



Revista Brasileira de Ciência do Solo

ISSN: 0100-0683

revista@sbc.org.br

Sociedade Brasileira de Ciência do Solo  
Brasil

Alvarenga, Camila Cristina; de Mello, Carlos Rogério; de Mello, José Marcio; da Silva, Antônio  
Marciano; Curi, Nilton  
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, vol. 36, núm. 5, outubro-noviembre, 2012, pp. 1608-1619  
Sociedade Brasileira de Ciência do Solo  
Viçosa, Brasil

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=180224890025>

- Como citar este artigo
- Número completo
- Mais artigos
- Home da revista no Redalyc

redalyc.org

Sistema de Informação Científica  
Rede de Revistas Científicas da América Latina, Caribe, Espanha e Portugal  
Projeto acadêmico sem fins lucrativos desenvolvido no âmbito da iniciativa Acesso Aberto

# **ÍNDICE DE QUALIDADE DO SOLO ASSOCIADO À RECARGA DE ÁGUA SUBTERRÂNEA ( $IQS_{RA}$ ) NA BACIA HIDROGRÁFICA DO ALTO RIO GRANDE, MG<sup>(1)</sup>**

**Camila Cristina Alvarenga<sup>(2)</sup>, Carlos Rogério de Mello<sup>(3)</sup>, José Marcio de Mello<sup>(4)</sup>, Antônio Marciano da Silva<sup>(5)</sup> & Nilton Curi<sup>(6)</sup>**

## **RESUMO**

A proposição de índices de qualidade do solo tem crescido de forma considerável nos últimos anos para análises de sustentabilidade ambiental e da produção agrícola. No entanto, não há, nas condições brasileiras, o desenvolvimento de qualquer indicador de qualidade do solo vinculado à recarga de água subterrânea. O objetivo deste estudo foi gerar um índice de qualidade do solo, relacionado à recarga de água subterrânea ( $IQS_{RA}$ ), válido para as condições da Bacia Hidrográfica do Alto Rio Grande e proceder a seu mapeamento por meio de técnicas geoestatísticas. O  $IQS_{RA}$  proposto é uma combinação linear de três indicadores relacionados à infiltração de água no solo: densidade do solo, condutividade hidráulica saturada e macroporosidade. Para sua validação, foi considerada a participação do deflúvio base (ou subterrâneo) no deflúvio total para quatro sub-bacias da Bacia Hidrográfica do Alto Rio Grande, analisando o comportamento desses indicadores hidrológicos tendo-se como referência a distribuição espacial do  $IQS_{RA}$ . O índice gerado mostrou-se uma ferramenta importante para avaliação do potencial do solo para recarga de água subterrânea, uma vez que ele reflete a influência dos usos da terra no comportamento do deflúvio base e, conseqüentemente, na dinâmica da produção de água pelas sub-bacias.

**Termos de indexação:** produção de água, hidrologia do solo, uso da terra, mapeamento.

---

<sup>(1)</sup> Parte da Dissertação de Mestrado da primeira autora apresentada à Universidade Federal de Lavras - UFLA, para obtenção do título de mestre em Engenharia Agrícola (Engenharia de Água e Solo). Com apoio da FAPEMIG (PPM-VI 068/2012). Recebido para publicação em 31 de outubro de 2011 e aprovado em 26 de julho de 2012.

<sup>(2)</sup> Engenheira Agrícola, Mestre, PPGRH/UFLA, DEG/UFLA, Caixa Postal 3037 CEP 37200-000 Lavras (MG). Email: camilaalvarenga@uol.com.br

<sup>(3)</sup> Professor Adjunto, DEG/UFLA. Bolsista CNPq. E-mail: crmello@deg.ufla.br

<sup>(4)</sup> Professor Associado, DCF/UFLA. Bolsista CNPq. E-mail: josemarcio@dcf.ufla.br

<sup>(5)</sup> Professor Titular, DEG/UFLA. Bolsista CNPq. E-mail: marciano@deg.ufla.br

<sup>(6)</sup> Professor Titular, DCS/UFLA. Bolsista CNPq. E-mail: niltcuri@dcs.ufla.br

**SUMMARY: SOIL QUALITY INDEX ASSOCIATED TO THE GROUNDWATER RECHARGE (SQI<sub>GR</sub>) IN THE UPPER RIO GRANDE BASIN, MINAS GERAIS**

*In the last years, soil quality indexes for analyses of the environmental sustainability and agricultural production have been proposed in increasing numbers. However, none of these indexes is related to the groundwater recharge soil quality index for conditions in Brazil. The objective of this study was to generate a soil quality index related to the groundwater recharge (SQI<sub>GR</sub>) of the physiographical conditions of the Upper Rio Grande Basin and to draw a map of SQI<sub>GR</sub> using geostatistical procedures. The proposed SQI<sub>GR</sub> consists of a linear combination of three properties related to water infiltration into the soil: bulk density, saturated hydraulic conductivity and macroporosity. To validate the index, the participation of the base flow in the total flow of four sub-basins of the Upper Rio Grande Basin was considered, analyzing the behavior of this hydrologic indicator taking the spatial distribution of SQI<sub>GR</sub> as reference. This validation process indicated the importance of SQI<sub>RG</sub> as tool to evaluate the groundwater recharge potential since it reflects the influence of different land uses on the base flow behavior and, consequently, on water yield from sub-basins.*

*Index terms: water yield, soil hydrology, land use, mapping.*

## INTRODUÇÃO

No começo da década de 1990, a comunidade científica, consciente da importância do solo para a qualidade ambiental e para a sustentabilidade agrícola, iniciou a abordagem sobre qualidade do solo. A maioria dos estudos concentra-se na identificação de um índice que possa ser aplicável como indicador de qualidade do solo, assim como há indicadores para a qualidade do ar e da água, a fim de auxiliar na avaliação dos solos em relação à degradação ambiental e julgar as práticas de manejo utilizadas (Melo Filho et al., 2007; Vezzani & Mielniczuk, 2009).

Na literatura encontram-se índices propostos para avaliar a qualidade do solo que consideram a integração dos atributos do solo com a paisagem, obtendo índices normalizados conforme as funções consideradas relevantes para o local e o objetivo do estudo (Karlen et al., 1994; Karlen & Stott, 1994) e, ainda, com a possibilidade de gerar mapas desses índices. Há alguns trabalhos que geraram índices para inferência sobre o potencial de recarga de água subterrânea aplicando apenas indicadores da paisagem, como relevo, características pedológicas e material de origem (Araújo, 2006). Entretanto, esses índices não captam a influência do uso do solo nos atributos de superfície associados à infiltração de água, o que, em condições tropicais e subtropicais, são mais relevantes do que indicadores baseados apenas da paisagem. Um exemplo fundamental dessa situação consiste da influência de matas nativas no comportamento hidrológico de bacias hidrográficas de cabeceira (Bonell et al., 2010; Roa-Garcia et al., 2011). Nessa linha, Menezes et al. (2009) buscaram analisar o comportamento hidrológico de duas nascentes em função das características pedológicas do Cambissolo na região da Serra da Mantiqueira. Ambas as nascentes possuem as mesmas características

geomorfológicas, e apenas o uso do solo é diferente, sendo uma com área de recarga associada à pastagem para pecuária extensiva e outra inteiramente ocupada por Mata Atlântica. Esses autores constataram que a nascente sob Mata Atlântica tem produção de água significativa e proporcionalmente superior àquela sob pastagem, indicando a melhor qualidade dos atributos hidrológicos do solo na mata nativa. Dessa forma, a proposição de um índice com o objetivo de identificar áreas com potencial para recarga deve contemplar atributos mais específicos, associados à infiltração de água no solo, para que se possa captar as condições de superfície muito influenciadas pelo manejo e uso do solo.

Dependendo da função para a qual o índice de qualidade do solo está sendo gerado, uma extensa lista de atributos do solo pode ser empregada. Por isso, para avaliação de determinadas funções, é preciso selecionar atributos que, de alguma maneira: influenciam a função para a qual estão sendo avaliados; sejam mensuráveis e comparados a padrões definidos; e sejam sensíveis para detectar diferenças em escala espacial e, ou, temporal (Karlen et al., 1997).

