascente M1 para cada ano hidrológico são apresentados na Tabela 10. Em todos os anos hidrológicos analisados, a variação do armazenamento foi negativa (-26,96; -1,05 e -21,47mm), com exceção do ano 2012/2013 que apresentou uma variação de armazenamento positivo de 12,78 mm (vale ressaltar que esse valor não corresponde a um ano hidrológico completo, apenas o período de recarga, provavelmente, em decorrência desse fato que o valor foi positivo, visto que nos demais anos monitorados, em todos eles a variação foi negativa). Os valores negativos da variação do armazenamento sinalizam maior eficácia do processo de drenagem em relação ao de recarga. As variações do armazenamento foram de -26,96 a 12,78 mm.

Tabela 10 Variações do armazenamento subterrâneo para a área de recarga da nascente M1

Poços	Out 2009 - Set 2010		Out 2010 - Set 2011		Out 2011 - Set2012	
	(hf - hi)	ΔS (mm)	(hf - hi)	ΔS (mm)	(hf - hi)	ΔS (mm)
1	-30	-4,22	130	18,31	-30	-4,22
2	-190	-27,03	190	27,03	-30	-4,27
3	-160	-24,38	220	33,52	-70	-10,67
4	150	22,85	0	0,00	0	0,00
5	160	24,91	0	0,00	-240	-37,37
6	-330	-50,62	50	7,67	140	21,48
7	-140	-18,71	0	0,00	-20	-2,67
8	120	17,87	0	0,00	0	0,00
9	-120	-17,70	270	39,84	-290	-42,79
10	-460	-77,51	20	3,37	180	30,33
11	-180	-30,18	200	33,54	10	1,68
12	-350	-53,64	110	16,86	-130	-19,92
13	-400	-71,29	70	12,47	-60	-10,69
14	-290	-39,77	130	17,83	-40	-5,49
15	-350	-50,32	90	12,99	60	8,63
16	-130	-23,02	70	12,39	40	7,08
17	-230	-35,60	130	20,12	-40	-6,19
18	-	-	-2230	-363,39	-260	-42,37
19	-	-	-30	-3,90	-520	-67,64
20	-	-	270	48,59	-150	-27,00
21	-	-	670	96,40	-180	-25,90
22	-	-	-110	-14,36	0	0,00
23	-	-	-90	-9,83	-90	-9,83
24	-	-	-70	-10,02	-60	-8,59
25	-	-	-60	-9,03	-230	-34,62
26	-	-	-140	-19,63	140	19,634
27	-	-	0	0	-950	-145,71
28	-	-	0	0	-800	-183,97
ΔS (mm)*	-	-26,96	-	-1,05	-	-21,47

“Tabela 10, conclusão”

Poços	Out 2012 - Set 2013		Out 2013 - Março 2014	
	(hf - hi)	ΔS (mm)	(hf - hi)	ΔS (mm)
1	-70	-9,86	130	18,31
2	100	14,23	-30	-4,27
3	30	4,57	80	12,19
4	0	0,00	0	0,00
5	240	37,37	-300	-46,71
6	60	9,20	-50	-7,67
7	50	6,68	20	2,67
8	0	0,00	0	0,00
9	290	42,79	-360	-53,11
10	80	13,48	0	0,00
11	80	13,41	-100	-16,77
12	20	3,07	90	13,79
13	290	51,68	-110	-19,60
14	70	9,60	240	32,91
15	-10	-1,44	70	10,06
16	0	0,00	-50	-8,85
17	140	21,67	-180	-27,86
18	80	13,04	-1900	-309,62
19	360	46,83	-330	-42,93
20	230	41,40	-210	-37,80
21	130	18,70	-80	-11,51
22	-20	-2,61	160	20,89
23	50	5,46	280	30,60
24	-20	-2,86	170	24,34
25	20	3,01	180	27,09
26	-410	-57,50	80	11,22
27	630	96,63	-650	-99,69
28	-90	-20,70	-20	-4,60
ΔS (mm)*	-	12,78	-	-17,39

*Média aritmética das variações do armazenamento.

Ao analisar conjuntamente as variações do armazenamento ocorridos nas áreas de recarga das nascentes L1 e M1, percebe-se a diferença de comportamento existente entre os tipos pedológicos presentes em cada área de recarga.

As variações do armazenamento ocorridas na área de recarga da nascente L1 apresentaram uma amplitude muito maior, entre -89,76 a 48,90 mm, do que as da nascente M1 entre -26,96 a 12,78 mm. Esse comportamento guarda relação com os atributos físico-hídricos dos solos que ocorrem nas respectivas áreas e o regime pluvial. A menor capacidade de armazenar água no perfil do Cambissolo, que se torna fator de menos inércia, aliada a uma maior condutividade hidráulica, estabelecem uma condição de maior dinâmica no processo de recarga que, ao aliar-se a maiores índices pluviiais, resultam em maiores aportes de água no lençol. Por outro lado, a maior condutividade hidráulica saturada, identificada na área, favorece o processo de drenagem do lençol, o que resulta em elevados valores do deflúvio base, porém com decaimento no tempo muito maior, o que resulta em maiores variações do nível d'água.

Já, na área de recarga da nascente M1, cujo solo predominante é o Latossolo, que apresenta maior capacidade de retenção de água, portanto inércia maior, condutividade hidráulica bem menor em todas as camadas, regime pluvial menos intenso, que no conjunto representam condições bem distintas e menos favoráveis à dinâmica da recarga, as variações do armazenamento apresentaram menor amplitude de variação, o que resulta em menor deflúvio base.

3.1.5 Estimativa da recarga direta

Para a estimativa da recarga direta, foram calculadas as variações do nível do lençol freático para cada poço em cada área de recarga das nascentes L1

e M1 extrapolando-se as curvas de recessão (curvas tracejadas), que são os traçados que o nível do lençol freático teria seguido na ausência de recarga.

A seguir, são apresentados os Gráficos 19 e 20 com as variações do nível do lençol freático ocorridas no poço P1, respectivamente nas áreas de recarga das nascentes L1 e M1, os demais gráficos não serão apresentados.

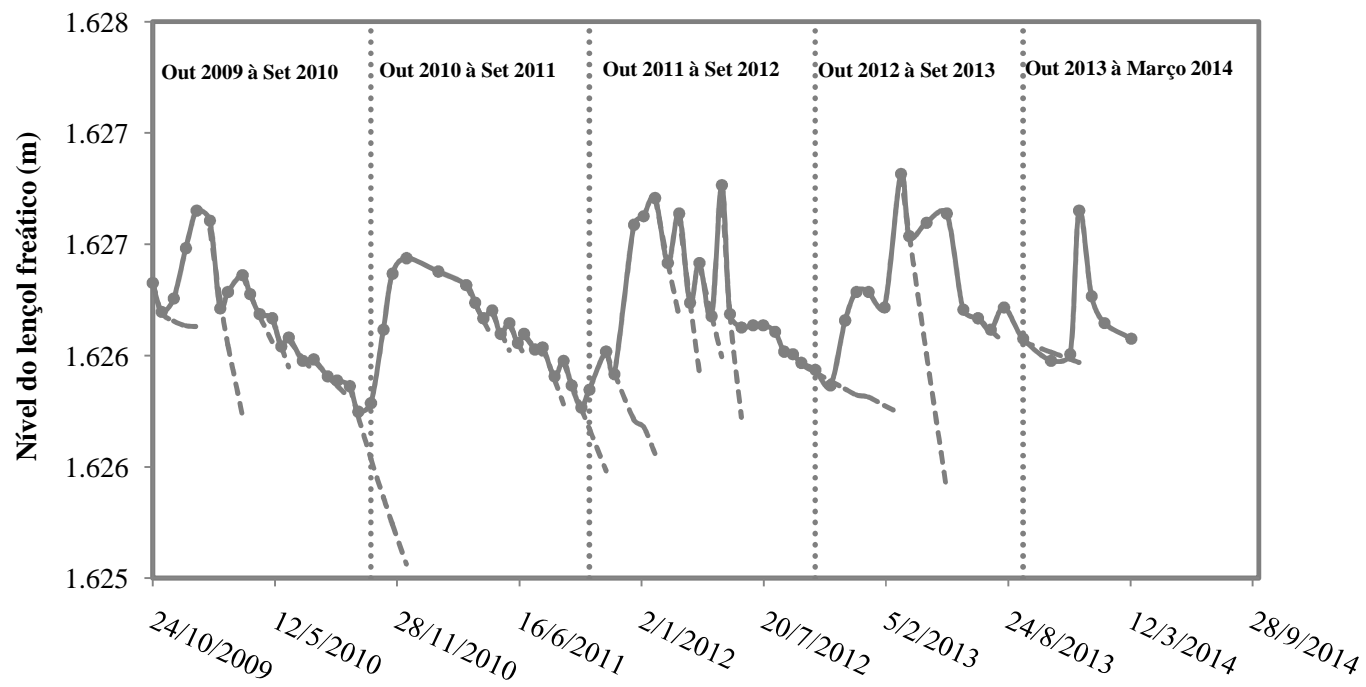


Gráfico 19 Variações do nível do lençol freático e estimativa das variações dos níveis d'água (Δh) em relação às curvas de recessão para o Poço 1 na área de recarga da nascente L1

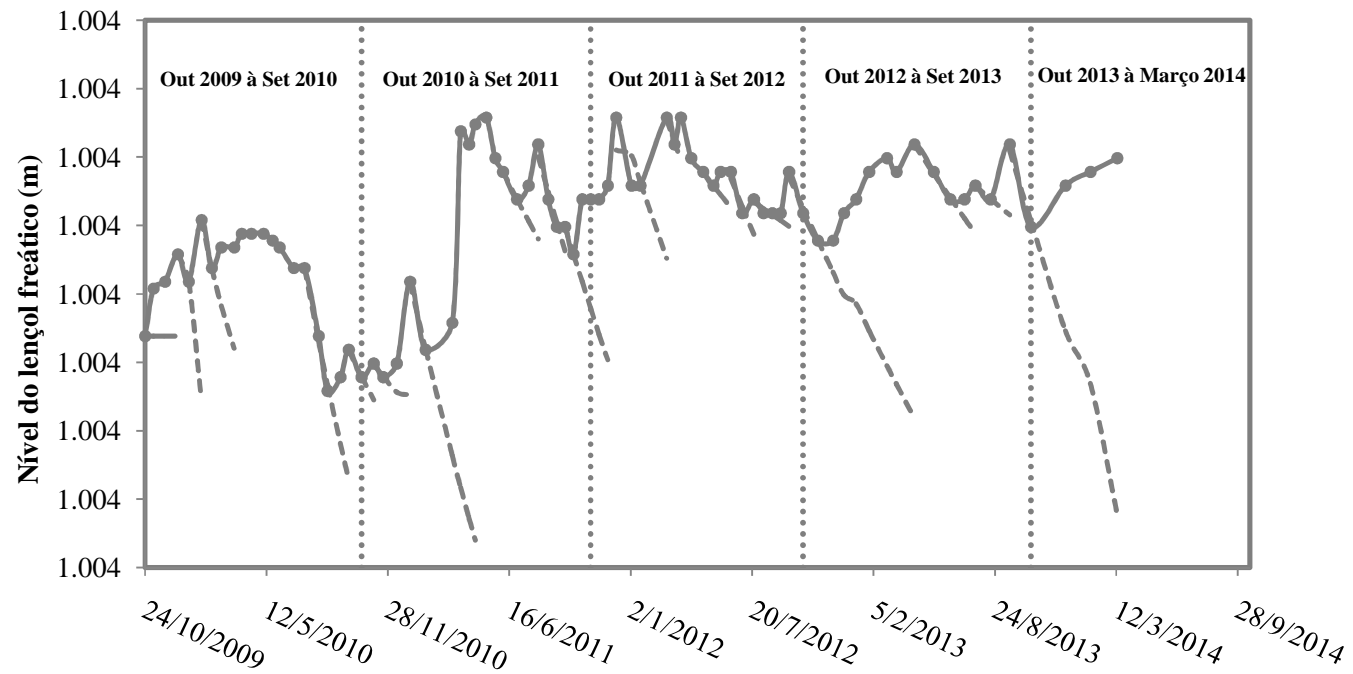


Gráfico 20 Variações do nível do lençol freático e estimativa das variações dos níveis d'água (Δh) em relação às curvas de recessão para o Poço 1 na área de recarga da nascente M1

Os valores das variações de nível do lençol freático (Δh) e da recarga direta (Rd) obtidos a partir das curvas de recessões para todos os poços nas áreas de recargas das nascentes L1 e M1 são apresentados nas Tabelas 11 e 12, juntamente com os valores médios e suas participações da recarga direta no total precipitado (Rd/P).

Tabela 11 Variações do nível do lençol freático (Δh) e recarga direta (Rd) para a área de recarga da nascente L1

Poços	Out 2009/ Set 2010		Out 2010/ Set 2011		Out 2011/ Set 2012	
	Δh (mm)	Rd (mm)	Δh (mm)	Rd (mm)	Δh (mm)	Rd (mm)
1	1232,82	183,14	1865,79	277,17	2866,07	425,76
2	1576,02	238,51	2292,65	346,96	5079,19	768,67
3	2308,07	344,25	3707,12	552,92	5771,75	860,87
4	899,12	137,81	1489,68	228,33	1761,47	269,99
5	331,23	50,84	495,85	76,11	539,04	82,74
6	811,38	121,35	1721,47	257,46	2202,27	329,37
7	634,50	97,03	1930,55	295,22	2530,49	386,96
8	2796,30	428,71	3138,00	481,10	8634,59	1323,80
9	1382,53	212,97	2389,61	368,10	6376,66	982,27
10	1290,63	200,51	3988,17	619,60	6063,84	942,08
11	538,56	87,23	2855,06	462,40	7611,50	1232,76
12	-	-	-	-	4563,52	704,66
13	-	-	-	-	10348,21	1404,31
14	-	-	-	-	5798,17	791,44
15	-	-	-	-	5591,63	777,66
16	-	-	-	-	2713,15	411,67
17	-	-	-	-	3121,43	450,45
18	-	-	-	-	4079,74	635,47
19	-	-	-	-	3736,75	676,26
20	-	-	-	-	3333,78	521,73
21	-	-	-	-	5394,54	797,77
22	-	-	-	-	3970,59	485,24
23	-	-	-	-	3778,96	552,11
24	-	-	-	-	1254,86	149,46
Valores médios	1254,65	191,12	2352,18	360,49	4463,42	665,15
P (mm)	1879		1361		1704	
Rd/P (%)	10,17		26,49		39,03	

“Tabela 11, conclusão”

Poços	Out 2012/ Set 2013		Out 2013/Março 2014	
	Δh (mm)	Rd (mm)	Δh (mm)	Rd (mm)
1	2480,69	368,51	682,68	202,83
2	2942,59	445,33	920,89	278,73
3	2381,54	355,21	1204,57	359,33
4	2129,85	326,45	908,17	278,40
5	404,80	62,14	203,32	62,42
6	2615,70	391,20	1459,80	436,65
7	2450,27	374,69	1851,84	566,37
8	6176,87	947,00	3695,54	1133,16
9	7079,07	1090,47	2069,22	637,49
10	4664,80	724,72	3214,31	998,75
11	5540,71	897,37	4168,82	1350,36
12	4421,89	682,79	1763,69	544,67
13	7394,73	1003,51	1326,58	360,05
14	6147,92	839,18	4018,58	1097,06
15	4604,80	640,41	2839,01	789,67
16	5027,46	762,82	3147,99	955,29
17	2212,51	319,29	5216,31	1505,53
18	3404,35	530,27	1127,37	351,20
19	3117,86	564,25	2775,43	1004,56
20	4856,94	760,10	2379,84	744,88
21	5672,78	838,92	3217,91	951,76
22	2965,07	362,36	3243,71	792,82
23	3038,59	443,94	5850,71	1709,60
24	1711,19	203,81	0,00	0,00
Valores médios	3893,46	580,61	2386,93	712,98
P (mm)	2636		700	
Rd/P (%)	22,03		101,85	

Em todos os anos hidrológicos, a menor variação do nível do lençol freático (Δh) e, conseqüentemente, recarga direta (Rd) ocorreu no poço P5. No ano hidrológico 2009/2010, a maior variação do Δh ocorreu no poço P8, cujo valor da Rd foi de 428,71 mm correspondendo a 22,81% do total precipitado. O valor médio da Rd para esse período foi de 191,12 mm correspondendo a 10,17% do total precipitado.

