

TIPOLOGIA E CLASSIFICAÇÃO DAS ZONAS PREFERENCIAIS DE RECARGA DE AQUÍFEROS EM BELO HORIZONTE-MG: APLICAÇÃO DO MÉTODO GRADE OF MEMBERSHIP (GoM)

Typology and classification of preferential areas of groundwater recharge in Belo Horizonte-MG: application of Grade of Membership (GoM) method

Miguel Fernandes Felipe¹
Antônio Pereira Magalhães Junior²
Ricardo Alexandrino Garcia²

¹Universidade Federal de Juiz de Fora
Departamento de Geociências

Rua José Lourenço Kelmer, s/n - Campus Universitário - São Pedro - Juiz de Fora - MG - CEP: 36036-900
 miguel.felippe@ufjf.edu.br

²Universidade Federal de Minas Gerais
Departamento de Geografia

Av. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha - Belo Horizonte - MG - CEP 31270-901
 magalhaesufmg@yahoo.com.br; alexandrinogarcia@gmail.com

RESUMO

Os topos são considerados, em termos hidrogeomorfológicos, zonas preferenciais de recarga de aquíferos. Porém, a passagem da água meteórica para o meio subterrâneo depende essencialmente das características ambientais da superfície. Desse modo, o objetivo do trabalho é classificar os topos de Belo Horizonte-MG quanto à sua eficiência na recarga de aquíferos. Apresenta-se uma inovação metodológica a partir da utilização do modelo estatístico qualitativo de máxima verossimilhança *Grade of Membership* (GoM), aplicado via sensoriamento remoto, subsidiado por dados secundários. Foram criados tipos ideais de topos fundamentados nos fatores limitantes e/ou facilitadores da recarga subterrânea, os quais foram posteriormente classificados de acordo com a resposta estatística ao modelo (grau de pertencimento de cada topo aos tipos ideais estabelecidos). Os resultados reiteram a problemática da recarga de aquíferos em Belo Horizonte, afetada pela ocupação humana e por limitações naturais do ambiente. Acredita-se que o GoM, apesar de pouco explorado, é um método muito útil para a análise espacial remota na Geografia, necessitando, a partir de agora, de esforços de validação a partir de testes de campo.

Palavras chave: Recarga de aquífero. *Grade of Membership*. Belo Horizonte.

ABSTRACT

Hilltops are considered, in hydrogeomorphology, to be preferential areas for groundwater recharge. However, the passage of meteoric water into underground media depends essentially on the surface environmental characteristics. Thus, the objective of this work is to classify the hilltops of Belo Horizonte-MG, considering their efficiency in groundwater recharge. It is introduced a methodological innovation that uses remote sensing secondary data on a statistical model of maximum likelihood named *Grade of Membership* (GoM). Ideal types of hilltops were created in a function of the limiting and/or facilitating factors of underground recharge. Following this, the hilltops are rated according to the model answers (grade of membership of each hilltop to the ideal profiles set out). The results reaffirm the problems in groundwater recharge in Belo Horizonte that are a result of human occupation and natural limitations. It is believed that GoM is a very useful method of spatial analysis in geography. In the future, validation efforts from field tests need to be conducted.

Keywords: Groundwater recharge. *Grade of Membership*. Belo Horizonte.

1 INTRODUÇÃO

O planejamento ambiental das águas urbanas no Brasil limita-se comumente à drenagem pluvial e ao esgotamento sanitário. Raros são os esforços de integrar na abordagem do meio urbano, os processos humanos e naturais. Os fluxos de água continuam sendo vistos sob a ótica do ciclo hidrológico, mesmo sendo cada vez mais evidente a existência de um ciclo hidrossocial (SWYNGEDOUW, 2004).

O município de Belo Horizonte possui um avançado Plano Diretor de Drenagem, em que, além das tradicionais questões de saneamento e drenagem urbana, são incluídos projetos de recuperação ambiental *latu sensu*. Porém, muitas questões de primeira importância sobre as águas urbanas permanecem mal elaboradas, como por exemplo, a recarga subterrânea.