Entre os métodos mais utilizados para determinação do índice de qualidade do solo, destaca-se o proposto por Karlen & Stott (1994). Esse método apresenta uma estrutura de cálculo na qual as funções principais e seus respectivos indicadores são selecionados e ponderados de acordo com o grau de importância para a determinação do índice. Esses pesquisadores sugeriram a utilização de um modelo desenvolvido por Wymore (1993) para normalização dos indicadores, gerando uma escala de 0 a 1, significando que, quanto mais próximo de 1, maior a qualidade do solo vinculada ao aspecto em análise.

Segundo Melo Filho et al. (2007), a grande quantidade de informação sobre indicadores de

qualidade do solo na literatura refere-se, principalmente, às condições de clima temperado. Para condições tropicais e subtropicais não há uma seleção específica de indicadores de qualidade do solo, especialmente daqueles associados à hidrologia do solo e adequados ao posterior mapeamento do índice de qualidade do solo resultante em escala de bacia hidrográfica.

A geoestatística vem sendo aplicada à ciência do solo para conhecer a variabilidade espacial de atributos físicos e químicos com o objetivo de gerar ferramentas (mapas) capazes de apoiar tomadas de decisão, especialmente como subsídio à agricultura de precisão e análises ambientais no tocante ao mapeamento de áreas de risco à erosão hídrica (Beskow et al., 2009). Assim, o mapeamento de um índice de qualidade de solo voltado para as condições de infiltração de água no solo e, conseqüentemente, de recarga de água subterrânea constitui-se numa ferramenta ímpar para o manejo sustentável de bacias hidrográficas, permitindo melhor orientação quanto à utilização de práticas conservacionistas e ao uso do solo.

Nesse contexto, este trabalho propõe gerar e mapear um índice de qualidade do solo associado à recarga de água subterrânea ( $IQS_{RA}$ ) na Bacia Hidrográfica do Alto Rio Grande, permitindo inferir sobre o solo e seu uso no contexto da sustentabilidade natural dos recursos naturais solo e água.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Caracterização geral da Bacia Hidrográfica do Alto Rio Grande, MG

A Bacia Hidrográfica do Alto Rio Grande, localizada no sul e sudeste do Estado de Minas Gerais, possui área de drenagem de aproximadamente 6.270 km<sup>2</sup>. É constituída por zonas fisiográficas importantes do ponto de vista de “produção de água”, notadamente, Campo das Vertentes e Serra da Mantiqueira. O clima é do tipo Cwa em grande parte da bacia e Cwb na sua cabeceira, conforme Köppen (Mello et al., 2012). Seu relevo é ondulado, apresentando declividade superior a 15 % em aproximadamente 90 % da área da bacia. A classe de solo predominante é o Cambissolo, que ocupa aproximadamente 68 % da área, seguida pelo Latossolo, com 18 % (Figura 1a). O uso do solo (Figura 1b) inclui pastagens para pecuária extensiva (29 %), áreas cultivadas (28 %), cerrado nativo (21 %), florestas nativas, especialmente Mata Atlântica (13 %), e solo exposto (8 %).

As análises da distribuição espacial do  $IQS_{RA}$  foram conduzidas nas sub-bacias hidrográficas dos rios Grande (seção fluviométrica “Madre de Deus de Minas”, com área de drenagem de 2.080 km<sup>2</sup>) e Aiuruoca (seção fluviométrica “Fazenda Laranjeiras”, com área de drenagem de 2.075 km<sup>2</sup>) e nas sub-bacias hidrográficas dos ribeirões Jaguará (região fisiográfica

“Campos das Vertentes”, com área de drenagem de 32 km<sup>2</sup>) e Lavrinha (região fisiográfica “Serra da Mantiqueira”, com área de drenagem de 6,87 km<sup>2</sup>). Na figura 2 estão apresentados os mapas de solos (coluna à esquerda) e de uso do solo (coluna à direita), para todas as sub-bacias hidrográficas, ambos desenvolvidos no ano de 2008.

### Índice de qualidade do solo associado à recarga de água subterrânea ( $IQS_{RA}$ )

Amostras de solo deformadas e indeformadas foram coletadas, entre abril e julho de 2008, na camada superficial do solo (0-0,20 m), em 537 pontos distribuídos na Bacia Hidrográfica do Alto Rio Grande, para caracterização da macroporosidade e densidade do solo, uma vez que esses atributos constituem potenciais indicadores hidrológicos do solo, sendo alterados pelo manejo do mesmo e de fácil determinação laboratorial. Além desses, a condutividade hidráulica saturada consiste de um indicador fundamental para os estudos vinculados à recarga de água subterrânea, e esta foi caracterizada em condições de campo nos 537 pontos de coleta de solo. Este indicador hidrológico do solo reflete as condições de permeabilidade do meio, não ficando confinado somente aos primeiros 0,20 m de camada do solo, haja vista o deslocamento da frente de molhamento e sua estabilização durante o teste. Na figura 3 são apresentados os pontos amostrados e a localização das sub-bacias hidrográficas dos rios Grande (seção fluviométrica “Madre de Deus de Minas”) e Aiuruoca (seção fluviométrica “Fazenda Laranjeiras”) e dos ribeirões Jaguará (Campos das Vertentes) e Lavrinha (Serra da Mantiqueira).

Para determinação do  $IQS_{RA}$  foram considerados os três indicadores mencionados, todos intimamente associados à infiltração de água e influenciados pelo uso e manejo do solo. A condutividade hidráulica saturada do solo ( $k_0$ ) foi determinada *in situ* por meio de infiltrômetro de disco (modelo 2825K1), associado aos acessórios do Permeômetro de Guelph de carga constante (“Soil Moisture”, modelo 2800K1), seguindo o princípio do frasco Mariotte. Em cada ponto amostral, as cargas hidráulicas foram fixadas em 0,05 e 0,10 mca, com respectivas leituras de infiltração realizadas em intervalos de tempo constantes e iguais a 2 min até que estas ficassem constantes para ambas as cargas, gerando a condição de saturação do perfil do solo, uma vez que o sistema entra em equilíbrio, com a velocidade de percolação da água no solo igualando-se à velocidade de saída da água do permeômetro. Vários trabalhos com o intuito de mapear a condutividade hidráulica saturada do solo, em diferentes condições, têm sido desenvolvidos com esse tipo de equipamento, gerando resultados importantes em nível de bacia hidrográfica, como os de Junqueira Junior et al. (2008) e Alvarenga et al. (2011).

A densidade do solo foi obtida pelo método do anel volumétrico (Embrapa, 1997), e a macroporosidade,

com base na diferença entre a porosidade total, a qual depende da relação entre a densidade do solo e a densidade de partículas (Embrapa, 1997), e a microporosidade, que corresponde à umidade do solo sob potencial matricial de -6 kPa (Embrapa, 1997). O uso da macroporosidade como indicador associado à recarga está associado ao fato de que este atributo hidrológico do solo é de fácil determinação laboratorial e fundamental para o controle e o fluxo de água no solo, aproximando-se fisicamente da porosidade drenável, a qual, apesar de mais precisa nesse contexto, apresenta dificuldades práticas importantes associadas à sua determinação, especialmente a umidade do solo na capacidade de campo em condições de campo propriamente ditas. Para geração do índice de qualidade do solo, em cada ponto amostrado, este trabalho utilizou uma modificação do modelo proposto por Karlen & Stott (1994):