Para o ano hidrológico 2010/2011 os valores de Rd variaram entre 76,11 a 619,60 mm, respectivamente para os poços P5 e P10, cujas participações Rd/P variaram entre 5,58 a 45,53 %. A Rd média foi de 360,49 mm, sendo o valor da relação Rd/P de 26,49%.

O ano hidrológico 2011/2012 foi o que apresentou o segundo maior valor da Rd 665,15 mm, sendo a relação Rd/P igual a 39,03%. Os valores de Rd correspondem a 425,76 e 1404,31 mm.

Os valores de Rd para o ano hidrológico 2012/2013 variaram entre 61,14 mm poço P5 e 1003,51 mm poço P13, cujas participações Rd/P foram de 2,32 a 38,07%. Os valores de Rd e a sua participação na precipitação (Rd/P) foram respectivamente, 580,61 mm e 22,03 %.

Por fim, os valores de Rd para parte do ano hidrológico 2013/2014 variaram entre 64,42 e 1709,60 mm, cujas participações Rd/P variaram de 9,20 e 244,23%.

Tabela 12 Variações do nível do lençol freático (Δh) e recarga direta (Rd) para a área de recarga da nascente M1

Poços	Out 2009/ Set 2010		Out 2010/ Set 2011		Out 2011/ Set2012	
	Δh (mm)	Rd (mm)	Δh (mm)	Rd (mm)	Δh (mm)	Rd (mm)
1	386,06	54,36	612,50	86,25	353,05	49,72
2	674,21	95,92	979,53	139,35	672,96	95,74
3	366,54	55,85	1097,93	167,30	843,10	128,47
4	213,51	32,52	0,00	0,00	217,54	33,13
5	201,02	31,30	0,00	0,00	326,24	50,80
6	709,42	108,82	1348,68	206,88	509,09	78,09
7	1706,77	228,07	1419,91	189,74	756,42	101,08
8	124,95	18,61	0,00	0,00	0,00	0,00
9	914,94	134,99	567,83	83,78	393,60	58,07
10	2129,83	358,86	3129,82	527,35	2729,12	459,83
11	339,09	56,86	2111,97	354,13	561,82	94,21
12	959,76	147,10	2844,05	435,89	1822,58	279,33
13	2908,40	518,34	3631,67	647,24	4210,57	750,42
14	731,25	100,29	937,95	128,63	375,11	51,44
15	493,27	70,92	1146,21	164,79	552,35	79,41
16	526,92	93,30	981,45	173,78	1640,11	290,41
17	2482,17	384,19	1648,47	255,15	1208,54	187,06
18	-	-	2316,28	377,45	2154,96	351,16
19	-	-	3731,31	485,37	2813,02	365,92
20	-	-	1579,54	284,28	3324,64	598,36
21	-	-	4192,36	603,17	1984,00	285,45
22	-	-	8450,00	1103,25	3107,05	405,66
23	-	-	2010,00	219,63	2494,30	272,55
24	-	-	1000,00	143,20	1630,78	233,52
25	-	-	989,59	148,96	1557,23	234,40
26	-	-	3213,97	450,75	2325,75	326,18
27	-	-	-	-	150,31	23,05
28	-	-	-	-	94,68	21,77
Média	933,42	146,49	1920,81	283,71	1386,03	210,90
P (mm)	1228		1332		1413	
Rd/P (%)	11,93		21,30		14,92	

“Tabela 12, conclusão”

Poços	Out 2012 - Set 2013		Out 2013 - Março 2014	
	Δh (mm)	Rd (mm)	Δh (mm)	Rd (mm)
1	286,14	40,29	260,04	73,24
2	1161,36	165,22	50,71	14,43
3	486,15	74,08	122,74	37,41
4	0,00	0,00	0,00	0,00
5	909,64	141,64	0,00	0,00
6	1340,20	205,58	222,32	68,21
7	470,84	62,92	125,71	33,60
8	0,00	0,00	0,00	0,00
9	332,56	49,07	0,00	0,00
10	1757,82	296,18	481,77	162,35
11	888,63	149,00	555,31	186,23
12	1795,23	275,14	183,75	56,32
13	2362,61	421,07	372,59	132,81
14	2185,42	299,72	343,26	94,15
15	975,38	140,23	256,58	73,77
16	805,72	142,66	227,87	80,70
17	1541,96	238,67	406,87	125,95
18	5302,52	864,08	784,73	255,75
19	5578,14	725,61	1303,89	339,22
20	1964,68	353,60	442,51	159,28
21	1886,45	271,41	266,43	76,67
22	1822,27	237,92	553,64	144,57
23	2652,72	289,86	109,66	23,96
24	1341,42	192,09	629,65	180,33
25	125,76	18,93	406,35	122,33
26	3305,10	463,53	711,29	199,51
27	4068,95	624,07	0,00	0,00
28	2857,25	657,07	718,75	330,58
Valores médios	1721,60	264,27	340,59	106,12
P (mm)	1546		534	
Rd/P (%)	17,10		19,86	

No ano hidrológico 2009/2010, as variações máximas e mínimas do Δh ocorreram nos poços P 13 (2908,40 mm) e P8 (124,95 mm), alcançando valores de Rd que variaram entre 518,34 e 18,61 mm. A Rd média para esse período foi de 146,49 mm com uma participação no volume precipitado (Rd/P) de 11,93%.

O maior valor de Rd média ocorreu no ano hidrológico 2010/2011, atingindo o valor de 283,71 mm e uma participação Rd/P igual a 21,30%. Os poços P4, P5 e P8 não apresentaram variação do Δh , já, o poço P22 foi o que apresentou a maior variação do Δh (8450 mm), consequentemente o maior valor de Rd (1103,25 mm) com a relação Rd/P igual a 82,83%.

Para o ano hidrológico 2011/2012 os valores de Rd variaram entre 0 mm a 750,42 mm, respectivamente para os poços P8 e P13, cujas participações Rd/P variaram entre 0 a 53,11%. A Rd média foi de 210,90 mm, sendo o valor da relação Rd/P de 14,92%.

O ano hidrológico 2012/2013 foi o que apresentou o segundo maior valor da Rd 264,27 mm sendo a relação Rd/P igual a 17,10%. Os valores máximos e mínimos corresponderam a 5578,14 (P19) e 0 mm (P4) e (P8).

Por fim, os valores de Rd para parte do ano hidrológico 2013/2014 variaram entre 0 (P4, P5, P8, P9 e P27) e 1303,89 mm (P19). A Rd média foi de 106,12 mm com a relação Rd/P igual a 19,86%.

Ao se analisar conjuntamente as áreas de recargas das nascentes L1 e M1 percebe-se grande diferença entre os valores médios de variação do Δh e, consequentemente, Rd. Em média, o valor da Rd na área de recarga da nascente L1 é 2,50 vezes maior do valor de Rd encontrado para a área de recarga da nascente M1. Novamente, cabe salientar o já destacado anteriormente, sobre o papel desempenhado nesse processo, pelos atributos dos solos e o regime pluvial presentes nas duas áreas, conforme se constata nas flutuações da Rd em todos os anos hidrológicos (GRÁFICO 21).

Conforme já discutido anteriormente, a maior profundidade do Cambissolo presente na área de recarga da nascente L1 proporciona maior potencial para recarga subterrânea. O fato de ser mais profundo associado aos elevados índices pluviométricos proporciona maiores condições para a infiltração da água no solo, conseqüentemente maiores valores do Δh e R_d . Fato comprovado por apresentar os maiores valores dos atributos físico-hídricos favoráveis ao processo de infiltração da água em todas as camadas do perfil do solo, com destaque para a condutividade hidráulica saturada (k_0), atributo intimamente ligado ao processo de infiltração, apresentando um valor médio 4,1 vezes maior do que o valor de k_0 da área de recarga da nascente M1 (TABELA 11).

Em todos os anos hidrológicos o volume precipitado na área de recarga da nascente L1 foi superior ao da área de recarga da nascente M1. Esse fator, aliado aos elevados valores dos atributos físico-hídricos do solo, proporcionaram valores de R_d superiores aos da área de recarga da nascente M1 em todos os anos hidrológicos monitorados (GRÁFICO 20).

O Latossolo presente na área de recarga da nascente M1 apresenta maior capacidade para a retenção de água na matriz do solo, visto que apresenta maiores valores de microporosidade (M) em todas as camadas do perfil do solo, exceto na camada 0 – 20 cm. Outra constatação dessa maior capacidade de retenção de água no solo está contemplada nas flutuações da R_d em todos os anos hidrológicos (GRÁFICO 21).

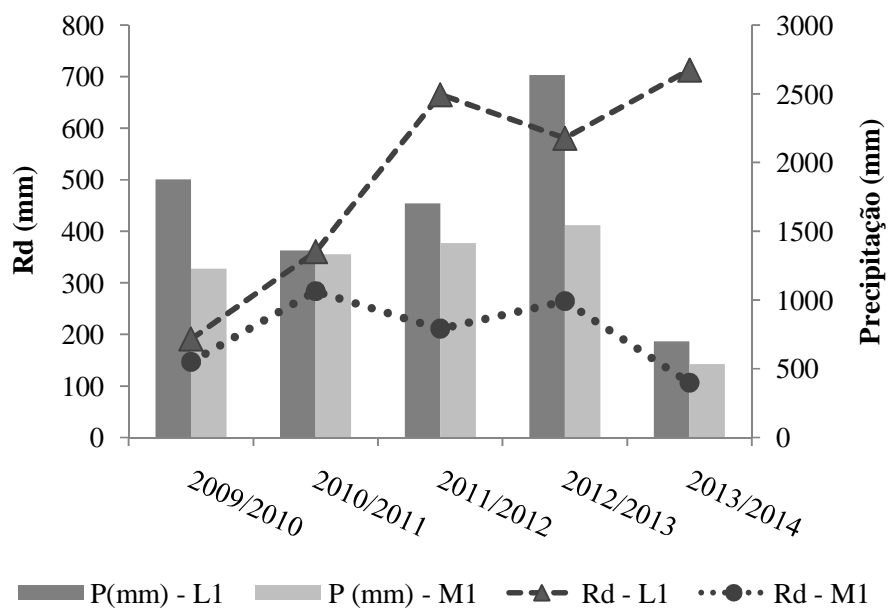


Gráfico 21 Recarga direta (Rd) e precipitação (P) nas áreas de recargas das nascentes L1 e M1

3.1.6 Balanço hídrico na zona saturada do solo

Na Tabela 13, são apresentados os componentes do balanço hídrico subterrâneo para as áreas de recargas das nascentes L1 e M1.

Tabela 13 Componentes do balanço hídrico subterrâneo nas áreas de recargas das nascentes L1 e M1

Componentes do balanço hídrico	Nascente L1			
	Out 2009 - Set 2010	Out 2010 - Set 2011	Out 2011 - Set 2012	Out 2012 - Set 2013
Rd (mm/ano)	191,12	360,49	665,15	580,61
ΔS (mm/ano)	-89,76	11,83	9,31	48,9
Db (mm/ano)	506,51	649,34	594,83	747,61
Rp (mm/ano)	-405,15	-277,02	79,63	-118,1
	Nascente M1			
Rd (mm/ano)	146,49	283,71	210,9	264,27
ΔS (mm/ano)	-16,37	-1,05	-21,47	12,78
Db (mm/ano)	245,39	207,57	274,26	150,24*
Rp (mm/ano)	-115,27	75,09	-84,83	126,81

Rd – Recarga Direta; ΔS – Variação do Armazenamento; Db – Deflúvio de Base; Rp – Recarga Profunda. * Deflúvio de base compreendido entre Out 2012 à Jan 2013

A recarga profunda (Rp) foi estimada pelo balanço hídrico subterrâneo, considerando como entrada de água no sistema a recarga direta estimada pelo método WTF como saída o deflúvio de base.

Ao se analisar os dados da Tabela 13, referentes à área de recarga da nascente L1 se verificam que nos anos hidrológicos 2009/2010, 2010/2011 e 2012/2013 os valores da Rp foram negativos, sendo seus valores respectivamente, -405,15 mm, -277,02 mm e -118,10 mm. Ao se analisar as incertezas envolvidas no balanço hídrico, o valor negativo na Rp pode ser explicado por alguns fatores. Primeiramente, como alguns poços monitorados chegaram a secar, não foi possível quantificar as recargas totais ocorridas nos mesmos, contribuindo para reduzir os valores da Rd e, conseqüentemente, aumentarem o déficit na Rp. Outro fator refere-se a possibilidade de uma superestimação do deflúvio de base, visto que em ambas as áreas de recarga o

nível do lençol freático encontra-se próximo à superfície, logo, pode estar ocorrendo uma contribuição do escoamento sub-superficial no deflúvio de base.

Já, o ano hidrológico 2011/2012 apresentou um saldo positivo para a Rp, alcançando valor de 79,63 mm.

Na área de recarga da nascente M1, apenas nos anos hidrológicos 2009/2010 ($R_p = -115,27$ mm) e 2011/2012 ($R_p = -62,25$ mm) apresentaram valores negativos para a Rp. Os demais anos todos apresentaram um saldo positivo, sendo a Rd igual a 75,09 mm, no ano 2010/2011 e 147,14 mm no ano 2012/2013, porém, neste último ano hidrológico o Db foi quantificado apenas até o mês de janeiro de 2013, portanto, o valor da Rp está superestimado.

4 CONCLUSÕES

- a) Não foram identificadas influências do relevo e do uso do solo na dinâmica da água nas áreas de recarga das nascentes;
- b) O deflúvio base gerado pelas nascentes nos dois ambientes, guardou relação direta com os atributos físico-hídricos dos solos e o regime pluvial;
- c) Solos com menor capacidade de retenção de água no seu perfil são mais eficazes no processo de recarga direta do lençol superficial;
- d) Solos com atributos físico-hídricos favoráveis ao processo de infiltração e redistribuição de água em seu perfil têm maior potencialidade para a recarga do lençol superficial;
- e) O balanço hídrico na zona saturada contém incertezas associadas à rede de poços de monitoramento do nível do lençol superficial, sobretudo em termos da abrangência espacial e da profundidade monitorada.