Parte desse desinteresse se deve ao fato de que 95% do abastecimento urbano do município é realizado a partir de mananciais fluviais. Porém, não se pode ignorar a importância das águas subterrâneas para a manutenção do equilíbrio hidrológico e, por conseguinte, sua descarga na forma de mananciais superficiais que garantirão a perenidade dos cursos fluviais (FETTER, 1994; WARD; TRIMBLE, 2004; TODD; MAYS, 2005).

Essa lacuna no planejamento urbano-ambiental está intimamente relacionada à dificuldade metodológica de interação entre água meteórica, superficial e subterrânea em escala regional, já que a maioria dos estudos baseia-se em ensaios pontuais ou modelagens em microbacias para estimativas de infiltração, percolação e recarga, como mostram Zuquete e Palma (2006), Gaspar, Campos e Cadamuro (2007), Santoro et al. (2007) e Santos e Koid (2011).

O geoprocessamento emerge como importante ferramenta no avanço do uso de modelos matemáticos pela sua capacidade multiescalar. Uma vez que dados quantitativos confiáveis são escassos e muitas vezes não replicáveis em escalas distintas da original, buscam-se métodos qualitativos de

interpretação da recarga que associados em um Sistema de Informações Geográficas (SIG) permitam a extrapolação zonal dos dados.

Sob esta perspectiva, o objetivo geral deste trabalho é classificar a eficiência dos topos na recarga de aquíferos em Belo Horizonte-MG. Como arcabouço metodológico, tem-se o método qualitativo de máxima verossimilhança *Grade of Membership* (GoM). Adicionalmente, visa-se espacializar os resultados e identificar os principais fatores controladores do processo de recarga, bem como aqueles que o restringem, contribuindo para a gestão integrada das águas no município.

Para tanto, busca-se criar uma tipologia dos topos a partir de suas características ambientais no intuito de possibilitar uma identificação mais clara dos seus comportamentos hidrológicos. Os dados utilizados foram obtidos em diversos documentos governamentais e acadêmicos compatíveis com a escala de análise e categorizados segundo os princípios teóricos de recarga de aquíferos.

Os resultados dessa proposta metodológica podem ser utilizados como forma de simplificar procedimentos *in loci* que demandam esforços técnicos e financeiros consideráveis. Por outro lado, faz-se necessário continuar os estudos no intuito de validar o presente modelo com dados obtidos pontualmente em campo.

2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Capital do estado de Minas Gerais, o município de Belo Horizonte possui uma população de 2,3 milhões de habitantes em um território de 331 Km², segundo o Censo de 2010. A elevada densidade demográfica é correlata a uma extensa mancha urbana que já ocupa aproximadamente 83% da área municipal (FELIPPE et al., 2011), restando apenas poucas porções não ocupadas, sobretudo, em unidades de conservação.

Como a grande maioria das metrópoles brasileiras, a capital mineira passou por um processo de crescimento e adensamento populacional muito rápido, sem o

acompanhamento de políticas urbanísticas de melhoria das condições de vida da população (MOURA, 1994). Dessa forma, a recarga subterrânea ficou severamente comprometida pela extensa impermeabilização do solo, gerando e agravando as inundações sucessivas e generalizadas em diversos pontos da cidade.

A impermeabilização se torna particularmente crítica devido à sazonalidade climática de Belo Horizonte. Segundo a classificação de Koppen, o clima é do tipo Cwa (tropical úmido), com verões quentes e chuvosos e invernos secos. Com quatro a cinco meses de estiagem por ano, as chuvas se concentram, principalmente, no período entre novembro e março, com um total pluviométrico anual em torno de 1.500mm.