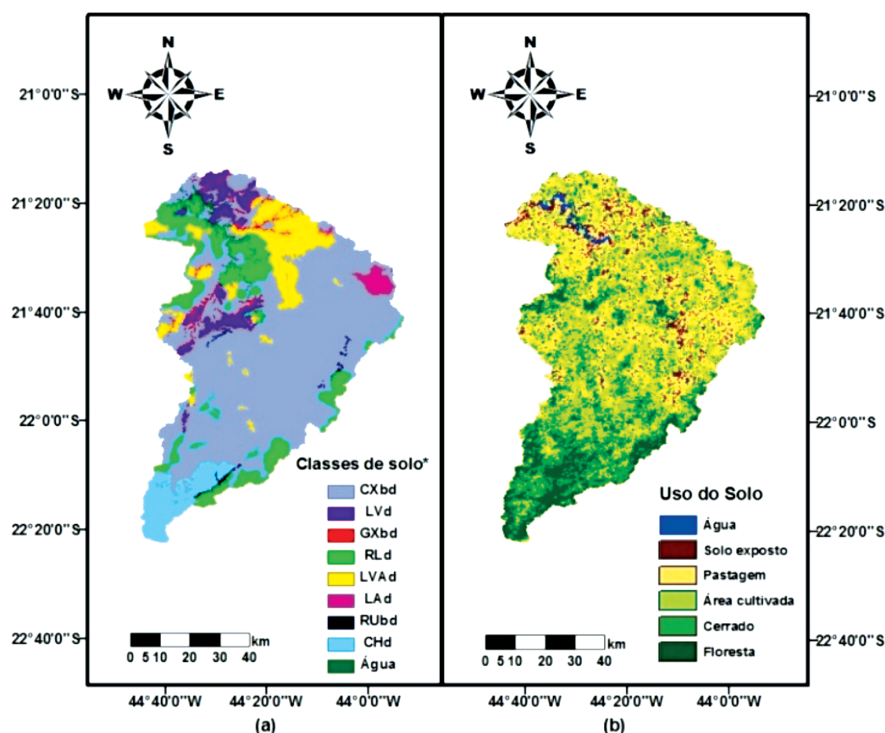
$$IQS_{RA} = I_{DS} \cdot 0,25 + I_{ko} \cdot 0,40 + I_{\mu} \cdot 0,35 \quad (1)$$

em que IQS<sub>RA</sub> é o índice de qualidade do solo relacionado com a recarga de água; e  $I_{DS}$ ,  $I_{ko}$  e  $I_{\mu}$  são os indicadores densidade do solo, condutividade hidráulica saturada e macroporosidade, respectivamente, normalizados e multiplicados pelos seus respectivos pesos.

O peso de cada indicador foi atribuído de acordo com a função que eles exercem no processo de

infiltração de água no solo e, consequentemente, na recarga de água, e sua soma deve ser igual a 1. Como o processo de infiltração de água no solo é fortemente regido pelas características de permeabilidade do solo, elegeu-se a condutividade hidráulica saturada e a macroporosidade como as variáveis de maior peso (40 e 35 %, respectivamente). A densidade do solo, embora seja importante no tocante à compactação do solo, influenciando os demais indicadores, recebeu o menor peso (25 %), pois, diferentemente dos anteriores, trata-se de um indicador indireto das condições de infiltração propriamente ditas. Quando o solo apresenta limitações para a recarga de água, o valor do índice de qualidade será baixo; caso contrário, se o solo apresenta capacidade elevada para recarga de água, seu valor será alto.

Anteriormente à determinação do IQS<sub>RA</sub> foi realizada a normalização dos indicadores, devido ao fato de que estes apresentam tanto unidades de medida quanto funções probabilísticas distintas. Para isso, a função de pontuação normalizada, sugerida por Karlen & Stott (1994) e desenvolvida por Wymore (1993), foi aplicada para obtenção de valores normalizados dos indicadores, consistindo de uma função probabilística com três parâmetros (B, L e S), os quais dependem das características dos dados levantados em campo:



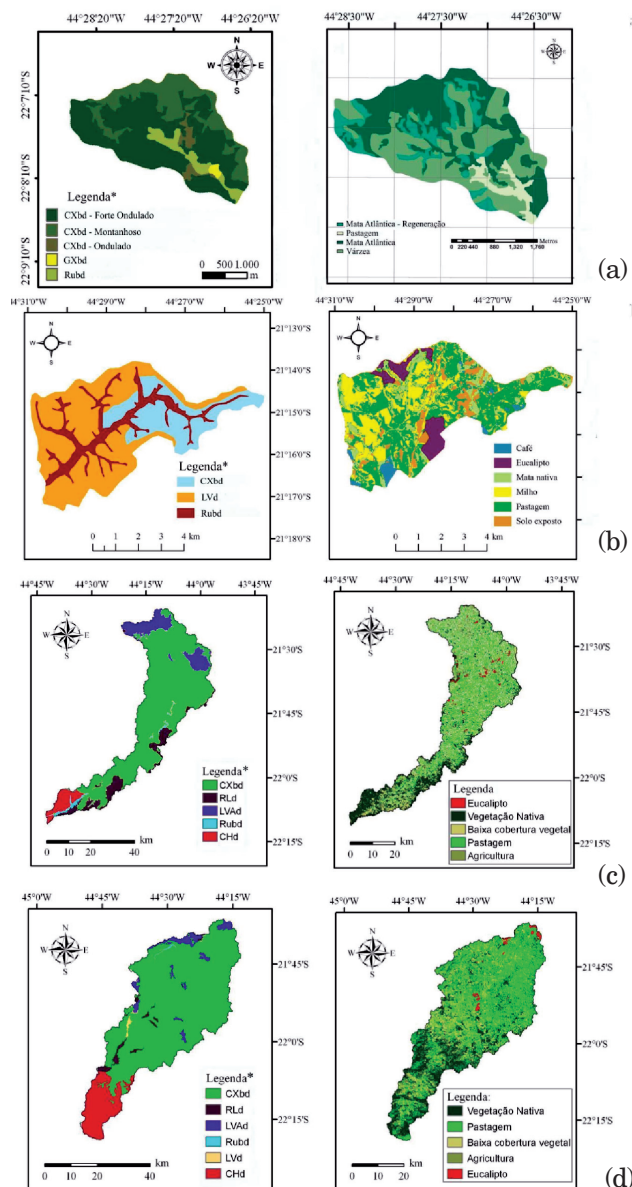
\*CXbd: Cambissolo Háplico Tb distrófico; LVd: Latossolo Vermelho distrófico típico; GXbd: Gleissolo Háplico Tb distrófico; RLd: Neossolo Litólico distrófico típico; LVA d: Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico típico; LA d: Latossolo Amarelo distrófico típico; RUBd: Neossolo Flúvico Tb distrófico típico; CHd: Cambissolo Húmico distrófico típico.

**Figura 1. Mapas de solos (a) e uso do solo (b) da Bacia Hidrográfica do Alto Rio Grande, MG. Adaptados de Araújo (2006) e Beskow et al. (2009).**



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

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



**Figura 2.** Mapas de solos (coluna à esquerda) e de uso dos solos (coluna à direita) para as sub-bacias hidrográficas dos ribeirões Lavrinha (a) e Jaguará (b) e rios Grande (c) e Aiuruoca (d). Adaptadas, respectivamente, de Beskow et al. (2009), Pinto (2011) e Viola (2011). \* ver legenda da figura 1.

Para a construção das curvas de normalização, foi considerado o valor de  $B$  como a média do respectivo indicador e o valor de  $L$  como o menor valor observado para o indicador. O valor de  $S$  para cada curva foi determinado igualando-se a derivada segunda da equação 2 a zero, considerando  $v = 0,5$  e  $x = B$ . Curvas do tipo “mais é melhor” foram ajustadas para os indicadores condutividade hidráulica saturada e macroporosidade, enquanto para o indicador densidade do solo uma curva do tipo “menos é melhor” foi ajustada (Karlen & Stott, 1994; Glover et al., 2000).