REFERENCIAS

ALMEIDA, J. R.; RESENDE, M. Considerações sobre o manejo de solos rasos desenvolvidos de rochas políticas no Estado de Minas Gerais. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 11, n. 128, p. 19-26, nov. 1985.

ANA, C. L. S. A.; CHAVES, H. M. L. Estimativa de recarga da Bacia do Rio das Fêmeas através de métodos manuais e automáticos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 11, p. 1123-1129, 2011.

ARAÚJO, A. R. de. **Solos da bacia do Alto Rio Grande, MG: base para estudos hidrológicos e aptidão agrícola**. 2006. 345 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2006.

CARNIER NETO, D.; KIANG, C. H. Aplicação do método de flutuação de nível da água para a estimativa de recarga: exemplo do Aquífero Rio Claro. **Águas Subterrâneas**, São Paulo, v. 22, n. 2, p. 39-48, 2008.

COELHO, V. H. R.; ALMEIDA, C. N.; SILANS, A. M. B. P. Análise da flutuação do nível d'água para estimativa da recarga subterrânea da bacia representativa do Rio Gramame no Nordeste Brasileiro. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 17, n. 2, p. 241-252, abr./jun. 2012.

CURI, N.; CHAGAS, C. S.; GIAROLA, N. F. B. Distinção de ambientes agrícolas e relações solo-pastagens nos Campos da Mantiqueira (MG). In: EVANGELISTA, A. R.; CARVALHO, M. M.; CURI, N. (Ed.). **Desenvolvimento de pastagens na zona fiiográfica Campos das Vertentes MG: reunião de trabalho sobre pastagens nativas e desenvolvimento de pastagens para o gado de leite das zonas dos Campos Vertentes**. Lavras: ESAL, 1994. p. 21-43.

GOMES, L. H. **Determinação da recarga profunda na Bacia-Piloto do Ribeirão da Onça em zona de afloramento do sistema Aquífero Guaraní a partir de balanço hídrico em zona saturada**. 2008. 167 p. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

GOMES, N. M. et al. Ajuste de variogramas no estudo da continuidade espacial de atributos físicos do solo. **Irriga**, Botucatu, v. 12, n. 1, p. 92-107, jan./mar. 2007.

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

MAZIERO, T. A.; WENDLAND, E. Variabilidade espacial da recarga em área urbana. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 13, n. 3, p. 35-46, 2008.

MENEZES, M. D. et al. Dinâmica hidrológica de duas nascentes, associada ao uso do solo, características pedológicas e atributos físico-hídricos na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha – Serra da Mantiqueira (MG). **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 37, n. 82, p. 175-184, jun. 2009.

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.

MENEZES, M. D. et al. Solum depth spatial prediction comparing conventional with knowledge-based digital soil mapping approaches. **Scientia Agricola**, São Paulo, v. 71, n. 4, p. 316-323, jul./ago. 2014.

MESTRINHO, S. S. P. Monitoramento em água subterrânea. In: FEITOSA, F. A. C. (Org.). **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. Rio de Janeiro: CPRM, 2008. p. 673-685.

OLIVEIRA, A. S. et al. Stream flow regime of springs in the Mantiqueira Mountain Range region, Minas Gerais State. **Cerne**, Lavras, v. 20, n. 3, p. 343-349, jul./set. 2014.

OLIVEIRA, A. S. **Dinâmica do escoamento em nascentes na região do Alto Rio Grande, MG**. 2011. 130 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.

SANTOS, D. et al. Perdas de solo e produtividade de pastagens nativas melhoradas sob diferentes práticas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 33, n. 2, p. 183-189, fev. 1998.

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

SILVA, A. L. **Deflúvio superficial em Minas Gerias, caracterização e associação com os fatores físicos e ambientais**. 2014. 134 p. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2014.

SILVA, L. A. et al. Groundwater recharge estimate at Alto Rio Grande-MG watershed. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 32, n. 6, p. 1097-1108, nov./dez. 2012.

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.

SOUZA, S. M. T. **Deflúvios superficiais no Estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: Hidrossistemas, 1993.

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, abr./jun. 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, n. 3-4, p. 261-269, Sept. 2007.

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.

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

CAPÍTULO 3 Aperfeiçoamento de um índice de qualidade do solo associado à recarga de água subterrânea para dois ambientes da região do Alto Rio Grande, MG

RESUMO

O manejo inadequado de bacias hidrográficas tem causado a deterioração da qualidade e a redução da quantidade da água, provocando, no Brasil e no mundo, uma eminente escassez desse recurso. Esses fatores têm mobilizado os governos, empresas públicas e privadas, além da comunidade científica, para a proposição de metodologias e ações visando a alterar de forma positiva esse cenário. Nesse sentido, estudos hidrológicos são ferramentas importantes para o entendimento da dinâmica da água em bacias hidrográficas e as consequências ambientais decorrentes da atividade antrópica, uma vez que fornecem elementos e dados que proporcionam uma visão holística do ambiente solo, água e vegetação, e dos efeitos do uso e manejo do solo na capacidade de infiltração de água e, conseqüentemente, na recarga de água no solo. Na falta de dados hidrológicos que forneçam informações para se conhecer o potencial de produção de água de uma bacia, principalmente de pequeno porte, uma alternativa rápida e viável para suprir essa deficiência, é a utilização de indicadores de qualidade do solo. Neste trabalho, objetivou-se o aprimoramento de um Índice de Qualidade do Solo proposto por Alvarenga et al. (2012), sob o contexto da recarga do lençol superficial, com a inclusão de informações do perfil, matéria orgânica e do relevo. Para tanto, foram coletadas amostras de solo deformadas e indeformadas em 34 pontos na área de recarga da nascente L1 e 40 pontos na área de recarga da nascente M1 a cada 20 cm até a profundidade de 1 metro, seguindo um grid regular de 60 x 60 m com refinamento da escala em grid's de 20 x 20 m, próximo à surgência da nascente. As amostras foram coletadas utilizando-se de um amostrador tipo Uhland, com cilindros de PVC com dimensões de 75 x 83 mm. Aplicou-se o IQS nas áreas de recarga das nascentes L1 e M1 situadas, respectivamente, nas BHRL e BHRM, localizadas na região do Alto Rio Grande, MG. Os resultados permitem constatar que o índice de qualidade do solo para recarga (IQS_{RA}) mostrou-se eficiente como indicador ambiental de geração de deflúvio de base pelas áreas de recargas das nascentes e o processo de validação comprovou sua eficácia. A área de recarga que apresentou os maiores valores de deflúvio de base e sua participação na precipitação (área de recarga da nascente L1), apresentou os maiores valores do IQR_{SA} .

Palavras-chave: Áreas de recarga de nascentes. Recarga subterrânea. Indicador de Qualidade do Solo.

ABSTRACT

Improper management of hydrographic basins has caused quality deterioration and the reduction of the amount of water causing, in Brazil and in the world, an imminent shortage of this resource. These factors have mobilized governments, public and private companies, in addition to the scientific community, to propose methodologies and actions aiming at positively changing this scenario. In this sense, hydrological studies are important tools for understanding water dynamics in hydrographic basins and the environmental consequences of anthropologic activity, given that these supply elements and data that provide an holistic view of the soil, water and vegetation environment, as well as the effects of soil use and management over water infiltration capacity and, consequently, water recharge in the soil. In the absence of hydrological data to provide information regarding the water production potential of a basin, especially small sized, a quick and viable alternative to address this gap is the use of soil quality indicators. This work aimed at improving the Soil Quality Index proposed by Alvarenga (2012), in the context of recharging surface water table, including profile, organic matter and relief information. Thus, we collected disturbed and undisturbed soil samples in 34 points in the L1 spring recharge area and 40 points in the M1 spring recharge area, every 20 cm up to the depth of 1 meter, following a regular grid of 60 x 60 m with 20 x 20 m scale grid refinement, near the spring's upwelling. The samples were collected using an Uhland sampler, with PVC cylinders in the dimensions of 75 x 83 mm. We applied the SQI in the recharge areas of springs L1 and M1 located, respectively, in BHRL and BHRM, in the Upper Rio Grande region, in MG, Brazil. The results allow us to determine that the soil quality index to recharge (SQI_{AR}) was efficient as environmental indicator for base runoff generation in the spring recharge areas, with the validation process proving its effectiveness. The recharge area presenting the highest base runoff values and precipitation (L1 spring recharge area), showed the highest SQI_{AR} values.

Keywords: Springs recharge areas. Groundwater recharge. Soil Quality Indicator.

1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso inestimável à vida, é mais que um insumo, é indispensável à produção agrícola, industrial, ao abastecimento, é um recurso estratégico para o desenvolvimento econômico de um país ou uma região. É imprescindível para a manutenção dos ciclos geológicos, biológicos e químicos mantendo em equilíbrio os ecossistemas. Embora indiscutivelmente seja um dos recursos mais importantes para a vida na Terra, não se tem dado a devida importância a esse recurso. O manejo inadequado de bacias hidrográficas tem causado a deterioração da qualidade e a redução da quantidade da água, provocando, no Brasil e no mundo, uma eminente escassez desse recurso.

Esses fatores têm provocado a mobilização dos governos, empresas públicas e privadas, além da comunidade acadêmica, na tentativa de propor ações e metodologias para minimizar esse problema.

Nesse sentido, estudos hidrológicos são ferramentas importantes para o entendimento da dinâmica da água em bacias hidrográficas e as consequências ambientais decorrentes da atividade antrópica, uma vez que fornecem elementos e dados que proporcionam uma visão holística do ambiente solo, água e vegetação, e dos efeitos do uso e manejo do solo na capacidade de infiltração de água e, conseqüentemente, na recarga de água no solo (LIMA et al., 2013).

Entretanto, conforme Melo Neto (2013), o monitoramento de dados hidrológicos demanda grandes investimentos para que se tenha uma infraestrutura capaz de cobrir todas as regiões de interesse, em razão disso, há uma escassez de dados observados em diversas áreas, sobretudo em bacias de pequeno porte.

Na falta de dados hidrológicos que forneçam informações para se conhecer o potencial de produção de água de uma bacia, principalmente de

pequeno porte, uma alternativa rápida e viável para suprir essa deficiência, é a utilização de indicadores de qualidade do solo.

Indicadores de qualidade do solo são propriedades mensuráveis (quantitativas ou qualitativas) do solo acerca de um processo ou atividade e que permitem caracterizar, avaliar e acompanhar as alterações ocorridas num dado ecossistema (KARLEN et al., 1997).

O uso de indicadores de qualidade do solo, com relação à sua funcionalidade, é uma forma indireta de mensurar a qualidade dos solos, sendo úteis para o monitoramento de mudanças no ambiente (ARAÚJO, 2012).

Segundo Doran e Parkin (1996), a escolha de indicadores de qualidade/degradação do solo, deve seguir alguns critérios, quais sejam: a) estar relacionado com os processos naturais do ecossistema (funcionalidade); b) fácil empregabilidade em campo, facilitando sua utilização por especialistas ou por pessoas comuns (facilidade na difusão da tecnologia e extensão rural); c) ser suscetível às variações climáticas e de manejo (caráter dinâmico); d) ser componente, quando possível, de uma base de dados.

Obviamente, a escolha de quais indicadores empregarem, depende da finalidade a que se propõe a utilização de determinado solo. Além disso, a seleção de uma propriedade específica como indicador de qualidade do solo pode ser trabalhosa e variar de acordo com as características intrínsecas de cada ambiente.

Vários trabalhos de avaliação da qualidade do solo têm sido expressos na forma de índices (KARLEN; STOTT, 1994; SNAKIN et al., 1996; ISLAM; WEIL, 2000) mostrando a importância de utilização dessa metodologia, pela facilidade de uso e a possibilidade de uma escala contínua de avaliação (SINGER; EWING, 1999).

A metodologia proposta por Karlen e Stott (1994) tem-se destacado em diversos trabalhos de mensuração da qualidade do solo (CHAER, 2001; MELO

FILHO; SOUZA; SOUZA, 2007; ANDREWS; KARLEN; CAMBARDELLA, 2004; ERKOSSA; ITANNA; STAHR, 2007; ALAVRENGA, 2012).

Nesses trabalhos, tem sido enfatizada a integração de indicadores, de modo a gerar um valor (índice de qualidade do solo) que possa ser comparado entre várias práticas de manejo, ao longo do tempo, em ecossistemas agrícolas, florestais e pecuários, e essa alternativa tem se mostrado bastante flexível e de relativa facilidade de utilização (ARAÚJO et al., 2012).

Nesse sentido, objetivou-se, neste trabalho, o aprimoramento de um Índice de Qualidade do Solo proposto por Alvarenga (2012), sob o contexto da recarga do lençol superficial, com a inclusão de informações do perfil, matéria orgânica e do relevo. Aplicou-se o IQS nas áreas de recarga das nascentes L1 e M1 situadas, respectivamente, nas BHRL e BHRM, localizadas na região do Alto Rio Grande, MG.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Caracterização dos atributos físico-hídricos do solo

Foram coletadas nas áreas de recarga das nascentes L1 e M1, em 34 e 40 pontos respectivamente, (FIGURAS 1 e 2), amostras deformadas e indeformadas a cada 20 cm até a profundidade de 1 metro, seguindo um grid regular de 60 x 60 m com refinamento da escala em grid's de 20 x 20 m, próximo à surgência da nascente. As amostras foram coletadas, utilizando-se um amostrador tipo Uhland, com cilindros de PVC com dimensões de 75 x 83 mm. Em laboratório foram determinados os seguintes atributos físico-hídricos do solo: condutividade hidráulica saturada; microporosidade; densidade do solo; densidade de partículas; porosidade total; porosidade drenável e matéria orgânica.