Segundo o balanço hídrico, a reposição das perdas de água subterrânea, após o período de predominância da descarga dos aquíferos, inicia-se no mês de outubro e é promovido pela percolação nas espessas coberturas superficiais que cobrem praticamente todo o município. Devido ao contexto geológico-geomorfológico de Belo Horizonte (borda norte do Quadrilátero Ferrífero em contato com a Depressão de Belo Horizonte), a maior parte de seu território é embasada por rochas cristalinas arqueanas. Esta região possui relevo colinoso, suave-ondulado, com vertentes convexas cobertas por mantos de intemperismo areno-argilosos a argilosos com profundidades comumente superiores a 50m. Ao sul do município, sob a influência das rochas metamórficas do Supergrupo Minas que embasam o Quadrilátero Ferrífero, o relevo torna-se mais ondulado, com vertentes retilíneas, topos em cristas e mantos de intemperismo pouco espessos (SILVA et al., 1995; BELO HORIZONTE, 1995; COSTA, 2002; FELIPPE, 2007).

O município se insere em três domínios hidrogeológicos distintos (Figura 1): o Complexo Belo Horizonte; o Grupo Sabará; e os Grupos Piracicaba e Itabira (SILVA et al., 1995).

O domínio do Complexo Belo Horizonte é caracterizado por um sistema aquífero livre, composto por rochas gnáissicas (aquífero fissural) sotopostas ao material do

manto de intemperismo ou a sedimentos alúvio-coluvionares (aquífero granular). Possui baixa capacidade específica em poços escavados na rocha, porém, com aumento considerável das vazões no caso da água armazenada no material inconsolidado (BEATO, 2001).

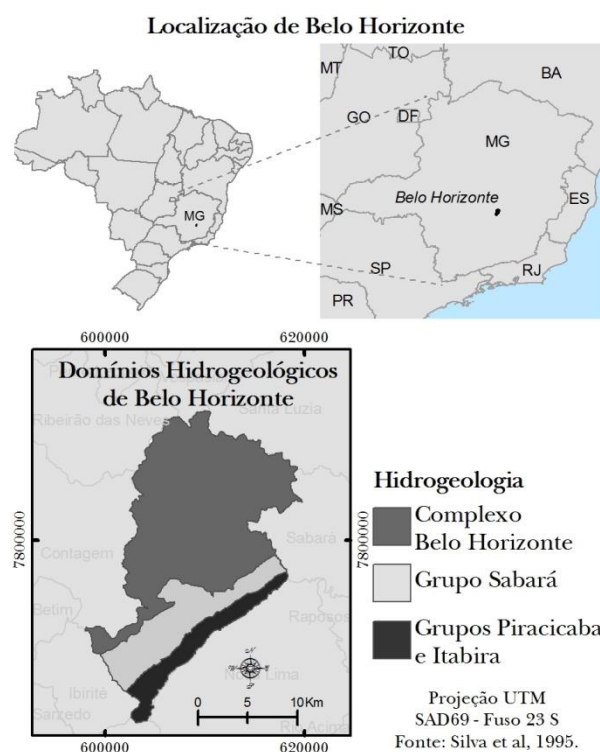


Figura 1: Localização e domínios hidrogeológicos de Belo Horizonte-MG

Fonte: Os autores.

O domínio hidrogeológico do Grupo Sabará é marcado por litologias de baixa permeabilidade, como xistos e filitos. Tais rochas apresentam cristais de textura pelítica e sem extensas redes de fraturas. Por isso, os poços escavados nesse aquífero possuem as menores capacidades específicas do município (COSTA, 2002).

O domínio hidrogeológico das rochas metassedimentares dos Grupos Itabira e Piracicaba é o de melhor eficiência de Belo Horizonte (SILVA et al., 1995; BELO HORIZONTE, 1995). Caracterizado por uma variabilidade litológica muito grande (quartzitos, itabiritos, dolomitos, xistos, filitos, etc.), são aquíferos heterogêneos e anisotrópicos, parcialmente granulados e fraturados (COSTA, 2002). Da mesma forma

que os anteriores, o aquífero granular sobreposto ao metassedimentar é de suma importância na dinâmica hidrológica desse domínio, devido à variação de textura.