### Mapeamento do índice de qualidade do solo associado à recarga de água subterrânea ( $IQS_{RA}$ ) na Bacia Hidrográfica do Alto Rio Grande

Para proceder ao mapeamento do  $IQS_{RA}$  na Bacia Hidrográfica do Alto Rio Grande, foram aplicados procedimentos da geoestatística, começando com a análise exploratória dos dados. A modelagem da continuidade espacial empregou a função semivariograma. Uma vez determinado o semivariograma experimental, foram ajustados a ele modelos teóricos de semivariograma, com destaque para os esférico, exponencial e gaussiano. Além disso, um estudo prévio do comportamento do semivariograma nas direções 0, 45, 90 e 135° foi conduzido a fim de se avaliar a existência de anisotropia, a qual não foi constatada. A escolha do melhor modelo, que posteriormente foi aplicado ao mapeamento do  $IQS_{RA}$  por krigagem ordinária, foi feita com base em validação preditiva, para a qual um conjunto de 100 valores, diferentes daqueles utilizados no ajuste do modelo espacial, foi aplicado. A variância de krigagem e o erro médio reduzido foram analisados para seleção do melhor ajuste, assim como o grau de dependência espacial (Gomes et al., 2007). Todas as análises e procedimentos geoestatísticos foram desenvolvidos pelo programa R, utilizando-se o pacote GeoR, com o mapeamento tendo sido produzido pelo programa ArcMap (ESRI, 2004), mantendo-se os parâmetros do semivariograma obtidos anteriormente.

Para avaliar o comportamento do  $IQS_{RA}$  nas sub-bacias hidrográficas de menor porte, objetivando caracterizar zonas fisiográficas mais importantes (Campo das Vertentes e Serra da Mantiqueira), foram conduzidos os mesmos estudos geoestatísticos anteriores, proporcionando mapas do índice específicos para as sub-bacias dos ribeirões Jaguará e Lavrinha (Figura 3).

### Validação do $IQS_{RA}$ como indicador de áreas de recarga de água subterrânea

Para este procedimento, foram utilizados dados de monitoramento hidrológico e climático para todas as sub-bacias hidrográficas, sendo os dos ribeirões Lavrinha e Jaguará obtidos por monitoramento conduzido pelo Grupo de Pesquisas em Recursos Hídricos da Universidade Federal de Lavras, dispondo-

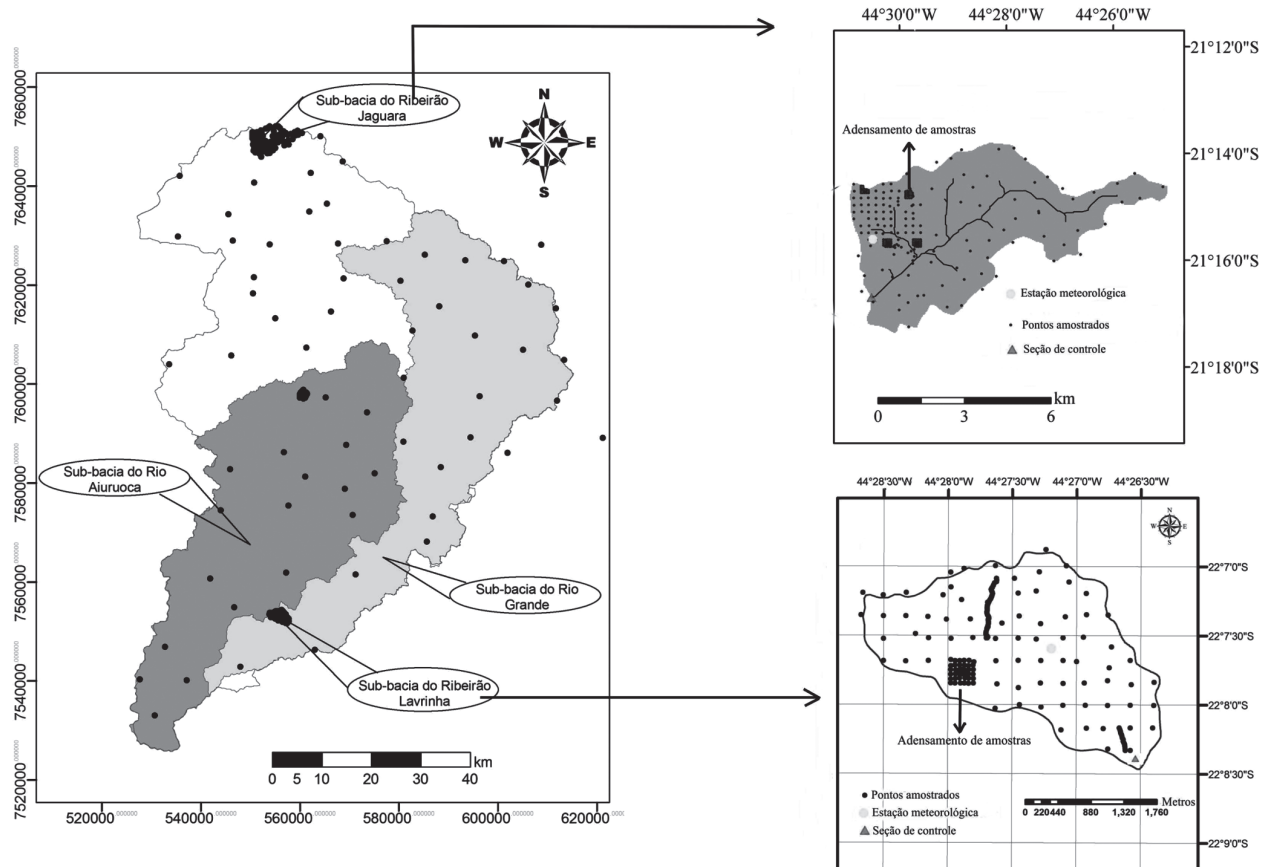
se de dados disponíveis no período entre 2006 e 2010. Para as sub-bacias dos rios Grande e Aiuruoca, foram utilizados dados de vazão disponibilizados pelo Plano Diretor da Bacia Hidrográfica do Rio Grande, cuja fonte detentora dos dados é a Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), com série histórica entre 1993 e 2011. É importante ressaltar que, como os dados físico-hídricos do solo foram obtidos no final do ano hidrológico 2007-2008, sua influência foi especialmente captada nas condições de escoamento (deflúvio) subterrâneo do citado ano hidrológico, podendo influenciar também no comportamento hidrológico do ano 2008/2009. Assim, foi analisado o comportamento hidrológico das sub-bacias hidrográficas mencionadas, relativo aos anos hidrológicos de 2007/2008 e 2008/2009, considerando o início do ano hidrológico em setembro de um ano e o término em agosto do ano seguinte.

Os indicadores hidrológicos analisados (valores médios) estão associados ao deflúvio total e à parcela deste que é constituída pelo deflúvio base (ou subterrâneo). Os dados foram trabalhados calculando-se a vazão média mensal a partir de dados diários, convertendo-a em deflúvio, em mm, considerando-se as respectivas áreas de drenagem, para fins de

comparação entre as sub-bacias hidrográficas. Na sequência, o deflúvio subterrâneo foi separado do superficial direto considerando-se o comportamento exponencial do primeiro, após identificação dos pontos de inflexão nas hidrógrafas (Hümann et al., 2011). Esse processo metodológico permite avaliar as condições de armazenagem de água subterrânea nos aquíferos superficiais, os quais interagem com a drenagem superficial e, conseqüentemente, estão vinculados ao processo de recarga subterrânea, caracterizando o estoque de água armazenada no período chuvoso. Dessa forma, entende-se que, quanto maior o valor de IQS<sub>RA</sub>, maior será a proporção do deflúvio subterrâneo em relação ao deflúvio total, significando melhores condições para infiltração de água no solo e para recarga subterrânea na referida área de drenagem (Price, 2011).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Normalização dos indicadores do IQS<sub>RA</sub> para a Bacia Hidrográfica do Alto Rio Grande



**Figura 3. Pontos amostrados e localização das sub-bacias hidrográficas estudadas na Bacia Hidrográfica do Alto Rio Grande, MG.**

Os parâmetros para construção das curvas de normalização para cada indicador que compõe o  $IQS_{RA}$  estão apresentados no quadro 1, assim como dados básicos associados à média, coeficiente de variação e valores máximo e mínimo obtidos para cada indicador.