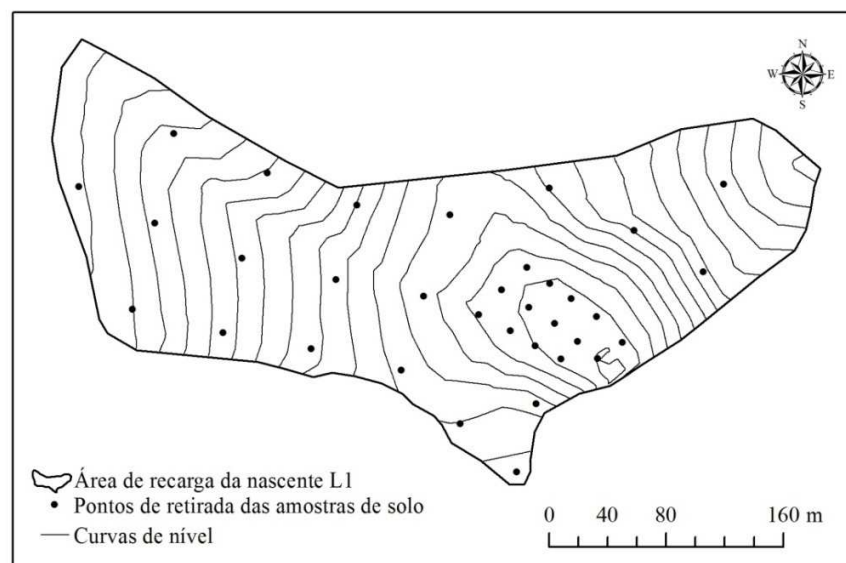


Figura 1 Pontos de coleta de amostras de solo deformadas e indeformadas na área de recarga da nascente L1

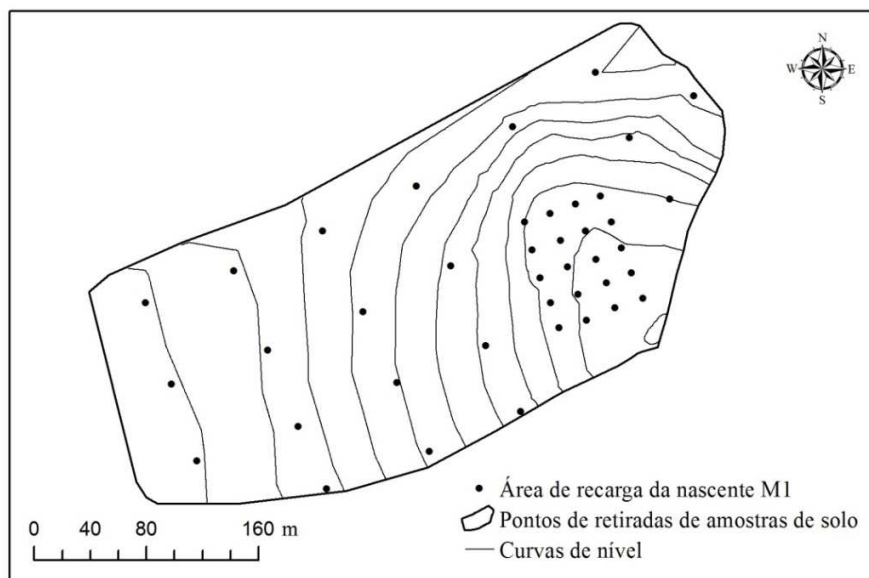


Figura 2 Pontos de coleta de amostras de solo deformadas e indeformadas na área de recarga da nascente M1

A condutividade hidráulica (k_0) do solo saturado foi determinada pelo método do permeâmetro de carga constante, que consistiu de um suporte de madeira, possuindo em sua parte superior um tubo de PVC de 100 mm (tubo alimentador) por onde circulava água livremente. Em sua base, existem 20 orifícios onde são colocados os cilindros com as amostras indeformadas, os quais são alimentados com água por sifões colocados no tubo alimentador. Para eliminar o efeito do escoamento preferencial na parede do cilindro, coletou-se apenas a água que passa por um anel de PVC com diâmetro de 50 mm, colado dentro do orifício onde o cilindro é apoiado, sendo o excedente do escoamento preferencial eliminado por uma calha coletora posicionada embaixo da base do suporte de madeira. Após a remoção do excesso de terra das bordas dos anéis, a face inferior foi protegida por um tecido sintético, preso com elástico para evitar a perda de material, enquanto, na face superior, outro cilindro foi preso por uma

fita adesiva transparente, servindo como reservatório de água durante a realização do ensaio.

As amostras foram embebidas por água, em bandejas, permanecendo assim por 24 h ou mais, para obter-se a completa saturação das mesmas. Uma vez colocadas nos orifícios do permeâmetro de carga, o nível da água no cilindro reservatório passou a ser mantido constante em 60 mm, pelo tubo alimentador. A água que passava através da amostra num certo intervalo de tempo era coletada em proveta graduada, obtendo-se o volume de água percolada. Atingida a condição de regime a determinação da condutividade hidráulica foi realizada com emprego da Equação 1:

$$k_0 = \frac{V_A \cdot L}{A \cdot t \cdot (h + L)} \quad (1)$$

em que,

K_0 = é a condutividade hidráulica saturada do solo [LT^{-1}];

V_A = o volume [L^3] de água percolada durante o tempo t [T];

A = área da seção transversal da amostra [L^2];

L = comprimento da amostra [L];

h = carga hidráulica sobre a amostra [L].

As metodologias utilizadas para obtenção da microporosidade (M); densidade do solo (DS); densidade de partículas (Dp); porosidade total (PT); porosidade drenável (μ) e matéria orgânica (MO) foram baseadas em EMBRAPA (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, 1997).

A fim de realizar um mapeamento dos atributos físico-hídricos do solo nas áreas de recargas das nascentes, com base na geoestatística, primeiramente foi realizada a análise exploratória dos dados com a análise dos histogramas,

conjuntamente com o valor da assimetria, análises de tendências no espaço e gráfico “boxplot” que permitem a identificação de pontos discrepantes (outliers).

Após a análise exploratória dos dados, foi verificada a estrutura espacial por meio dos modelos semivariograma exponencial, esférico e gaussiano. O ajuste dos parâmetros dos modelos (patamar, alcance e efeito pepita) foi obtido pelo método dos mínimos quadrados ponderados. Como critério de escolha do melhor modelo, foram considerados o grau de dependência espacial (GD) e os resultados das análises da validação preditiva. Com os semivariogramas prontos, foi feita a krigagem ordinária e os procedimentos de validação preditiva, utilizando-se as equações (EMR) e (DPE) para aferir a qualidade da interpolação. Quando os dados não se ajustavam pela krigagem ordinária os mesmos foram interpolados pelo inverso do quadrado da distância.

Todas as análises geoestatísticas e confecção dos mapas temáticos foram realizadas no software ArcGis 10® e, para geração dos gráficos, o Microsoft Excel 2010®. Adotou-se a Projeção Cônica Albers Equivalente para a confecção dos mapas, seguindo recomendação de Campos et al. (2008), como a mais indicada para trabalhos de análise espacial, pois não há sobreposição de zonas, resultando uma menor distorção nas áreas.

2.2 Aperfeiçoamento do Índice de Qualidade do Solo associado à recarga de água subterrânea (IQS_{RA})

Para a determinação do IQS_{RA}, foram utilizados cinco atributos, todos considerados determinantes no processo de infiltração de água e influenciados pelo uso e manejo do solo e dois indicadores do relevo.

Alvarenga et al. (2012), trabalhando com os indicadores densidade do solo (Ds); microporosidade (M); condutividade hidráulica saturada (k_0) e porosidade drenável (μ), na camada 0 – 20 cm, propôs a seguinte estruturação do

IQS_{RA} para estimar o potencial de recarga subterrânea em grandes bacias hidrográficas do Alto Rio Grande, Equação 2:

$$IQS_{RA} = 0,15 \times I_{DS} + 0,25 \times I_M + 0,30 \times I_{k0} + 0,30 \times I_{\mu} \quad (2)$$

Na tentativa de aprimoramento do IQS_{RA} , propôs-se a incorporação do indicador matéria orgânica e dois indicadores de relevo, além de um detalhamento dos indicadores a cada 20 cm até um metro de profundidade. A nova estruturação do IQS_{RA} pode ser visualizada na Equação 3:

$$IQS_{RA (camada)} = 0,18 \times I_{DS} + 0,14 \times I_M + 0,25 \times I_{k0} + 0,16 \times I_{\mu} + 0,07 \times I_{MO} + 0,10 \times I_{t1} + 0,10 \times I_{t2} \quad (3)$$

em que $IQS_{RA (camada)}$ é o IQS_{RA} para cada camada, I_{DS} , I_M , I_{k0} , I_{μ} e I_{MO} são os indicadores de solo já descritos anteriormente, I_{t1} e I_{t2} são indicadores topográficos (relevo).

Para a obtenção do IQS_{RA} , para cada ponto foi realizada uma ponderação, atribuindo pesos para cada camada, resultando na Equação 4:

$$IQS_{RA} = 0,35 \times (IQS_{RA (0-20 \text{ cm})}) + 0,20 \times (IQS_{RA (20-40 \text{ cm})}) + 0,15 \times (IQS_{RA (40-60 \text{ cm})}) + 0,15 \times (IQS_{RA (60-80 \text{ cm})}) + 0,15 \times (IQS_{RA (80-100 \text{ cm})}) \quad (4)$$

Os pesos foram atribuídos de maneira subjetiva para cada indicador e para cada camada, com base na função que cada um desempenha no processo de infiltração, portanto, pode variar de um pesquisador para outro. Áreas cujos valores do índice são baixos significa que o solo apresenta baixa capacidade em

promover a recarga de água, já valores elevados, este apresentará também elevada capacidade em promover a recarga de água.

Os indicadores relacionados com as condições topográficas de cada ponto foram associados uma declividade específica, obtida a partir do modelo digital de elevação hidrologicamente consistente (MDE), com precisão de 1 m, para cada área estudada. Para tanto, foi realizada a interpolação linear entre os valores altimétricos das curvas de nível e os pontos cotados das cartas do IBGE. Posteriormente à interpolação, deu-se início à eliminação das distorções da grade de interpolação, que consisti na correção da imagem gerada, por meio do preenchimento das depressões espúrias ou eliminação de picos gerados por erros na interpolação. No processo de correção, atribuiu-se um valor baseado nos valores médios das células da vizinhança, fazendo haver coincidência entre a drenagem derivada numericamente e a drenagem mapeada, obtendo-se, assim, um modelo digital de elevação hidrologicamente consistente (MDEHC).

Com base nessas informações, foram calculados 2 índices topográficos:

$$It1 = LN\left(\frac{a}{tg(\beta)}\right) \quad (5)$$

onde, $It1$ é o fator topográfico, a corresponde a área de contribuição, é igual a $(\text{fluxo acumulado} + 1) \times (\text{tamanho da célula do grid em m}^2)$ e β é a declividade expressa em radianos (WOODS; SIVAPALAN; ROBINSON, 1997).

Segundo Hjerdt et al. (2004), esse índice topográfico apresenta algumas limitações relacionadas à distribuição da umidade no perfil do solo, principalmente com relação à concavidade do relevo. De maneira a suprir essa deficiência, o mesmo autor sugere a associação de mais um índice, sendo calculado pela seguinte equação:

$$It_2 = \operatorname{tg}(\alpha) = \frac{d}{Ld} \quad (6)$$

Os parâmetros d e Ld podem ser entendidos com base na Figura 3 a seguir.

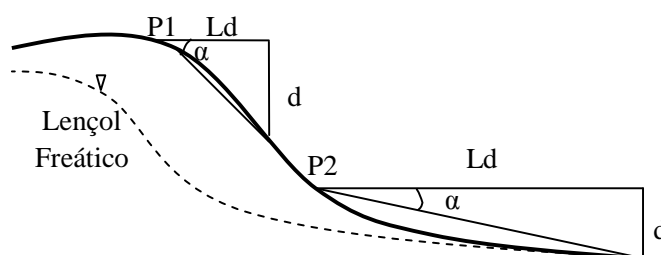


Figura 3 Esquema representativo do comportamento da trajetória do fluxo no perfil do solo, descrevendo os elementos que compõem o índice topográfico 2

Anteriormente à determinação do IQSRA, foi realizada a normalização dos indicadores, pelo fato de que os mesmos apresentam unidades de medida distintas. A função de pontuação normalizada sugerida por Karlen e Stott (1994) e desenvolvida por Wymore (1993) foi aplicada para a obtenção de valores normalizados dos indicadores entre zero e um:

$$v = \frac{1}{1 + \left(\frac{B-L}{x-L} \right)^{2 \cdot S \cdot (B+x-2L)}} \quad (7)$$

em que v é a pontuação normalizada; B é o valor do indicador quando a pontuação normalizada (v) é 0,5; L é limite inferior do indicador; S é a inclinação da reta tangente a curva em B e x é o valor do indicador do solo.

Para a construção das curvas de normalização para cada indicador, o valor de B foi considerado igual à média do indicador e o valor de L como sendo o menor valor observado para o indicador. O valor de S para cada curva foi determinado igualando-se à derivada segunda da equação 7 a zero, considerando v igual a 0,5, e x igual a B . Curvas do tipo “mais é melhor” foram ajustadas para os indicadores condutividade hidráulica saturada e porosidade drenável, e matéria orgânica, enquanto curvas do tipo “menos é melhor” foram ajustadas para os indicadores densidade do solo, microporosidade, e índices topográficos (GLOVER; REGANOLD; ANDREWS, 2000; KARLEN; STOTT, 1994).

2.2.1 Mapeamento do IQS_{RA}

Após a normalização dos valores de cada atributo e verificada a estrutura espacial por meio dos modelos de semivariograma exponencial, esférico e gaussiano foram gerados os mapas de IQR_{SA} para cada área de recarga das nascentes L1 e M1, utilizando-se da técnica da álgebra de mapas realizada no software ArcGis 10®.

2.2.2 Validação do IQS_{RA} como indicador potencial de áreas de recarga de água subterrânea

Foram utilizados dados de monitoramento hidrológico e climático para as áreas de recarga das nascentes L1 e M1, no período de 2009 a 2014.

Os indicadores hidrológicos analisados (valores médios anuais) estão associados ao deflúvio base, e sua participação na precipitação. Admite-se que

as áreas que apresentam maiores valores do índice sejam aquelas com maior proporção do deflúvio base junto ao total precipitado e, conseqüentemente, reflitam melhores condições para infiltração de água no solo e para a recarga subterrânea.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Normalização dos indicadores do IQS_{RA}

Segundo Alvarenga (2010), é de grande importância a determinação dos parâmetros B, L e S da equação de normalização de dados em decorrência da ausência desses valores na literatura, principalmente para solos tropicais.

Diante do contexto, a seguir é apresentada a normalização dos indicadores do IQS_{RA} para as áreas de recarga das nascentes L1 e M1.

3.1.1 Normalização dos indicadores na área de recarga da nascente L1

Os parâmetros utilizados na elaboração das curvas de normalização para cada indicador que compõe o IQS_{RA} em cada camada são apresentados na Tabela 1. Os parâmetros B, L e S representam os valores médios, mínimos e inclinação da reta tangente à curva, quando o valor normalizado é 0,5 no modelo proposto por Karlen e Scott (1994) e proposto por Wymore (1993).