3 BASES TEÓRICO-CONCEITUAIS

3.1 Zonas de recarga de aquíferos

As zonas de recarga de aquíferos são locais da superfície terrestre que possibilitam a infiltração e a percolação da água em direção a um sistema geológico capaz de armazená-la e distribuí-la (DAVIS, 1966; FETTER, 1994). Não obstante, existem recortes espaciais que são mais eficazes na recarga dos aquíferos, ou seja, são zonas preferenciais.

A espacialização dessas áreas é determinada pela dinâmica dos fluxos subterrâneos. As zonas de recarga caracterizam-se por elevado potencial hidráulico, contrariamente às zonas de descarga (WARD; TRIMBLE, 2004).

De uma forma geral, há três tipos de energia envolvidos nesses fluxos: de elevação, de pressão e de velocidade (WARD; TRIMBLE, 2004). Tendo em vista que os aquíferos em Belo Horizonte são livres a semi-confinados com importante participação do aquífero granular inconsolidado (COSTA, 2002; BEATO, 2001; SILVA et al., 1995), a energia de elevação é o principal fator de determinação das zonas de recarga. Por estarem em posição altimétrica mais elevada, promovendo maior potencial hidráulico às águas infiltradas, os topos são considerados zonas preferenciais de recarga dos aquíferos em Belo Horizonte (FELIPPE, 2007).

Sabendo-se que a 'infiltração, a percolação, a transmissão e o armazenamento' são os principais processos na efetivação da recarga, o primeiro esforço metodológico para uma classificação é no sentido de definir os elementos do sistema ambiental mais importantes no condicionamento dos processos supracitados. Esse procedimento deve ser precedido de um levantamento detalhado do quadro geográfico da unidade de estudo. As informações devem ser espacializáveis na escala adequada para o estudo.

A capacidade de infiltração de um meio é determinada por uma conjuntura de elementos, dentre os quais as propriedades do solo – textura, porosidade e permeabilidade – e a declividade do terreno (COELHO-NETO, 1998 apud SOARES, 2005; WARD; TRIMBLE, 2004; BRANDÃO et al., 2006). Quanto à percolação, sua dinâmica está diretamente relacionada à infiltração, sendo que os mesmos elementos a condicionam (WARD; TRIMBLE, 2004). Destaca-se ainda a importância da profundidade das coberturas superficiais e o contato destas com o aquífero fissural sotoposto.

A dinâmica da água em sub-superfície é traduzida pelos processos de transmissão e armazenamento. Neste sentido, características litológicas, como a granulometria, e estruturais, como a densidade de descontinuidades físicas da rocha, são ímpares para a determinação da transmissividade e armazenamento (TODD; MAYS, 2005). No caso de Belo Horizonte, também para essas propriedades, não pode ser negligenciada a importância dos mantos de intemperismo enquanto aquíferos granulares sobrepostos ao substrato cristalino (SILVA et al., 1995; BEATO, 2001; COSTA, 2002).

3.2 *Grade of Membership*

Os procedimentos estatísticos clássicos sempre apresentaram limitações quanto a sua utilização nas ciências ambientais, sobretudo na Geografia. A exigência de quantificação dos fenômenos pelos métodos mais tradicionais inviabiliza a utilização de uma série de informações qualitativas.

Postula-se, então, o grande desafio metodológico para as ciências ambientais no contexto epistemológico atual: trabalhar com o 'rigor' científico exigido a partir de uma trama extremamente complexa de variáveis que são, por natureza, qualitativas.

A insolubilidade de alguns problemas com técnicas estatísticas clássicas levou Zadeh (1965 apud MANTON; WOODBURY; TOLLEY, 1994) a propor uma nova lógica matemática que superasse a bivalência do verdadeiro ou falso, permitindo o

estabelecimento de respostas entre esses dois extremos.