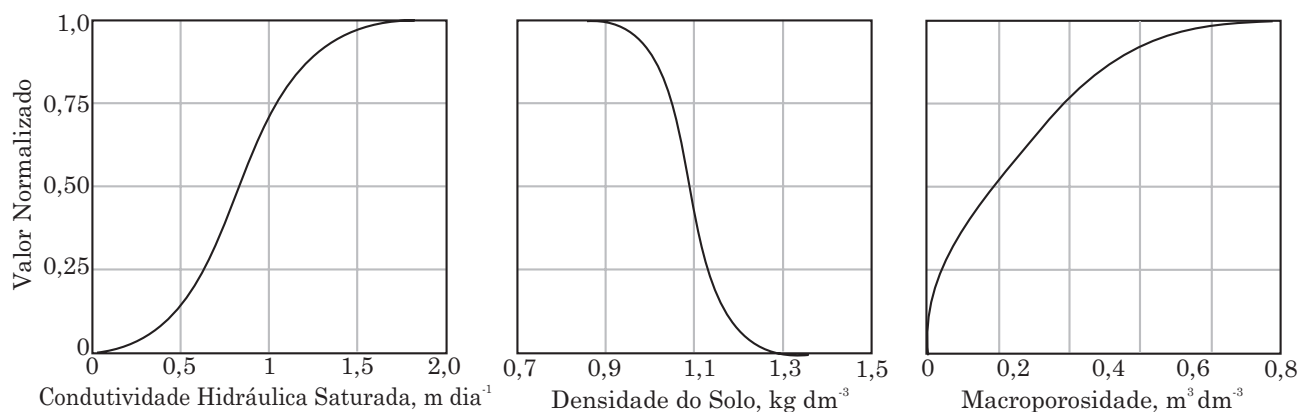
A curva de valores normalizados do tipo “menos é melhor”, aplicada ao indicador densidade do solo, e as curvas do tipo “mais é melhor”, aplicadas aos indicadores macroporosidade e condutividade hidráulica saturada, estão apresentadas na figura 4. É importante destacar que as curvas apresentadas na referida figura foram construídas a partir da caracterização dos parâmetros da função probabilística de normalização (equação 2), estimando-se valores de  $\nu$  para valores crescentes de  $x$  até que o intervalo entre 0 e 1 fosse preenchido. A partir delas, os valores obtidos em campo foram associados a um valor normalizado  $\nu$  e aplicados no cálculo do  $IQS_{RA}$ . Observa-se que a forma das curvas (meio sino), de valores normalizados dos indicadores condutividade hidráulica saturada e densidade do solo, apresentou comportamento similar ao daquelas obtidas nos trabalhos de Karlen & Stott (1994) e Glover et al. (2000). O valor normalizado igual a 1 corresponde a qualquer valor de condutividade hidráulica saturada superior a  $1,5 \text{ m dia}^{-1}$  e de densidade do solo inferior a  $0,90 \text{ kg dm}^{-3}$ . Entretanto, a curva ajustada para o indicador macroporosidade não evidenciou esse mesmo formato. Observa-se que,

para que o valor normalizado seja próximo de 1, a macroporosidade deverá ser superior a  $0,80 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  e, na base de dados trabalhada, o valor máximo obtido foi igual a  $0,51 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  (Quadro 1), cujo valor normalizado é 0,832. Contudo, essa situação não gera discrepância em relação aos demais indicadores, uma vez que no processo de normalização a modelagem dessa função é desenvolvida aplicando-se especificamente a base de dados do indicador, vinculando-o às características estatísticas (probabilísticas) de sua própria amostra.

Destaca-se a importância da obtenção dos parâmetros L, B e S para solos de regiões tropicais, principalmente no contexto de uma bacia hidrográfica, visto que, mesmo para solos de regiões temperadas, são praticamente inexistentes os trabalhos que se propõem a determinar numericamente esses parâmetros. O mais comum é a utilização de valores de referência disponíveis na literatura (Glover et al., 2000; Melo Filho et al., 2007). Entretanto, para as condições fisiográficas tropicais e subtropicais, como da Bacia Hidrográfica do Alto Rio Grande, com considerável diversidade de classes e usos dos solos, pode não ser apropriado considerar um valor de referência disponível na literatura, gerado para condições ambientais totalmente distintas. Um índice proposto nessas condições poderá ser enviesado e sua aplicabilidade, comprometida. Diante do exposto e para

**Quadro 1. Valores dos parâmetros L, B e S aplicados para normalização dos indicadores utilizados no cálculo do índice de qualidade do solo associado à recarga de água subterrânea ( $IQS_{RA}$ ) e estatísticas básicas destes**

Indicador	L	B	S	Média	CV	Valor	
						Máximo	Mínimo
DS ( $\text{kg dm}^{-3}$ )	0,579	1,091	-5,9241	1,091	17,28	1,892	0,579
$\mu$ ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ )	0,008	0,186	1,4045	0,186	48,77	0,510	0,008
Ko ( $\text{m dia}^{-1}$ )	0,017	0,832	1,3021	0,832	161,58	17,567	0,017



**Figura 4. Curvas de normalização para os indicadores do índice de qualidade do solo associado à recarga de água subterrânea ( $IQS_{RA}$ ) para a Bacia Hidrográfica do Alto Rio Grande, MG.**



alcançar os objetivos deste trabalho, as curvas de normalização apresentadas são suficientes e fornecem valores normalizados para os indicadores considerados, visando à estruturação do IQS<sub>RA</sub>.

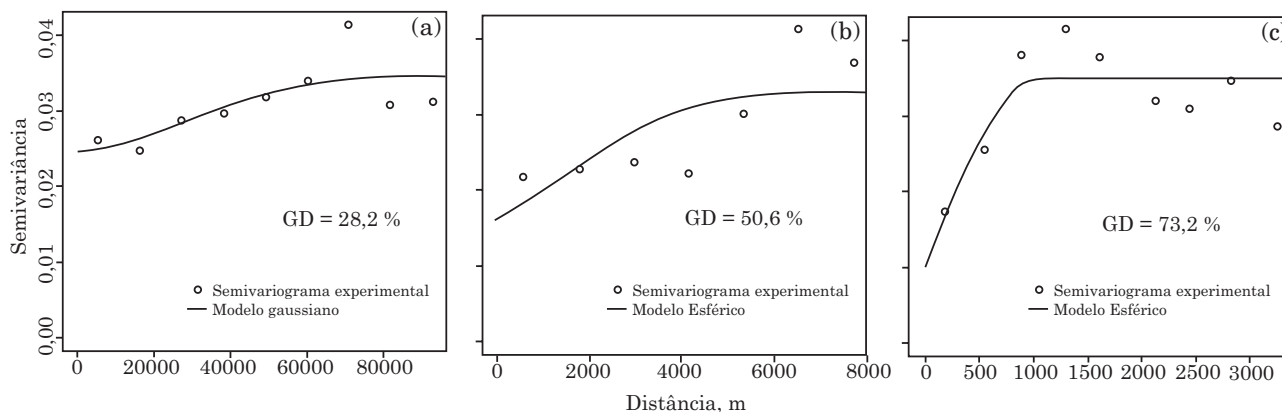
### Mapeamento do IQS<sub>RA</sub> na Bacia Hidrográfica do Alto Rio Grande