Tabela 1 Valores dos parâmetros utilizados para a normalização dos indicadores na área de recarga da nascente L1

Camada 0 - 20 cm			
Indicadores	B	L	S
Densidade do solo (g/cm ³)	1,140	0,719	-1,5016
Microporosidade (cm ³ /cm ³)	0,447	0,375	-4,4703
Condutividade hidráulica saturada (m/dia)	2,905	0,038	0,0778
Porosidade drenável (cm ³ /cm ³)	0,095	0,010	5,3094
Matéria Orgânica (Dag/kg)	3,899	0,713	0,2533
Camada 20 - 40 cm			
Indicadores	B	L	S
Densidade do solo (g/cm ³)	1,174	0,634	-1,1581
Microporosidade (cm ³ /cm ³)	0,364	0,218	-5,3116
Condutividade hidráulica saturada (m/dia)	2,440	0,038	0,1098
Porosidade drenável (cm ³ /cm ³)	0,132	0,018	7,6182
Matéria Orgânica (Dag/kg)	3,091	0,922	0,3027
Camada 40 - 60 cm			
Indicadores	B	L	S
Densidade do solo (g/cm ³)	1,226	0,640	-1,5240
Microporosidade (cm ³ /cm ³)	0,396	0,236	-3,7203
Condutividade hidráulica saturada (m/dia)	3,545	0,095	0,0716
Porosidade drenável (cm ³ /cm ³)	0,143	0,048	5,2052
Matéria Orgânica (Dag/kg)	2,978	0,323	0,1501
Camada 60 - 80 cm			
Indicadores	B	L	S
Densidade do solo (g/cm ³)	1,278	0,656	-1,5616
Microporosidade (cm ³ /cm ³)	0,374	0,217	-3,6405
Condutividade hidráulica saturada (m/dia)	4,065	0,029	0,0611
Porosidade drenável (cm ³ /cm ³)	0,135	0,004	5,3389
Matéria Orgânica (Dag/kg)	2,067	0,228	0,1821

“Tabela 1, conclusão”

Camada 80 - 100 cm			
Indicadores	B	L	S
Densidade do solo (g/cm ³)	1,338	1,026	-2,5447
Microporosidade (cm ³ /cm ³)	0,403	0,255	-3,8157
Condutividade hidráulica saturada (m/dia)	2,012	0,025	0,0974
Porosidade drenável (cm ³ /cm ³)	0,167	0,033	4,1757
Matéria Orgânica (Dag/kg)	1,655	0,323	0,2306
IT1	5,180	2,998	-0,5441
IT2	0,264	0,038	-7,3380

Foram ajustadas em todas as camadas curvas de valores normalizados do tipo “menos é melhor” aos indicadores densidade do solo (GRÁFICO 1), microporosidade (GRÁFICO 2) e índices topográficos (IT1 e IT2) (GRÁFICO 3) e do tipo “mais é melhor” para os indicadores condutividade hidráulica saturada (GRÁFICO 4), porosidade drenável (GRÁFICO 5) e matéria orgânica (GRÁFICO 6).

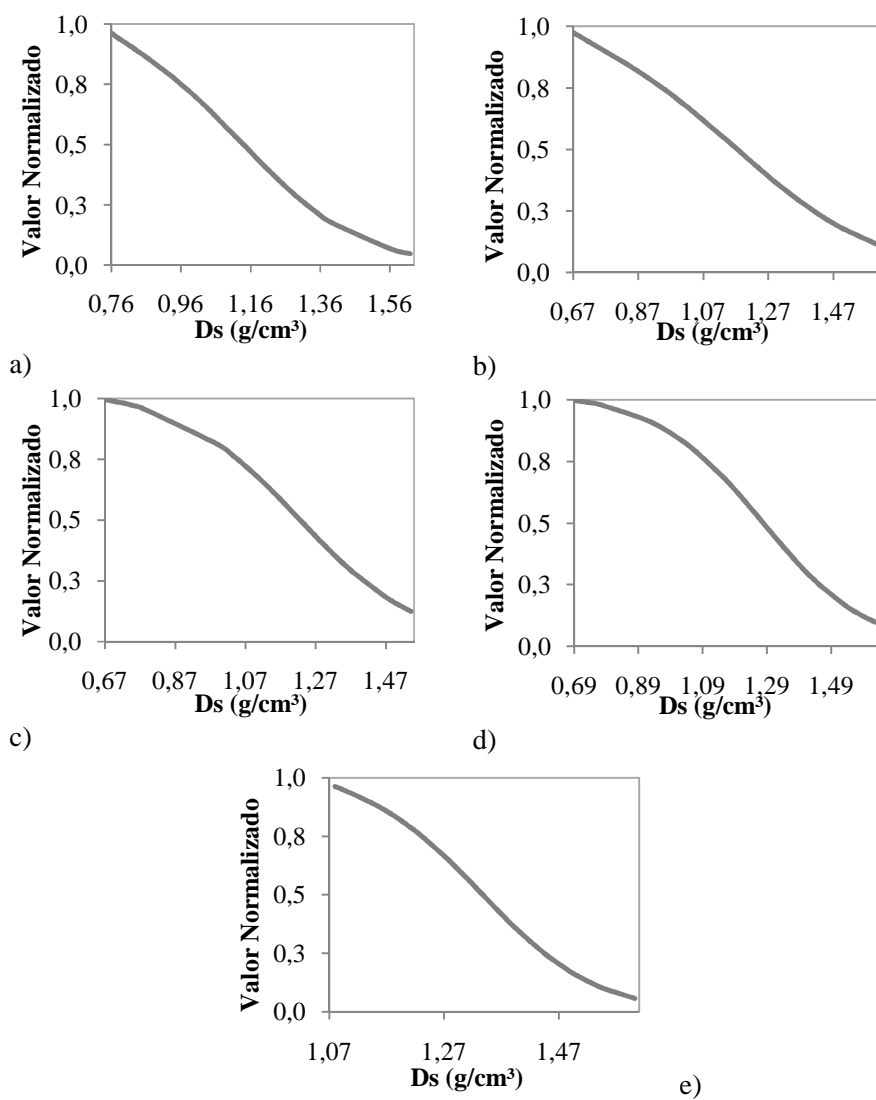


Gráfico 1 Curva de normalização para o indicador densidade do solo (D_s) na área de recarga da nascente L1 nas camadas 0 – 20 cm (a), 20 – 40 cm (b), 40 – 60 cm (c), 60 – 80 cm (d) e 80 – 100 cm (e)

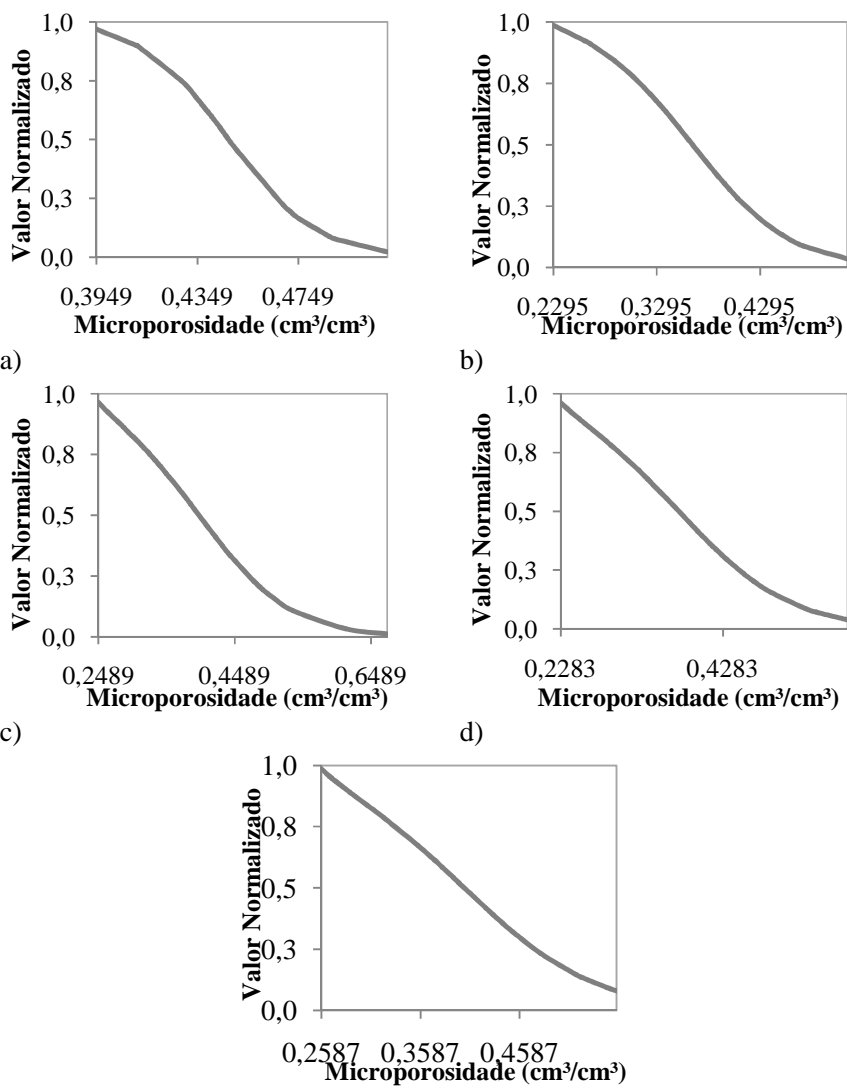


Gráfico 2 Curva de normalização para o indicador microporosidade na área de recarga da nascente L1 nas camadas 0 – 20 cm (a), 20 – 40 cm (b), 40 – 60 cm (c), 60 – 80 cm (d) e 80 – 100 cm (e)

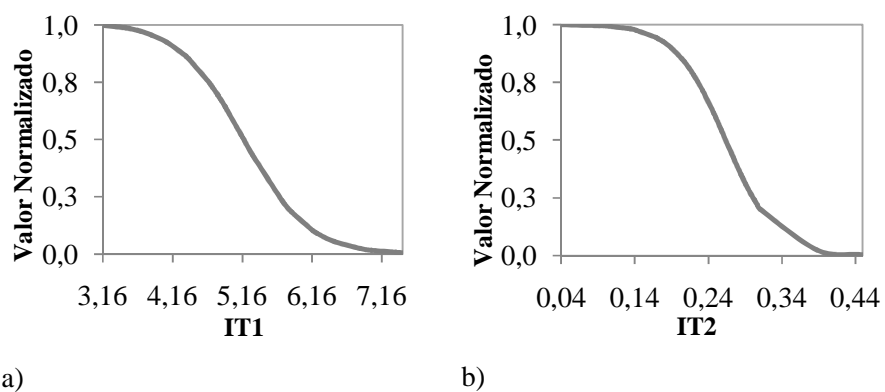
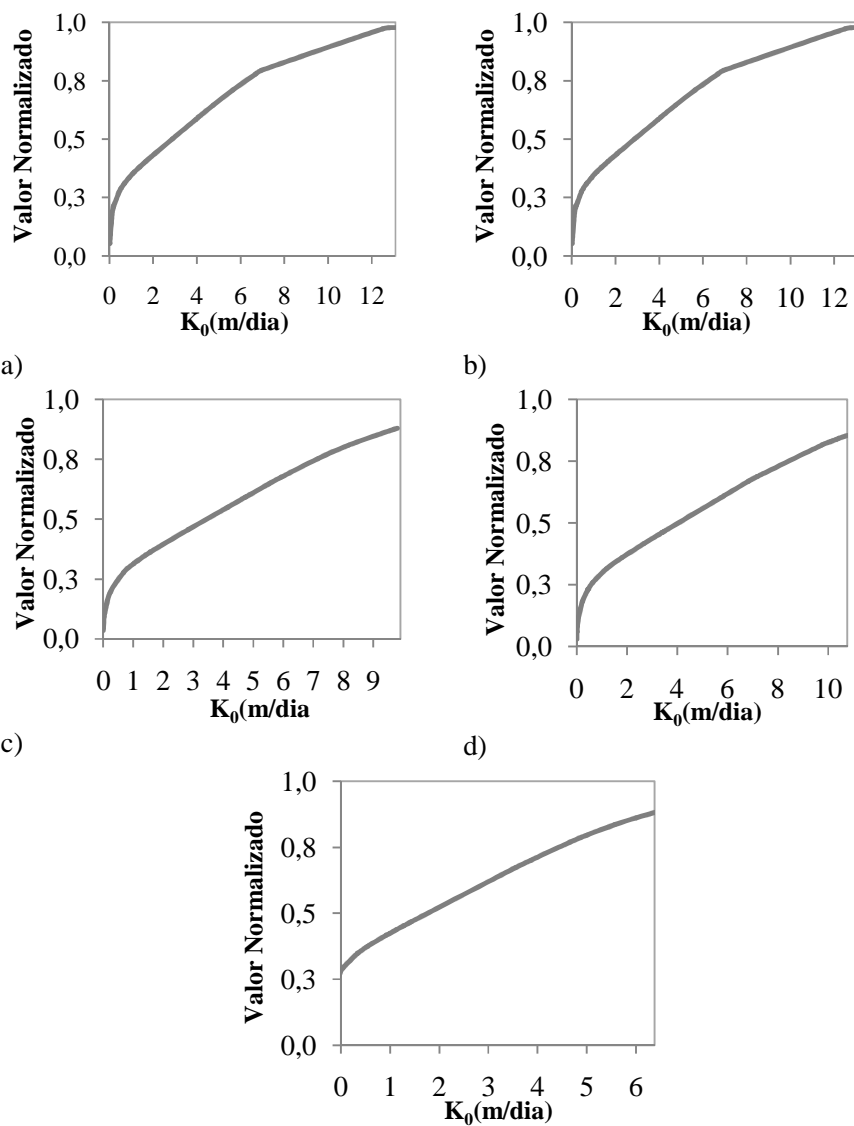


Gráfico 3 Curva de normalização para os indicadores índices topográficos 1 (IT1) (a) e 2 (IT2) (b) na área de recarga da nascente L1



e)
Gráfico 4 Curva de normalização para o indicador condutividade hidráulica saturada na área de recarga da nascente L1 nas camadas 0 – 20 cm (a), 20 – 40 cm (b), 40 – 60 cm (c), 60 – 80 cm (d) e 80 – 100 cm (e)

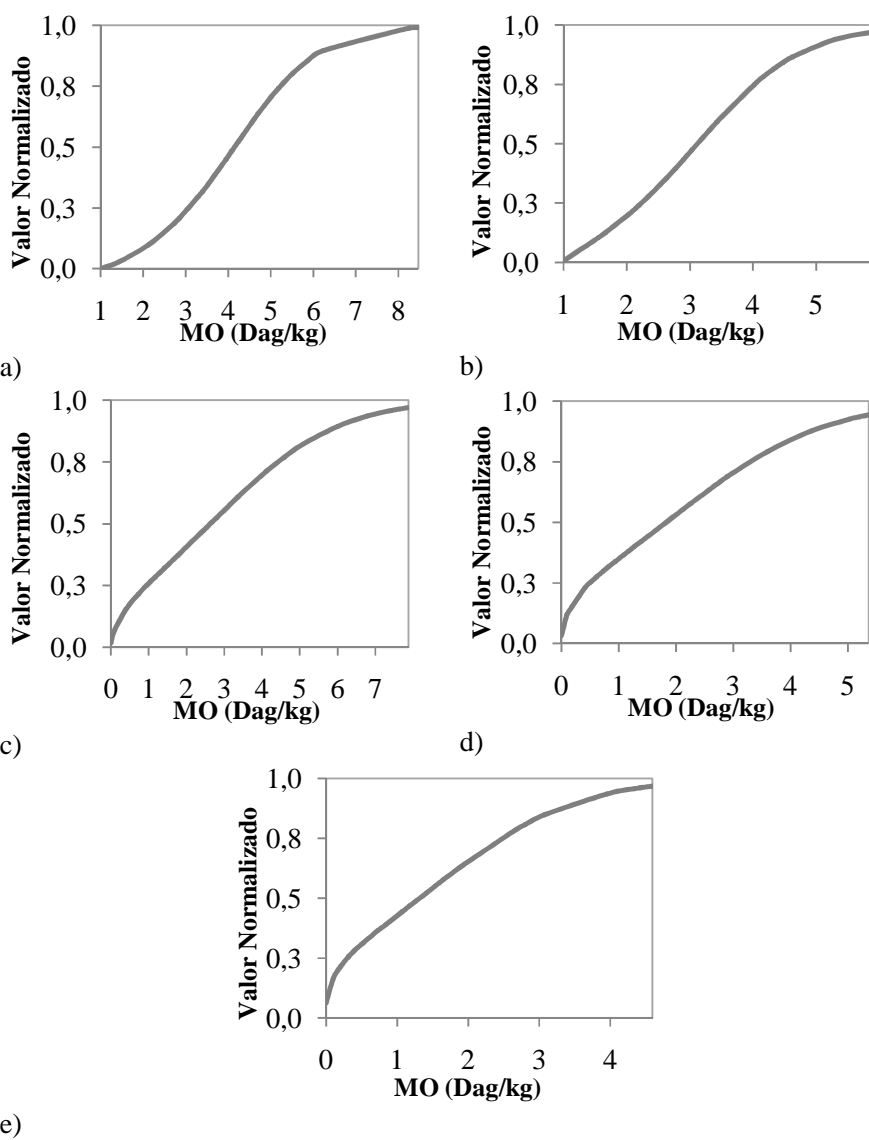


Gráfico 5 Curva de normalização para o indicador matéria orgânica na área de recarga da nascente L1 nas camadas 0 – 20 cm (a), 20 – 40 cm (b), 40 – 60 cm (c), 60 – 80 cm (d) e 80 – 100 cm (e)