Os novos conceitos apresentados por Zadeh (1965 apud HARRIS, 1999) embasaram a formulação da Teoria dos Sistemas Nebulosos, que preconiza o raciocínio impreciso e a análise qualitativa.

A teoria foi postulada com a finalidade de processar informações subjetivas, de natureza vaga e incerta, da linguagem natural, possibilitando a modelagem de conceitos subjetivos (HARRIS, 1999, p. 20).

A partir dessa lógica, são propostos novos conceitos, como os Conjuntos Nebulosos. Na matemática clássica o pertencimento de um elemento a um determinado conjunto é absoluto: ou o elemento pertence ou não (bivalência). Na matemática nebulosa, os limites dos conjuntos não são definidos com precisão e a inclusão de um elemento é definida por uma função que expressa o seu grau de pertencimento ao conjunto.

Portanto, na teoria dos conjuntos nebulosos, um elemento pode pertencer parcialmente a múltiplos conjuntos, apresentando, para cada um destes, um grau de pertinência passível de determinação.

Pertencimento para os conjuntos tradicionais requer que cada elemento individualmente seja membro de um conjunto – ou não. Dois conjuntos são disjuntos se não apresentam elementos em comum. Nos conjuntos nebulosos, um elemento pode ser um membro parcial de múltiplos conjuntos (MANTON et al., 1994, p. 3).

Sob esses preceitos, o método *Grade of Membership* (GoM), desenvolvido por Manton et al. (1994), extrapola a teoria tradicional dos conjuntos, permitindo uma interpretação fluida e dinâmica entre um elemento e suas características. Assim, o GoM é um método de estimação estatística de máxima verossimilhança que se baseia na teoria dos conjuntos nebulosos, trabalhado a partir de dados categóricos (CERQUEIRA, 2004; GARCIA et al., 2004).

Cada elemento (no caso deste trabalho, os topos) possui um escore de pertencimento que o relaciona a um determinado perfil (conjunto), seja uma tipologia ou uma classificação. A soma dos escores de um mesmo elemento para seus diversos perfis é igual a um. Os procedimentos iterativos convergem os vetores de pertencimento de modo a agrupar os elementos mais parecidos em determinados perfis, através da maximização da função de verossimilhança; por princípio o elemento que possui grau de pertinência superior a zero já possui características (ao menos parcialmente) de um perfil (MANTON et al., 1994).

Assim, a determinação de escores para as unidades de estudo permite a representação da heterogeneidade entre as mesmas, dentro de cada perfil gerado (CERQUEIRA, 2004). Este fato gera vantagens comparativas do GoM em relação a outras metodologias como a Análise de Cluster e a Análise Discriminante, que apresentam problemas com a heterogeneidade dos indivíduos. O GoM lida com agrupamento e estimação de múltiplos coeficientes de pertencimento simultaneamente, o que é um avanço metodológico considerável (CERQUEIRA, 2004).

Além disso, o GoM trabalha com dados categóricos ou nominais, o que facilita os estudos ambientais, já que a maior parte de suas variáveis é qualitativa. Ademais, variáveis quantitativas também podem ser usadas ao serem classificadas (categorizadas). Destarte, o GoM permite a construção de tipologias a partir da geração de agrupamentos dos elementos em função da proximidade de suas características intrínsecas (ALVES et al., 2008; CERQUEIRA, 2004; MANTON et al., 1994).

O GoM pode ser um método de grande valia na determinação de classificações (a partir da elaboração de tipologias) baseadas nas características quantitativas e qualitativas dos elementos em estudo (CERQUEIRA, 2004; ALVES et al., 2008). Além disso, ao ser elaborado um perfil padrão e medido o grau de pertencimento de um elemento a este perfil, pode-se desenvolver indicadores ambientais eficientes.