Os modelos teóricos de semivariograma, aplicados ao mapeamento do IQS<sub>RA</sub>, ajustados aos seus respectivos semivariogramas empíricos, estão apresentados na figura 5. Com base nos procedimentos de avaliação dos modelos de semivariograma apresentados anteriormente, verificou-se que o modelo gaussiano produziu a melhor modelagem da continuidade espacial quando se considera toda a Bacia Hidrográfica do Alto Rio Grande e foi aplicado a ela para o mapeamento do IQS<sub>RA</sub>. No entanto, para as sub-bacias hidrográficas dos ribeirões Jaguará e Lavrinha, em ambos os casos, o modelo esférico apresentou melhor desempenho. Contudo, é possível observar melhores ajustes para as sub-bacias de menor porte, uma vez que, tanto para a sub-bacia hidrográfica do ribeirão Jaguará quanto para a sub-bacia hidrográfica do ribeirão Lavrinha, foi possível amostrar de forma mais detalhada em pequena escala, reduzindo erros de estimativa associados ao efeito pepita do semivariograma. Para a Bacia do Alto Rio Grande como um todo, esse mesmo padrão de amostragem em pequenas distâncias não pode ser utilizado devido à magnitude da bacia, ficando inviável, em termos práticos, a coleta de amostras em distâncias semelhantes às trabalhadas nas bacias de menor magnitude. Apesar dessa diferença na magnitude da dependência espacial, é possível observar que os modelos ajustados apresentaram média estrutura de dependência espacial, caracterizada com graus de dependência espacial (GD) moderados (25 - 75 %) (Junqueira Junior et al., 2008; Alvarenga et al., 2011). Essas características permitem que o processo de krigagem ordinária possa ser aplicado para o

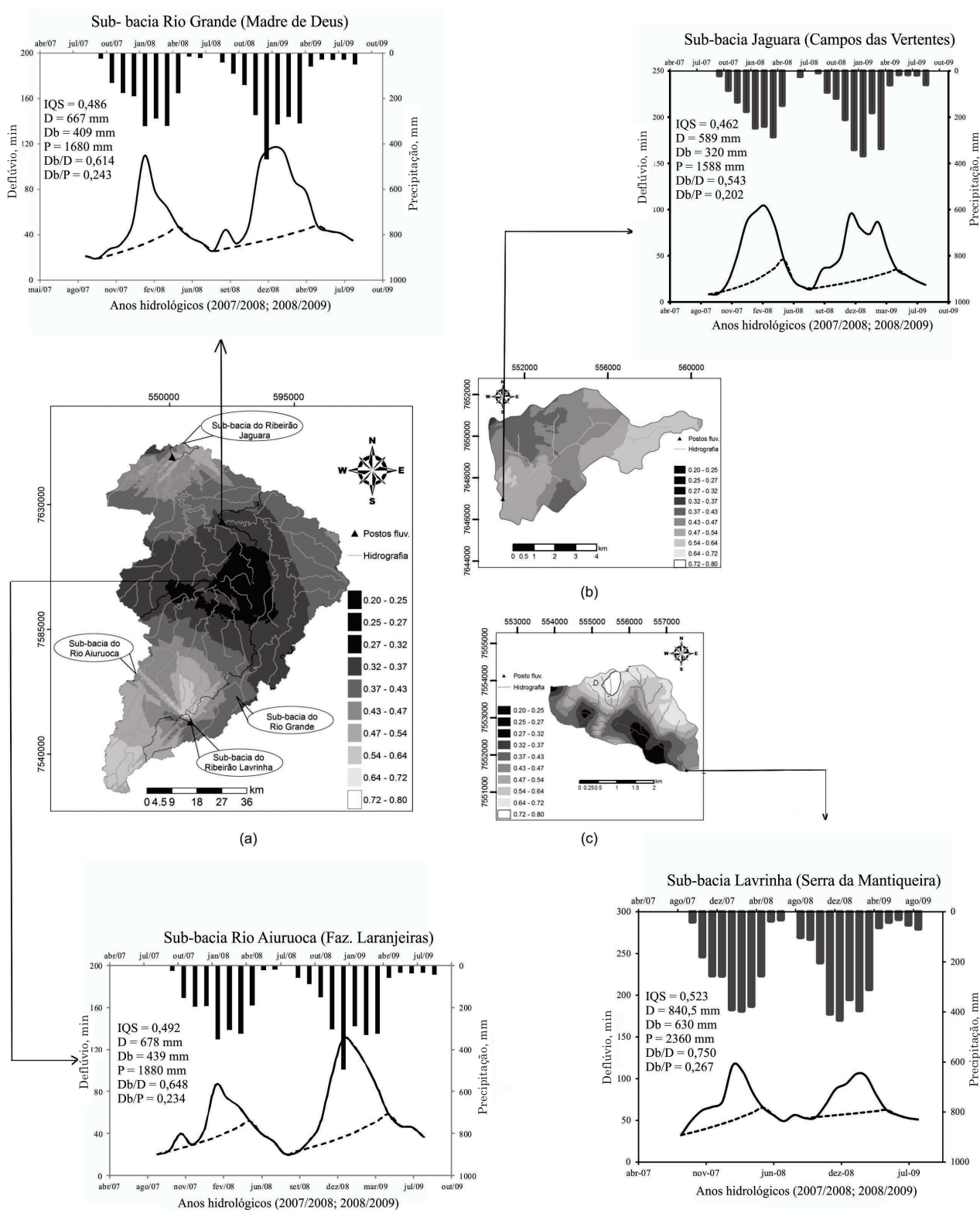
mapeamento do IQS<sub>RA</sub>, obtendo-se boa precisão. Vários trabalhos que buscaram mapear atributos físico-hídricos do solo têm aplicado esses modelos de semivariograma, com destaque para o modelo esférico, conforme pode ser observado em Gomes et al. (2007), Junqueira Junior et al. (2008) e Alvarenga et al. (2011), todos produzindo mapeamentos da condutividade hidráulica saturada, armazenamento de água no solo e macroporosidade em bacias hidrográficas.

O mapa do IQS<sub>RA</sub> para a Bacia Hidrográfica do Alto Rio Grande está apresentado na figura 6a. Observa-se que a região da Serra da Mantiqueira (parte sul da bacia), juntamente com uma região no centro-sul da bacia, apresentou valores elevados de IQS<sub>RA</sub>, atingindo 0,77, demonstrando alta qualidade do solo no contexto de infiltração de água e, consequentemente, de recarga subterrânea. Entretanto, a região sob influência do Reservatório da Hidrelétrica de Camargos (norte da bacia) apresentou, em parte considerável de sua extensão, capacidade mediana de recarga de água, com valores inferiores a 0,47, porém com trechos que indicam bom potencial para recarga, superior a 0,54.

Araújo (2006) propôs um mapa qualitativo-interpretativo preliminar das condições de recarga de água subterrânea para a Bacia Hidrográfica do Alto Rio Grande tendo como base as classes de solo, o material de origem e o relevo da região. Esse pesquisador interpretou que os solos da região da Serra da Mantiqueira apresentavam médio potencial quanto à recarga de aquíferos, enquanto os solos mais ao norte da bacia, incluindo a região sob influência do Reservatório da Hidrelétrica de Camargos, apresentavam alto potencial de recarga, devido ao predomínio de Latossolos. Ainda segundo Araújo (2006), os solos da região sudoeste e centro-oeste da bacia evidenciavam potencial reduzido quanto à recarga. No entanto, devido ao caráter preliminar daquele trabalho, não foi incluído um levantamento



**Figura 5. Ajuste dos semivariogramas teóricos aos dados do índice de qualidade do solo associado à recarga de água subterrânea (IQS<sub>RA</sub>) e grau de dependência espacial (GD) para a Bacia Hidrográfica do Alto Rio Grande (a) e para as sub-bacias hidrográficas dos ribeirões Jaguará (b) e Lavrinha (c).**



**Figura 6. Distribuição espacial do índice de qualidade do solo associado à recarga subterrânea ( $IQS_{RA}$ ) e apresentação de dados hidrológicos médios relativos aos anos hidrológicos de 2007/2008 e 2008/2009, para as sub-bacias hidrográficas dos rios Grande e Aiuruoca (a) e dos ribeirões Jaguará (b) e Lavrinha (c).**

quantitativo de atributos diretamente vinculados à infiltração e, portanto, alterados pelo uso e manejo do solo. Ademais, não foi desenvolvido qualquer tipo de validação da proposição do autor. Em conformidade com essas considerações, como o mapa desenvolvido no presente trabalho foi gerado com base em um índice que tem como indicadores atributos do solo extremamente sensíveis ao seu uso e manejo e que de fato estão intrinsecamente associados à infiltração, este representa um avanço conceitual e metodológico nesse contexto.