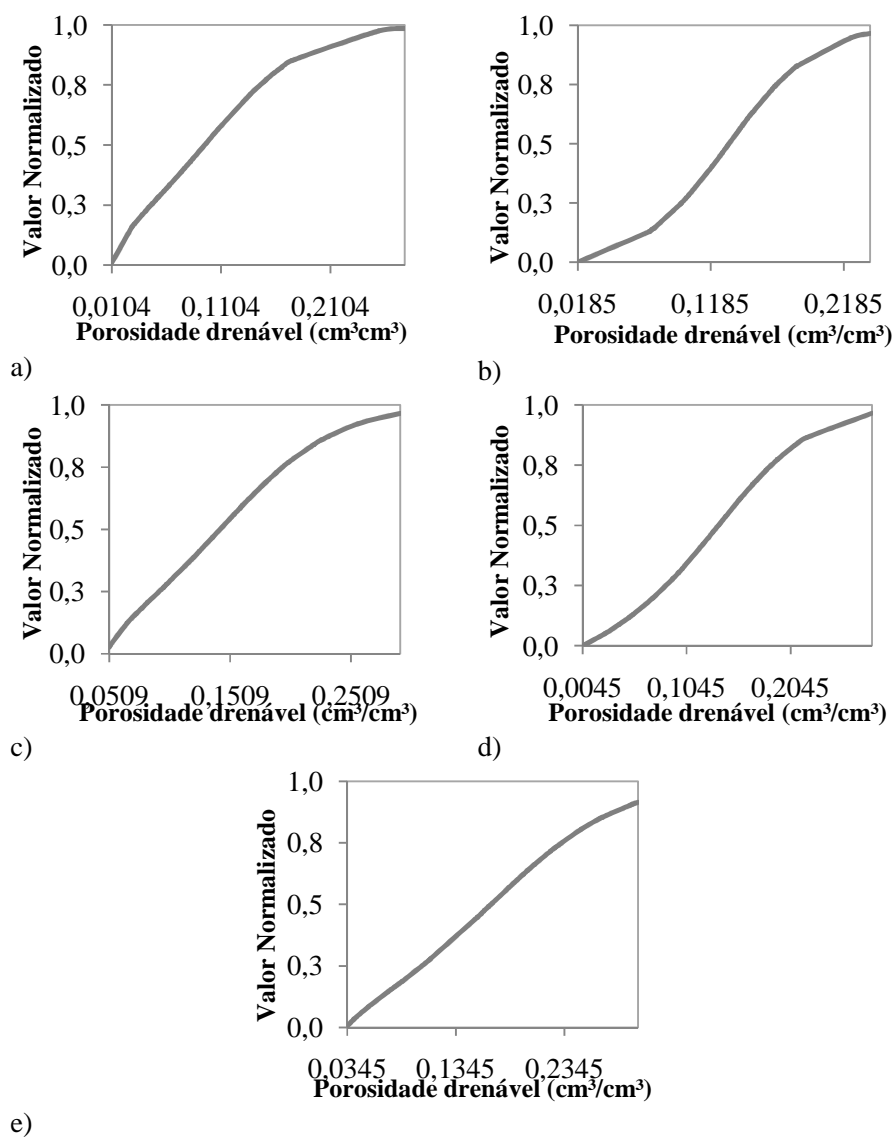


Gráfico 6 Curva de normalização para o indicador porosidade drenável na área de recarga da nascente L1 nas camadas 0 – 20 cm (a), 20 – 40 cm (b), 40 – 60 cm (c), 60 – 80 cm (d) e 80 – 100 cm (e)

3.1.2 Normalização dos indicadores na área de recarga da nascente M1

Os parâmetros utilizados na elaboração das curvas de normalização para cada indicador que compõe o IQS_{RA} em cada camada são apresentados na Tabela 2.

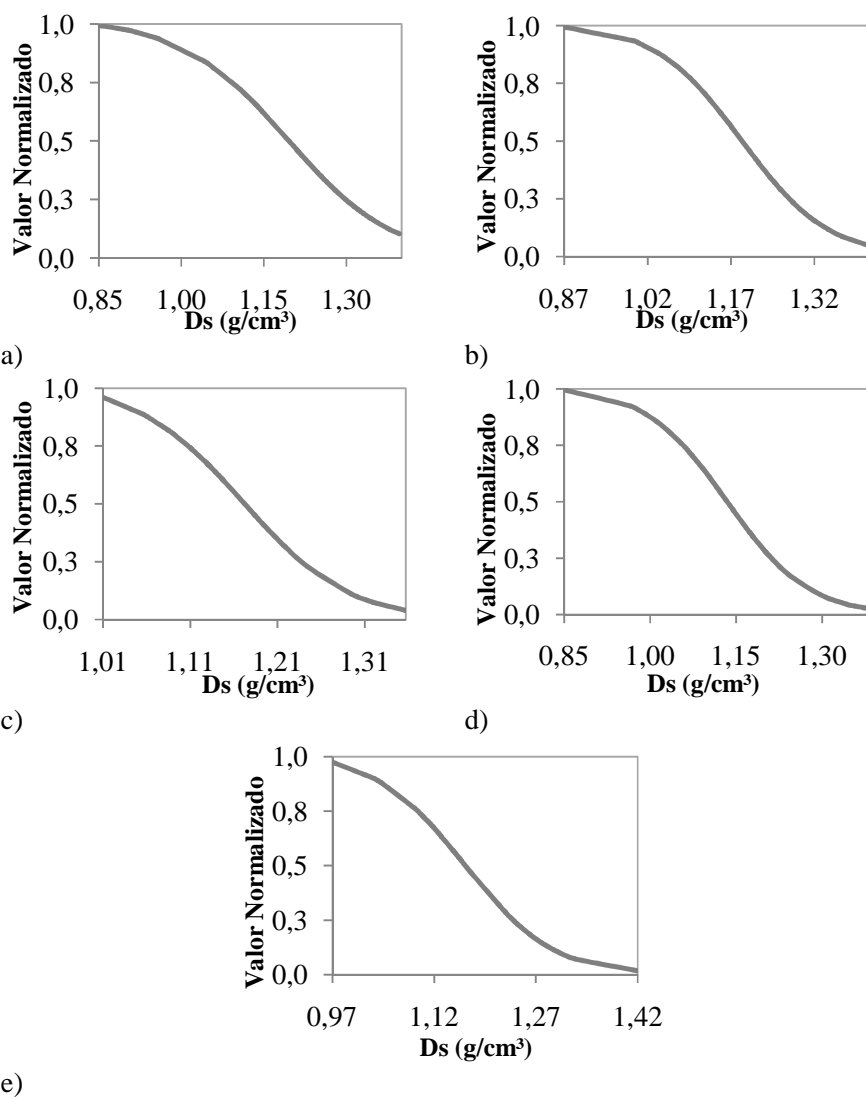
Tabela 2 Valores dos parâmetros utilizados para a normalização dos indicadores área de recarga da nascente M1

Camada 0 - 20 cm			
Indicadores	B	L	S
Densidade do solo (g/cm ³)	1,196	0,808	-2,6521
Microporosidade (cm ³ /cm ³)	0,447	0,339	-29,8325
Condutividade hidráulica saturada (m/dia)	0,375	0,142	0,1442
Porosidade drenável (cm ³ /cm ³)	0,114	0,005	5,2942
Matéria Orgânica (Dag/kg)	3,011	1,777	0,6244
Camada 20 - 40 cm			
Indicadores	B	L	S
Densidade do solo (g/cm ³)	1,190	0,823	-3,2318
Microporosidade (cm ³ /cm ³)	0,364	0,218	5,3116
Condutividade hidráulica saturada (m/dia)	0,467	0,013	0,6775
Porosidade drenável (cm ³ /cm ³)	0,119	0,009	6,3752
Matéria Orgânica (Dag/kg)	2,366	0,922	0,5696
Camada 40 - 60 cm			
Indicadores	B	L	S
Densidade do solo (g/cm ³)	1,170	0,957	-4,1998
Microporosidade (cm ³ /cm ³)	0,396	0,237	3,6338
Condutividade hidráulica saturada (m/dia)	0,875	0,017	0,0120
Porosidade drenável (cm ³ /cm ³)	0,145	0,037	7,6008
Matéria Orgânica (Dag/kg)	1,646	0,618	0,5364
Camada 60 - 80 cm			
Indicadores	B	L	S
Densidade do solo (g/cm ³)	1,131	0,804	-3,5456
Microporosidade (cm ³ /cm ³)	0,374	0,217	3,5430
Condutividade hidráulica saturada (m/dia)	0,446	0,013	0,5047
Porosidade drenável (cm ³ /cm ³)	0,166	0,008	5,6997
Matéria Orgânica (Dag/kg)	1,178	0,323	0,5704

“Tabela 2, conclusão”

Camada 80 - 100 cm			
Indicadores	B	L	S
Densidade do solo (g/cm ³)	1,166	0,922	-3,8799
Microporosidade (cm ³ /cm ³)	0,356	0,170	3,9567
Condutividade hidráulica saturada (m/dia)	0,204	0,027	1,7479
Porosidade drenável (cm ³ /cm ³)	0,153	0,015	3,6493
Matéria Orgânica (Dag/kg)	0,917	0,038	0,5926
IT1	6,430	1,759	-0,2079
IT2	0,195	0,010	-4,0307

Foram ajustadas em todas as camadas curvas de valores normalizados do tipo “menos é melhor” aos indicadores densidade do solo (GRÁFICO 7), microporosidade (GRÁFICO 8) e índices topográficos (IT1 e IT2) (GRÁFICO 9) e do tipo “mais é melhor” para os indicadores condutividade hidráulica saturada (GRÁFICO 10), porosidade drenável (GRÁFICO 11) e matéria orgânica (GRÁFICO 12).



e) Gráfico 7 Curva de normalização para o indicador densidade do solo na área de recarga da nascente M1 nas camadas 0 – 20 cm (a), 20 – 40 cm (b), 40 – 60 cm (c), 60 – 80 cm (d) e 80 – 100 cm (e)

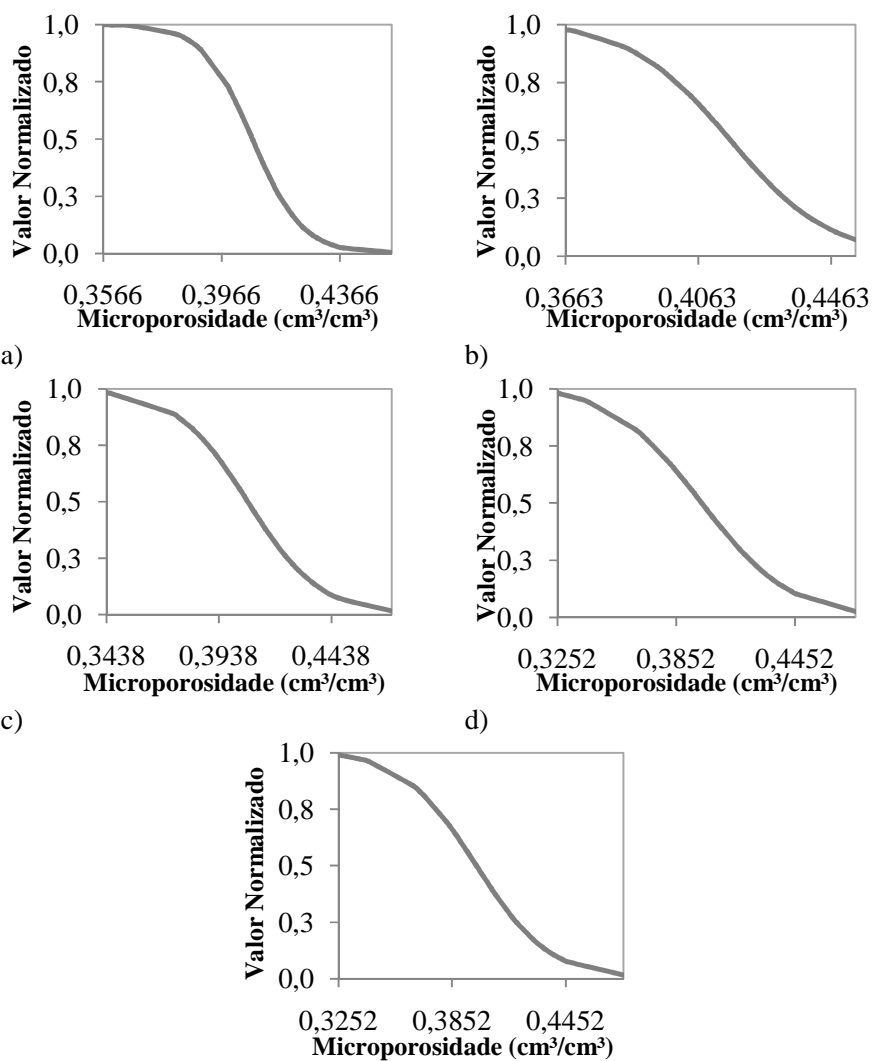
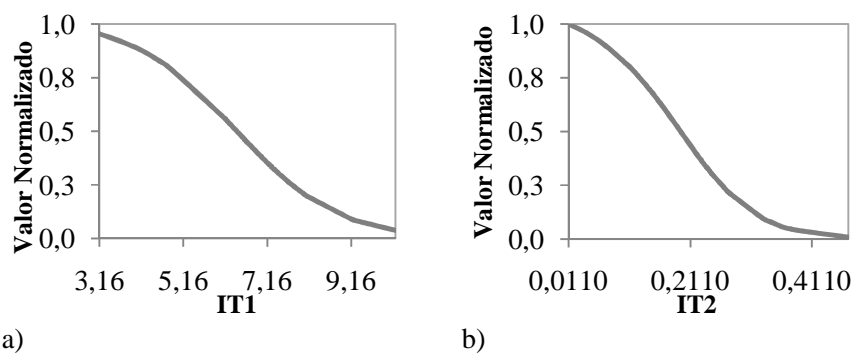
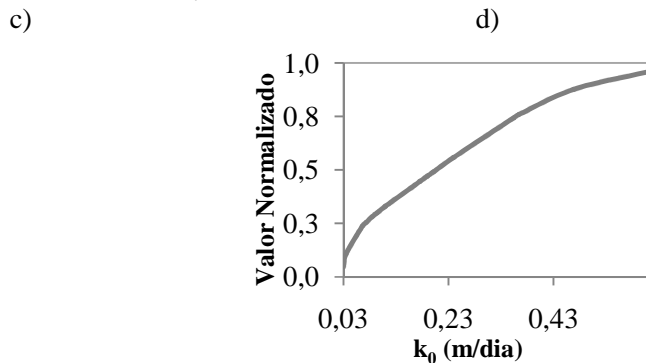
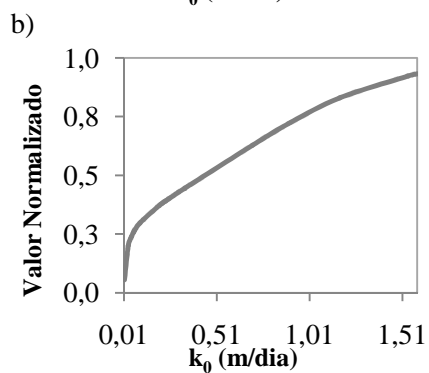
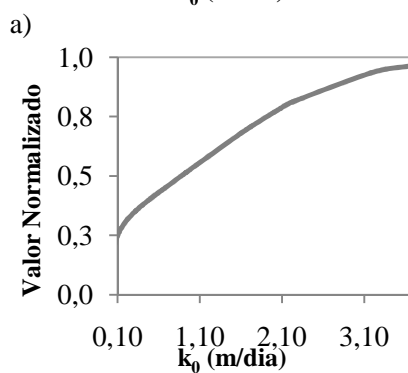
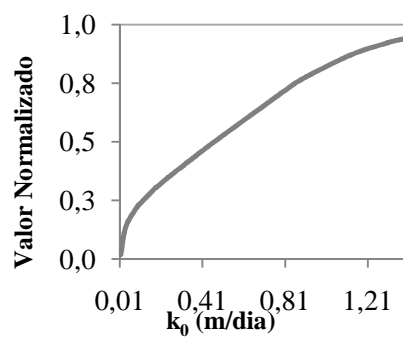
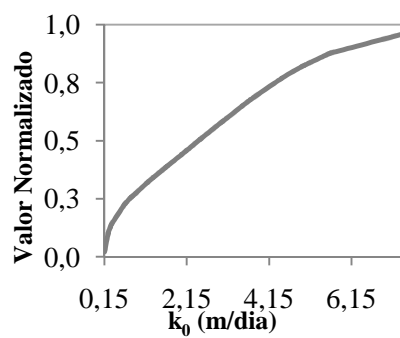


Gráfico 8 Curva de normalização para o indicador microporosidade na área de recarga da nascente M1 nas camadas 0 – 20 cm (a), 20 – 40 cm (b), 40 – 60 cm (c), 60 – 80 cm (d) e 80 – 100 cm (e)



a) b)
Gráfico 9 Curva de normalização para os indicadores índices topográficos 1 (IT1) (a) e 2 (IT2) (b) na área de recarga da nascente M1.



e)

Gráfico 10 Curva de normalização para o indicador condutividade hidráulica saturada na área de recarga da nascente M1 nas camadas 0 – 20 cm (a), 20 – 40 cm (b), 40 – 60 cm (c), 60 – 80 cm (d) e 80 – 100 cm (e)

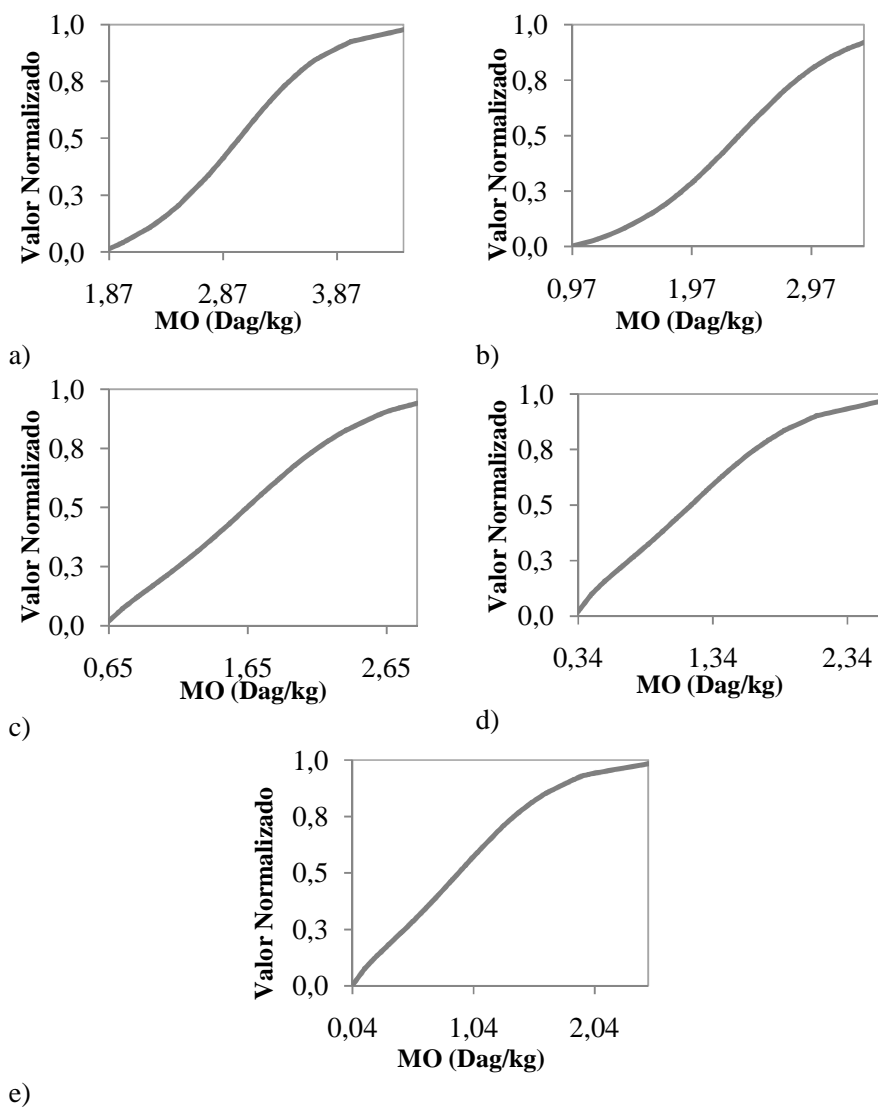
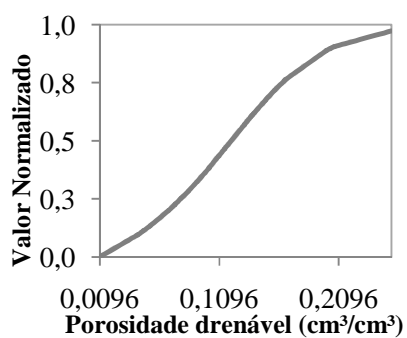
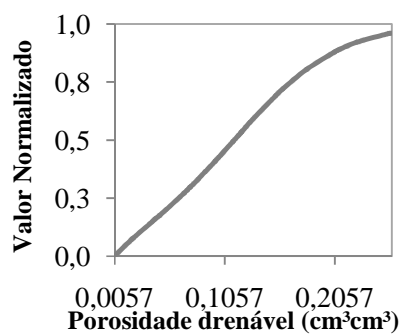
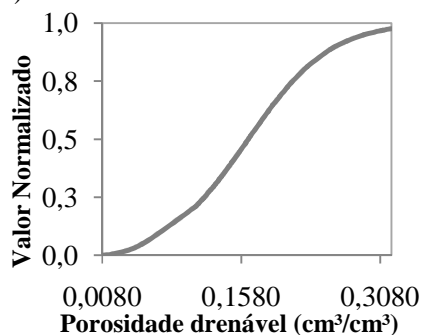
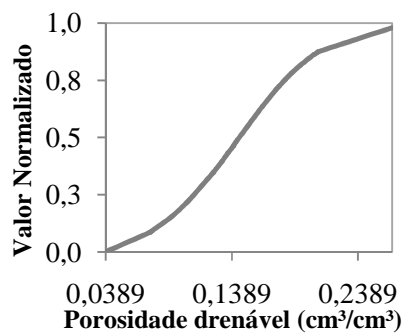


Gráfico 11 Curva de normalização para o indicador matéria orgânica na área de recarga da nascente M1 nas camadas 0 – 20 cm (a), 20 – 40 cm (b), 40 – 60 cm (c), 60 – 80 cm (d) e 80 – 100 cm (e)



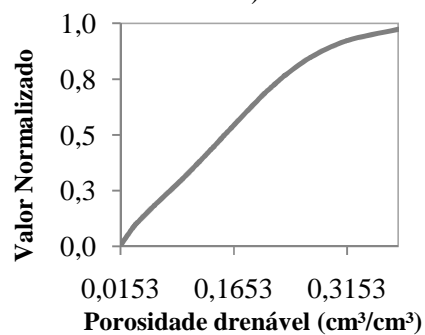
a)

b)



c)

d)



e)

Gráfico 12 Curva de normalização para o indicador porosidade drenável na área de recarga da nascente M1 nas camadas 0 – 20 cm (a), 20 – 40 cm (b), 40 – 60 cm (c), 60 – 80 cm (d) e 80 – 100 cm (e)

3.1.3 Mapeamento do IQR_{SA} na área de recarga da nascente

Nas Figuras 4 e 5, são apresentados os mapas de IQR_{RA} , respectivamente, para as nascentes L1 e M1.

Ao se analisar as figuras, percebe-se que a área de recarga da nascente L1 apresentou os maiores valores do IQR_{RA} , mesmo que em sua área de recarga ocorra a predominância do Cambissolo, que, segundo Menezes et al. (2009) apresenta baixo potencial para a recarga subterrânea. Já, a área de recarga da nascente L1 apresentou menor IQR_{RA} , mesmo com a predominância do Latossolo, solos classificados como de alto potencial para a recarga subterrânea, conforme Araújo (2006), quando propôs um mapa qualitativo para recarga subterrânea para a bacia hidrográfica do Alto Rio Grande.

Ao se analisar os usos predominantes nas áreas de recargas das nascentes, percebe-se, praticamente, a ausência de mata, apresentando a mesma porcentagem em ambas as áreas de recarga, apenas 0,2% de sua área composta por mata nativa, ocorrendo a predominância da pastagem em 92,9 e 66,7%, respectivamente, nas áreas de recarga da nascente L1 e M1. Com relação aos usos do solo, não foi possível detectar a sua influência, em razão das semelhanças ocorridas entre as áreas de recargas.

Com relação ao relevo, a declividade média na área de recarga da nascente L1 é de 28,7% ,apresentando relevo mais movimentado, já na área de recarga da nascente M1, o relevo é mais suave, com declividade média de 17%.

Segundo Camarinha (2011), a declividade influencia no processo de infiltração da água no solo e, conseqüentemente, na recarga subterrânea, porém, a área com maior declividade foi a que apresentou o maior IQR_{RA} ,dificultando inferências sobre esse aspecto.

Os fatores que explicam os maiores valores do IQR_{RA} na área de recarga da nascente L1, cujo solo predominante, seus usos e relevos a princípio não

sejam favoráveis ao processo de infiltração, recarga e, conseqüentemente, maiores IQS_{RA} , são os atributos físico-hídricos e o elevado índice pluviométrico.

Segundo Junqueira Júnior (2006), a condutividade hidráulica saturada está intimamente ligada ao processo de infiltração e recarga subterrânea, conseqüentemente, maiores valores do IQS_{RA} . A condutividade hidráulica saturada média na área de recarga da nascente L1 é igual a 3,34 m/dia, sendo 4 vezes maior do que a ocorrida na área de recarga da nascente M1. O teor de areia é de 54,32% contra 29,08% na área de recarga da nascente M1, favorecendo o processo de infiltração e, conseqüentemente, recarga. Além disso, a área de recarga da nascente L1 possui menores teores de argila, ou seja, menor capacidade do solo reter água, apresentado teor médio igual a 31,47%, enquanto que na área de recarga da nascente M1 este valor chega a 52,17%, favorecendo a retenção da água no solo. O maior teor de silte presente na área de recarga da nascente M1 corroborou para a maior microporosidade, contribuindo para a redução da infiltração e para a maior retenção da água no solo, apresentando um teor médio de 17,60% enquanto na área de recarga da nascente L1 é de 13,52%.

Menezes (2011), trabalhando nas BHRL (bacia onde se encontra a área de recarga da nascente L1) e BHRM (bacia onde se encontra a área de recarga da nascente M1) gerou mapas de predição espacial de potencial de recarga de águas subterrâneas. Utilizando-se a lógica fuzzy, obtendo resultados semelhantes aos encontrados neste trabalho, onde a BHRL apresentou o maior potencial para recarga subterrânea, fato atribuído aos atributos físico-hídricos, mata nativa e ao elevado índice pluviométrico.