Os valores médios anuais de deflúvio total (D), deflúvio base ou subterrâneo (D<sub>B</sub>), precipitação (P), as relações D<sub>B</sub>/D e D<sub>B</sub>/P e o IQS<sub>RA</sub> médio para as sub-bacias dos rios Grande e Aiuruoca e dos ribeirões Lavrinha (Serra da Mantiqueira) e Jaguará (Campos das Vertentes) também estão apresentados na figura 6. Além desses dados, estão apresentados os hidrogramas mensais das respectivas sub-bacias hidrográficas para os anos hidrológicos de 2007/2008 e 2008/2009, os quais descrevem o comportamento hidrológico das sub-bacias exatamente no período de coleta dos dados físico-hídricos do solo.

Confrontando os dados hidrológicos médios apresentados à distribuição espacial do IQS<sub>RA</sub> (Figura 6), observa-se que as regiões que apresentaram valores mais elevados desse índice são aquelas cuja ocupação predominante dos solos está associada a matas nativas, especialmente Mata Atlântica (Figuras 1 e 2), embora os Cambissolos sejam os solos dominantes nessa região (Menezes et al., 2009). Estes, do ponto de vista pedológico, não apresentam condições ótimas para infiltração de água, uma vez que ocorrem em relevos mais movimentados, com “*solum*” raso e possibilidade de encrostamento se estiverem expostos ao impacto direto de gotas de chuva. Como os indicadores que compõem o IQS<sub>RA</sub> proposto são muito influenciados pelo uso e manejo do solo, eles captam de forma peculiar essa influência no contexto da infiltração de água. De acordo com os dados apresentados, 61 e 64,8 %, respectivamente, do deflúvio total nas sub-bacias hidrográficas dos rios Grande e Aiuruoca consistem de deflúvio subterrâneo, o qual é função do processo de recarga subterrânea e das condições físicas de superfície (Price, 2011). Em ambas as sub-bacias, o IQS<sub>RA</sub> médio é praticamente o mesmo, ou seja, 0,486 e 0,492, respectivamente. Por se tratar de grandes sub-bacias hidrográficas, com área de drenagem superior a 2.000 km<sup>2</sup>, estas ocupam as diferentes condições edafoclimáticas do Alto Rio Grande, desde a região da Serra da Mantiqueira até a região Campos das Vertentes, daí sua relativa similaridade. Avalia-se, entretanto, uma ligeira superioridade da sub-bacia do rio Aiuruoca (Figura 6a), o que se explica possivelmente pela maior presença da Mata Atlântica na parte sul desta sub-bacia, ou seja, uma influência um pouco maior da Serra da Mantiqueira, produzindo maior relação dos indicadores de deflúvio em relação ao total precipitado, com IQS<sub>RA</sub> superior a 0,60 em grande parte da sub-bacia hidrográfica.

Para analisar o comportamento descrito anteriormente de forma mais detalhada, os mapas do IQS<sub>RA</sub> para as sub-bacias hidrográficas dos ribeirões Jaguará, situada na zona fisiográfica Campos das Vertentes, e Lavrinha, localizada na zona fisiográfica Serra da Mantiqueira, estão também apresentados, respectivamente, na figura 6 b,c, bem como seus dados entre os anos hidrológicos de 2007/2008 e 2008/2009.

A bacia hidrográfica do ribeirão Jaguará (Figura 6b) apresenta como classe de solo predominante o Latossolo Vermelho distrófico típico (Figura 2b). No entanto, os usos principais do solo desta região, segundo Gomes et al. (2007), são pastagens extensivas, conduzidas sem nenhum critério conservacionista, e cultura anual, especialmente o plantio convencional de milho, o que pode ser comprovado pelo mapa de uso do solo na figura 2b. É sabido que essas práticas reduzem a capacidade de infiltração dos solos e, conseqüentemente, a capacidade de recarga de água subterrânea. O índice proposto demonstra valores inferiores aos obtidos para a região da Serra da Mantiqueira (praticamente 100 % da área desta bacia apresenta IQS<sub>RA</sub> inferior a 0,60), com IQS<sub>RA</sub> médio de 0,462, indicando condições medianas para recarga subterrânea. Isso significa que ele captou os problemas de manejo do solo nesta sub-bacia hidrográfica, levantados por Gomes et al. (2007), cujo reflexo está no comportamento do deflúvio subterrâneo inferior, em termos de sua participação no deflúvio total, em comparação àquele da sub-bacia hidrográfica do ribeirão Lavrinha (região da Serra da Mantiqueira), mesmo em condições pedológicas mais favoráveis à infiltração. Nesta sub-bacia, pouco mais de 50 % do deflúvio total corresponde ao deflúvio subterrâneo, e apenas 20,2 % da precipitação pluvial total média dos anos hidrológicos avaliados foi convertida nesse deflúvio.

No âmbito da região da Serra da Mantiqueira, Menezes et al. (2009), estudando os solos da sub-bacia hidrográfica do ribeirão Lavrinha, constataram que o de maior expressão espacial (60 % da área) é o Cambissolo Háplico com textura média, raso a moderadamente profundo (Figura 2a). Os pesquisadores verificaram ocupação predominante de Mata Atlântica (41,5 %) e pastagem (40,4 %), sobretudo nas faces norte e sul da bacia, respectivamente, conforme se observa no mapa de uso do solo da figura 2a. A área que apresentou os valores mais elevados do IQS<sub>RA</sub> foi sua face norte (Figura 6c), apesar da predominância dos Cambissolos; aproximadamente 50 % da área total desta sub-bacia apresenta IQS<sub>RA</sub> superior a 0,60. O valor médio do IQS<sub>RA</sub> é de 0,523, muito superior, portanto, aos valores para as demais sub-bacias hidrográficas. Entretanto, o uso atual do solo nesta área é de Mata Atlântica, o qual, segundo Menezes et al. (2009), promove efeitos benéficos ao solo, como baixa exposição deste ao impacto direto de precipitações intensas e formação de uma espessa camada de material orgânico pouco decomposto (serapilheira), que, segundo os citados autores, bem



como Pereira et al. (2010), funciona como um anteparo das precipitações, mantendo a água no meio e regulando o deflúvio subterrâneo. Esses aspectos, de forma geral, favorecem o processo de infiltração, compensando a menor capacidade de armazenamento de água dos Cambissolos em relação aos Latossolos, minimizando o processo de erosão hídrica e a degradação ambiental. Nesta sub-bacia, os resultados médios correspondentes aos anos hidrológicos de 2007/2008 e 2008/2009 (Figura 6c) evidenciaram que, em termos médios, o deflúvio subterrâneo representou 75 % do deflúvio total e, na média dos respectivos anos hidrológicos, 26,7 % da precipitação pluvial foi convertida em deflúvio subterrâneo, ou seja, o uso do solo em grande parte desta sub-bacia hidrográfica reflete as adequadas condições iniciais para o processo de recarga subterrânea, o que justifica os elevados valores observados do  $IQS_{RA}$  proposto.

Esses resultados encontram sustentação em trabalhos recentes, como os de Bonell et al. (2010), Roa-Garcia et al. (2011) e Hümann et al. (2011), os quais estudaram o comportamento da condutividade hidráulica sob condições de Floresta Nativa nos Andes colombianos, no sudoeste da Alemanha e no oeste da Índia, respectivamente. Nesses trabalhos, ficou constatado que a presença de florestas nativas, em avançado estágio de desenvolvimento (floresta madura), propicia condições para a gênese de poros gravitacionais com altos valores de porosidade drenável e condutividade hidráulica saturada, com a formação de fluxos preferenciais. Essa condição de superfície, bem como o regime climático úmido e frio com elevada capacidade de interceptação pelo dossel (Ávila, 2011), reduz a geração de deflúvio superficial direto (enxurrada), facilitando o processo de infiltração e armazenamento de água nesses ambientes. Todos esses aspectos fisiográficos permitem evidenciar o papel fundamental desempenhado pela Mata Atlântica no contexto de recarga de água subterrânea; a sua preservação é fundamental para o equilíbrio hidrológico e produção de água na Bacia Hidrográfica do Alto Rio Grande. Em nenhuma outra parte desta bacia foi possível constatar comportamento semelhante.

Este trabalho permitiu realçar a importância do uso e manejo do solo, principalmente das áreas de florestas nativas, para a recarga subterrânea. Essa constatação ficou explícita na região da Serra da Mantiqueira, na qual, apesar da predominância de Cambissolos e relevo movimentado, a presença de florestas nativas conferiu ao solo elevado potencial de recarga, atenuando os efeitos associados a fatores pedológicos e topográficos limitantes. Dessa forma, constata-se que o  $IQS_{RA}$  proposto mostrou-se sensível ao uso do solo. Sua aplicação é eficiente no contexto de identificação de zonas com maior potencial de recarga de água subterrânea, sendo uma ferramenta fundamental para o manejo sustentável da Bacia Hidrográfica do Alto Rio Grande, a qual é altamente estratégica para geração de energia hidrelétrica no sul e sudeste do Estado de Minas Gerais. No entanto,

a investigação do comportamento desse índice em camadas mais profundas do solo, bem como mais tempo de monitoramento hidrológico nas bacias de menor porte, é imprescindível para consolidar sua aplicação, com a identificação de faixas de valores do índice e as respectivas interpretações, além de melhor detalhamento do processo de infiltração no tocante à influência do relevo no seu comportamento.

## CONCLUSÕES

1. O  $IQS_{RA}$  proposto neste trabalho mostrou-se sensível ao uso e manejo do solo, e o processo de validação comprovou sua eficácia como indicador ambiental confiável de produção de água pelas sub-bacias hidrográficas da região Alto Rio Grande, sendo possível distinguir áreas importantes das regiões da Serra da Mantiqueira e Campos das Vertentes. Sub-bacias hidrográficas associadas a maiores valores desse índice são aquelas com as maiores proporções do deflúvio subterrâneo em relação ao deflúvio total e, portanto, as que se apresentam como as maiores produtoras de água.

2. As áreas cuja ocupação predominante do solo é de Mata Atlântica apresentaram valores elevados do  $IQS_{RA}$ , evidenciando que os fatores uso e manejo do solo são determinantes para o processo de recarga subterrânea na região da Serra da Mantiqueira; esta região apresentou os maiores valores do  $IQS_{RA}$ , apesar de as características pedológicas serem menos favoráveis à infiltração de água do que na região Campos das Vertentes.

## LITERATURA CITADA

- ALVARENGA, C.C.; MELLO, C.R.; MELLO, J.M. & VIOLA, M.R. Continuidade espacial da condutividade hidráulica saturada do solo na bacia hidrográfica do Alto Rio Grande, MG. R. Bras. Ci. Solo, 35:1745-1757, 2011.
- ARAÚJO, A.R. Solos da Bacia do Alto Rio Grande (MG): Base para estudos hidrológicos e aptidão agrícola. Lavras, Universidade Federal de Lavras, 2006. 345p. (Tese de Doutorado)
- ÁVILA, L.F. Balanço hídrico em um remanescente de Mata Atlântica da Serra da Mantiqueira, MG. Lavras, Universidade Federal de Lavras, 2011. 178p. (Tese de Doutorado)
- BESKOW, S.; MELLO, C.R.; NORTON, L.D.; CURTI, N.; VIOLA, M.R. & AVANZI, J.C. Soil erosion prediction in the Grande River Basin, Brazil using distributed modeling. Catena, 79:49-59, 2009.
- BONELL, M.; PURANDARA, B.K.; VENKATESH, B.; KRISHNASWAMY, J.; ACHARYA, H.A.K.; SINGH, U.V.; JAYAKUMAR, R. & CHAPPELL, N. The impact of forest use and reforestation on soil hydraulic conductivity in the Western Ghats of India: Implications of surface and sub-surface hydrology. J. Hydrol., 391:47-62, 2010.



- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solo. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.
- ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE - ESRI. ArcGis 9: Getting started with ArcGis. Redlands, 2004. 265p.
- 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. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 80:29-45, 2000.
- GOMES, N.M.; SILVA, A.M.; MELLO, C.R.; FARIA, M.A. & OLIVEIRA, P.M. Métodos de ajuste e modelos de semivariograma aplicados ao estudo da variabilidade espacial de atributos físico-hídricos do solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 31:435-443, 2007.
- HÜMANN, M.; SCHÜLER, G.; MÜLLER, C.; SCHNEIDER, R.; JOHST, M. & CASPARI, T. Identification of runoff processes - The impact of different forest types and soil properties on runoff formation and floods. *J. Hydrol.*, 409:637-649, 2011.
- JUNQUEIRA JÚNIOR, J.A.; SILVA, A.M.; MELLO, C.R. & PINTO, D.B.F. Continuidade espacial de atributos físico-hídricos do solo em sub-bacia hidrográfica de cabeceira. *Ci. Agrotec.*, 32: 914-922, 2008.
- KARLEN, D.L.; MAUSBACH, M.J.; DORAN, J.W.; CLINE, R.G.; HARRIS, R.F. & SCHUMAN, G.E. Soil quality: A concept, definition, and framework for evaluation (a guest editorial). *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 61:4-10, 1997.
- KARLEN, D.L. & STOTT, D.E. A framework for evaluating physical and chemical indicators of soil quality. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.F. & STEWART, B.A., eds. Defining soil quality for a sustainable environment. Madison, Soil Science Society of America, 1994. p.53-72. (SSSA Special Publication, 35)
- KARLEN, D.L.; WOLLENHAUPT, N.C.; ERBACH, D.C.; BERRY, E.C.; SWAN, J.B.; EASH, N.S. & JORDAHL, J.L. Crop residue effects on soil quality following 10-years of no-till corn. *Soil Tillage Res.*, 31:149-167, 1994.
- MELO FILHO, J.F.; SOUZA, A.L.V. & SOUZA, L.S. Determinação do índice de qualidade sub-superficial em um Latossolo Amarelo Coeso dos Tabuleiros Costeiros, sob floresta natural. *R. Bras. Ci. Solo*, 31:1599-1608, 2007.
- MELLO, C.R.; NORTON, L.D.; CURI, N. & YANAGI, S.N.M. Sea surface temperature (SST) and rainfall erosivity in the Upper Grande River Basin, Southeast Brazil. *Ci. Agrotec.*, 36:53-59, 2012.
- MENEZES, M.D.; JUNQUEIRA JÚNIOR, J.A.; MELLO, C.R.; SILVA, A.M.; CURI, N. & MARQUES, J.J. 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). *Sci. For.*, 37:175-184, 2009.
- PEREIRA, D.R.; MELLO, C.R.; SILVA, A.M. & YANAGI, S.N.M. Evapotranspiration and estimation of aerodynamic and stomatal conductance in a fragment of Atlantic Forest in Mantiqueira Range region, MG. *Cerne*, 16:32-40, 2010.
- PINTO, D.B.F. Aplicação do modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) na simulação hidrossedimentológica em bacia hidrográfica da Serra da Mantiqueira, MG. (Tese de Doutorado) Lavras, Universidade Federal de Lavras, 2011. 225p.
- PRICE, K. Effects of watershed topography, soils, land use, and climate on baseflow hydrology in humid regions: A review. *Prog. Phys. Geogr.*, 35:465-492, 2011.
- ROA-GARCIA, M.C.; BROWN, S.; SCHREIER, H. & LAVKULICH, L.M. The role of land use and soils in regulating water flow in small headwater catchments of the Andes. *Water Res. Res.*, 47:W05510, 2011.
- VEZZANI, F.M. & MIELNICZUK, J. Uma visão sobre qualidade do solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 33:743-755, 2009.
- VIOLA, M.R. Simulação hidrológica na cabeceira da bacia hidrográfica do rio Grande de cenários de usos do solo e mudanças climáticas A1B. Lavras, Universidade Federal de Lavras, 2011. 286p. (Tese de Doutorado)
- WYMORE, A.W. Model-based systems engineering. Boca Raton, CRC Press, 1993. 710p.