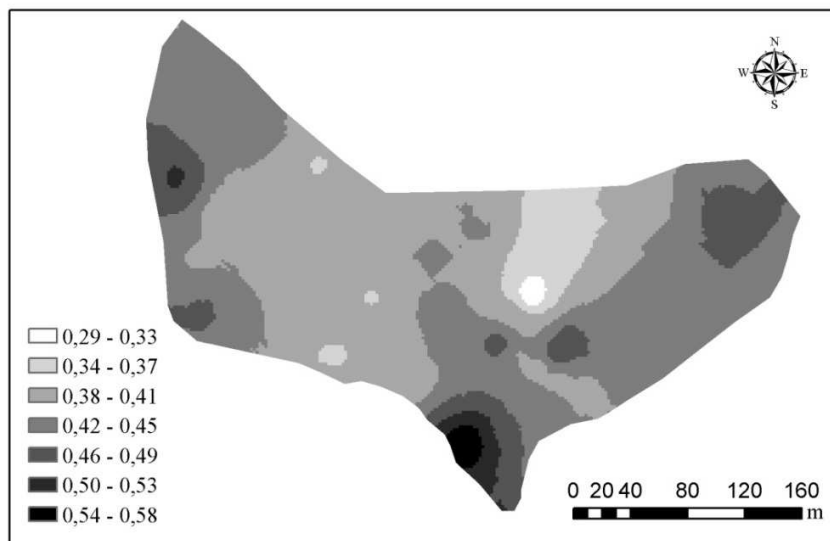


Figura 4 Distribuição espacial do IQS_{RA} para a área de recarga da nascente L1

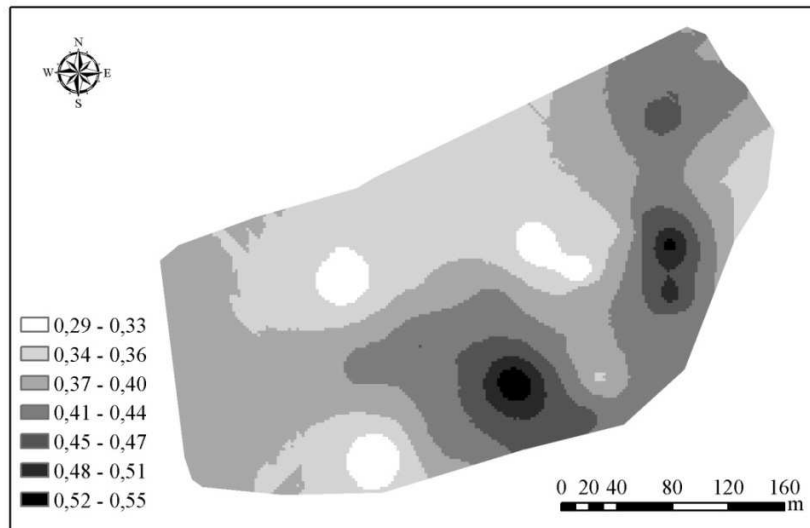


Figura 5 Distribuição espacial do IQS_{RA} para a área de recarga da nascente M1

Na Tabela 3, é apresentado o deflúvio base anula (Db), a precipitação total anual (P) e a relação Db/P para as áreas de recarga das nascentes L1 e M1. Ao se analisar a Tabela 3, fica evidente a discrepância no volume precipitado entre as áreas de recarga das nascentes. Outro ponto importante é que tanto os deflúvios de base (DB) quanto suas participações na precipitação (Db/P) foram maiores na área de recarga da nascente L1 em todos os anos avaliados. Comprovando que a área de recarga dessa nascente tem maior capacidade de converter o volume precipitação em deflúvio de base, ou seja, o processo de infiltração e recarga é mais eficiente, conseqüentemente, maiores os deflúvios e também os valores do IQS_{RA}.

Tabela 3 Indicadores hidrológicos das áreas de recargas das nascentes L1 e M1 utilizados na validação do IQS_{RA}

Nascente L1	Análise do escoamento			
	Out 2009 – Set 2010	Out 2010 – Set 2011	Out 2011 – Set 2012	Out 2012 – Set 2013
P (mm)	1879,08	1360,98	1704,34	2636,07
Db (mm/ano)	506,51	649,34	594,83	747,61
Db/P (%)	26,96	47,71	34,90	28,36
Nascente M1	Out 2009 – Set 2010	Out 2010 – Set 2011	Out 2011 – Set 2012	Out 2012 – Jan 2013
P (mm)	1227,91	1331,70	1413,14	1019,44
Db (mm/ano)	245,39	207,57	274,26	150,24
Db/P (%)	19,98	15,59	19,41	14,74

Em termos médios, o deflúvio de base na área de recarga da nascente L1 foi de 625 mm/ano e sua participação no volume precipitado foi de 33%, já na área de recarga da nascente M1 o deflúvio de base foi de 219 mm/ano e sua relação Db/P igual a 17,6%.

O IQR_{RA} mostrou-se sensível às diferenças entre as áreas de recarga das nascentes, principalmente com relação aos atributos físico-hídricos, pois a área de recarga que apresentou os maiores deflúvios de base e sua relação Db/P, foi também o que apresentou o maior valor de IQR_{RA} (TABELA 4). Resultados semelhantes foram alcançados por Alvarenga et al. (2012), trabalhando com bacias hidrográficas do Alto Rio Grande, cujos solos predominantes eram o Cambissolo e Latossolo.

Tabela 4 Valores médios anuais dos indicadores hidrológicos das áreas de recargas das nascentes L1 e M1 utilizados na validação do IQR_{RA}

	Área de recarga das nascentes	
	L1	M1
IQR_{SA}	0,420	0,376
P (mm/ano)	1895	1248
Db (mm/ano)	625	219
Db/P	0,330	0,176

Nas Figuras 6 e 7, são apresentados os mapas de IQR_{RA} para a camada 0 – 20 cm nas áreas de recargas das nascentes L1 e M1 gerados a partir do modelo proposto por Alvarenga et al. (2012), trabalhando com bacias hidrográficas de grande porte. Ao se analisar os mapas de IQR_{SA} nota-se que os valores foram maiores do que os valores obtidos de IQR_{SA} quando se incorpora o indicador matéria orgânica, índices topográficos e se consideram as variações dos valores dos atributos físico-hídricos no perfil do solo.

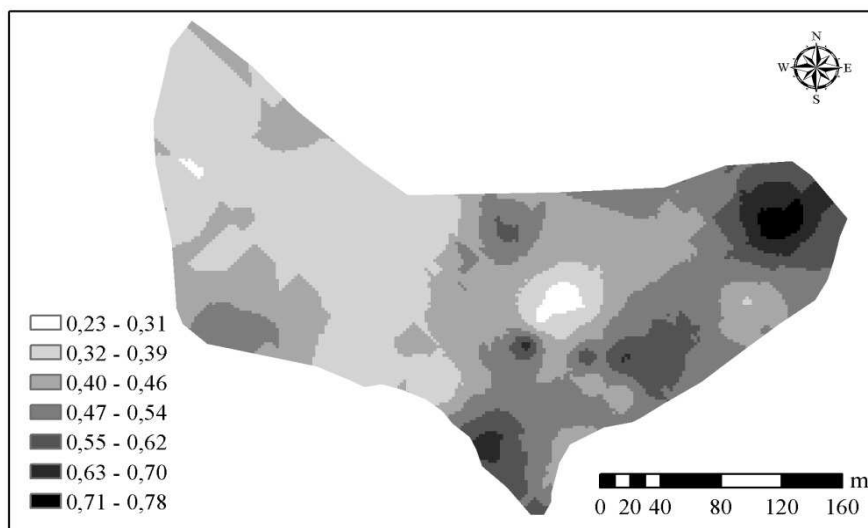


Figura 6 Distribuição espacial do IQS_{RA} na camada 0 – 20 cm para a área de recarga da nascente L1

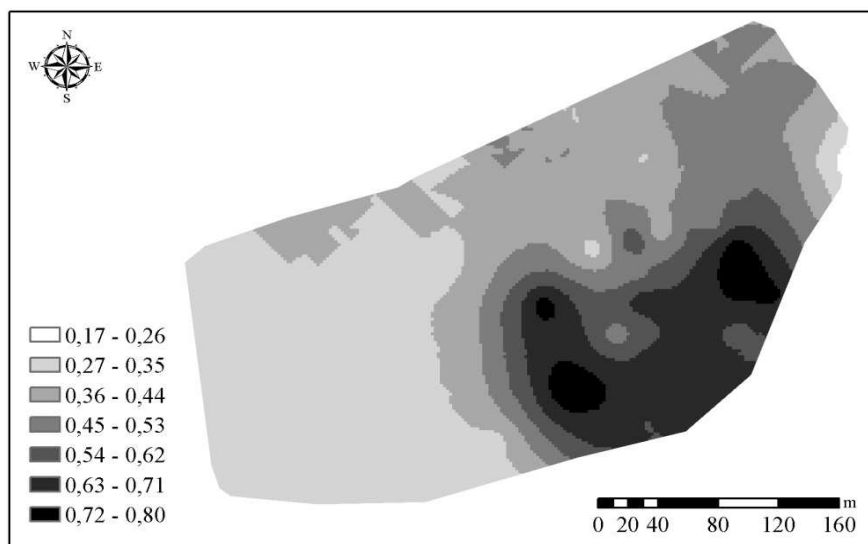


Figura 7 Distribuição espacial do IQS_{RA} na camada 0 – 20 cm para a área de recarga da nascente M1

Embora o IQR_{SA} proposto por Alvarenga et al. (2012) tenha sido desenvolvido para bacias hidrográficas de grande porte, quando aplicado em áreas de recargas de nascentes, mostrou-se eficiente, fato comprovado quando analisamos os dados da Tabela 5.

Tabela 5 Valores médios IQR_{RA} para as áreas de recargas das nascentes L1 e M1

Nascentes	L1	M1
$IQR_{SA(0-20\text{ cm})}$ *	0,465	0,418
$IQR_{SA(0-100\text{ cm})}$ **	0,420	0,376
$IQR_{SA(0-20\text{ cm})}/IQR_{SA(0-100\text{ cm})}$	1,11	1,11

*(ALVARENGA, 2011). ** Proposto por este trabalho.

Além dos valores médios dos IQR_{SA} obtidos para as duas áreas de recargas apresentarem valores relativamente próximos, a relação entre eles é a mesma, sinalizando que a nova estruturação proposta apresenta boa consistência.

Vale ressaltar que a nova estruturação do IQR_{SA} com a incorporação dos indicadores, MO, índices topográficos (IT1 e IT2) e dados do perfil do solo, proporcionou maior confiabilidade ao IQR_{SA} . O teor de MO do solo tem relação direta com os atributos físico-hídricos e o relevo mostra a facilidade ou não para que a água consiga sofrer o processo de infiltração e recarregar o lençol freático.

4 CONCLUSÃO

- a) O índice de qualidade do solo para recarga (IQS_{RA}) mostrou-se eficiente como indicador ambiental de geração de deflúvio de base pelas áreas de recargas das nascentes e o processo de validação comprovou sua eficácia.
- b) A área de recarga que apresentou os maiores valores de deflúvio de base e sua participação na precipitação (área de recarga da nascente L1), apresentou os maiores valores do IQR_{SA} .

REFERÊNCIAS

ALVARENGA, C. C. et al. Índice de qualidade do solo associado à recarga de água subterrânea (IQS_{RA}) na bacia hidrográfica do alto rio grande, MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 5, p. 1608–1619, 2012.

ALVARENGA, C. C. **Indicadores hidrológicos do solo para identificação de áreas potenciais de recarga subterrânea**. 2010. 81 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.

ANDREWS, S. S.; KARLEN, D. L.; CAMBARDELLA, C. A. The soil management assessment framework: a quantitative soil quality evaluation method. **Soil Science Society of America Journal**, Washington, v. 68, p. 1945-1962, 2004.

ARAÚJO, A. R. de. **Solos da bacia do Alto Rio Grande, MG: base para estudos hidrológicos e aptidão agrícola**. 2006. 345 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2006.

ARAÚJO, E. et al. Qualidade do solo: conceitos, indicadores e avaliação. **Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia**, Guarapuava, v. 5, n. 1, p. 187-206, jan./abr. 2012.

CAMARINHA, P. I. M. **Mapeamento do potencial de infiltração como subsídio ao planejamento de microbacias de cabeceira: uma proposta metodológica VII Congresso de Médio Ambiente /AUGM 15 utilizando geotecnologias**. 2011. 120 p. Dissertação (Mestrado Universidade Estadual Paulista) – Universidade Estadual de São Paulo, Bauru, 2011.

CAMPOS, S. R. S. et al. Banco de dados. In: SCOLFORO, J. R.; CARVALHO, L. M. T.; OLIVEIRA, A. D. (Ed.). **Zoneamento ecológico-econômico do Estado de Minas Gerais**. Lavras: Editora da UFLA, 2008. p. 43-72.

CHAER, G. M. **Modelo para determinação de índice de qualidade do solo baseado em indicadores físicos, químicos e microbiológicos**. 2001. 89 p. Dissertação (Mestrado em Microbiologia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2001.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Quantitative indicators of soil quality: a minimum data set. In: DORAN, J. W.; JONES, A. J. (Ed.). **Methods for assessing soil quality**. Wisconsin: Soil Science Society American, 1996. p. 25-37. (Special Publication, 49).

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro. 2. ed. rev. atual. Rio de Janeiro: Embrapa, 1997.

ERKOSSA, T.; ITANNA, F.; STAHR, K. Indexing soil quality: a new paradigm in soil science research. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 45, n. 2, p. 129-137, May 2007.

GLOVER, J. D.; REGANOLD, J. P.; ANDREWS, P. K. Systematic method for rating soil quality of conventional, organic, and integrated apple orchards in Washington State. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 80, n. 1-2, p. 29-45, Aug. 2000.

HJERDT, K. N. et al. A new topographic index to quantify downslope controls on local drainage. **Water Resources Research**, Washington, v. 40, p. 01-06, May 2004.

ISLAM, K.R.; WEIL, R. R. Land use effects on soil quality in a tropical forest ecosystem of Bangladesh. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, London, v. 79, n. 1, p. 9-16, June 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.

KARLEN, D. L. et al. Soil quality: a concept, definition and framework for evaluation. **Soil Science Society of America Journal**, Elmsford, v. 61, n. 1, p. 4-10, Jan. 1997.

KARLEN, D. L.; STOTT, D. A framework for evaluating physical and chemical indicators. In: DORAN, J. W. et al. (Ed.). **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison: Soil Science Society American, 1994. Cap. 4, p. 53-72. (Special Publication, 35).

KARLEN, D. L.; STOTT, D. E. A framework for evaluating physical and chemical indicators of soil quality. In: DORAN, J. W. et al. (Ed.). **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison: Soil Science Society of America, 1994. p. 53-72. (SSSA Special Publication, 35).

LIMA, G. C. et al. Estimativa do potencial de recarga na sub-bacia das Posses, Extrema (MG), em função dos atributos fisiográficos, pedológicos e topográficos. **Geociência**, São Paulo, v. 32, n.1, p. 51-62, maio 2013.

MELO FILHO, J. F.; SOUZA, A. L. V.; SOUZA, L. S. Determinação do índice de qualidade subsuperficial em um Latossolo Amarelo Coeso dos Tabuleiros Costeiros, sob floresta natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 6, p. 1599-1608, abr. 2007.

MELO NETO, J. O. M. **Análise de sensibilidade escalar do modelo hidrológico SWAT**. 2012. 149 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2013.

MENEZES, M. D. et al. Dinâmica hidrológica de duas nascentes, associada ao uso do solo, características pedológicas e atributos físico-hídricos na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha – Serra da Mantiqueira (MG). **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 37, n. 82, p. 175-184, jun. 2009.

MENEZES, M. D. **Levantamento pedológico de hortos florestais e mapeamento digital de atributos físicos do solo para estudos hidrológicos**. 2011. 225 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.

SINGER, M. J.; EWING, S. S. Soil quality. In: SUMMER, M. E. (Ed.). **Handbook of soil science**. Georgia: University of Georgia, 1999. p. 271-298.

SNAKIN, V. V. et al. The system of assessment of soil degradation. **Soil Technology**, Amsterdam, v. 8, n. 4, p. 331-343, Mar. 1996.

WOODS, R. A.; SIVAPALAN, M.; ROBINSON, J. S. Modeling the spatial variability of subsurface runoff using a topographic index. **Water Resources Research**, v. 33, n. 5, p. 1061–1073, May 1997.

WYMORE, A. W. **Model-based systems engineering: an introduction to the mathematical theory of discrete systems and to the tricotyledon theory of system design**. Boca Raton: CRC Press, 1993.