A técnica GoM estima, com base em um modelo de probabilidade multinomial, dois tipos de parâmetros: um de associação, g_{ik} , e outro de estrutura, λ_{kjl} , ou seja, os graus de pertinência (g) de cada elemento (i) a cada subconjunto, ou perfil, ou tipo (k); e as probabilidades de cada categoria (l) de cada variável (j) em cada perfil (k) que, por sua vez, define esse perfil (Equação 1) (GARCIA et al., 2004, p. 4).

A função multinomial de máxima verossimilhança do método *Grade of Membership* é expressa pela Equação 1.

$$L(y) = \prod^i \prod^j \prod^{L_j} (\sum g_{ik} \lambda_{kjl}) \quad (1)$$

Portanto, o método pode contribuir para o estudo dos topos como zona de recarga de aquíferos ao permitir a criação de uma tipologia multivariada. Além disso, ao criar-se uma classe ‘ideal’ (perfil padrão) para a recarga de aquíferos, pode-se avaliar o grau de pertencimento de cada topo a esta classe, criando assim, um indicador de eficiência.

4 METODOLOGIA

A primeira etapa da modelagem deve ser a seleção das variáveis utilizadas respeitando-se os critérios de seletividade, simplicidade e analogia, bem como a disponibilidade dos dados, conforme sugere Christofletti (1999).

Dessa forma, para a classificação da eficiência dos topos como zonas de recarga de aquíferos foram utilizadas as variáveis: i) permeabilidade, inferida a partir da geologia de acordo com Costa (2002); ii) número de canais de primeira ordem, obtido na base digital de hidrografia fornecida pela Prefeitura de Belo Horizonte (PBH); iii) número de falhas e contatos geológicos, obtido no mapa geológico apresentado por Silva et al. (1995); iv) forma do topo, verificada pelo Modelo Digital de Terreno (equidistância das curvas de nível de 1m); v) potencial de água subterrânea, obtido no mapa apresentado no Plano Diretor Municipal (BELO HORIZONTE, 1995); vi) profundidade do manto de intemperismo,

obtido no mapa apresentado por Costa (2002); vii) proteção por unidades de conservação, obtida na base digital fornecida pela Fundação de Parques Municipais-PBH; viii) cobertura do solo, verificado em imagens CBERS-2 de 2007.

As respostas de cada variável foram, então, categorizadas em função da sua contribuição teórica para a recarga subterrânea. Em todas as variáveis foram criadas três categorias de respostas qualitativamente distintas (‘ruim’, ‘razoável’ ou ‘bom’).

O Quadro 1 apresenta o resumo das oito variáveis estudadas, associando as possíveis respostas com a sua respectiva categorização.

Quadro 1: Contribuição dos elementos do quadro ambiental na recarga dos aquíferos

Variável / Qualificação	Bom (2)	Razoável (1)	Ruim (0)
Morfologia do topo	Arredondado	Crista	-
Cobertura do solo	Vegetada	Semi-vegetada	Urbana
Proteção por parques	Integral	Parcial	Ausente
Permeabilidade-de (geologia)	Formação Cercadinho	Grupo Sabará	Máficas e Ultra-máficas
	Formação Cauê	Formação Gandarela	
	Formação Taboões	Formação Barreiro	
	Complexo Belo Horizonte	Formação Fecho do Funil	
Nº de canais de primeira ordem	Mais de 5	1 a 4	0
Profundidade do manto de intemperismo	Superior a 40 metros	21 a 40 metros	Inferior a 20 metros
Potencial de água subterrânea	Alto	Médio	Baixo
Nº de falhas e contatos geológicos	Mais de 2	1	0

Fonte: Belo Horizonte (1995); Silva et al. (1995); Costa (2002).

4.1 Tipologia

Para execução da tipologia pelo algoritmo de máxima verossimilhança, foi utilizado o aplicativo GoM 3.4, que trabalha com arquivos de comando na extensão *.txt. Após a categorização da matriz a partir do

estabelecido no Quadro 1, foi criado um arquivo controle para a execução do GoM em que são indicados a matriz de dados (categorizados), o número de casos (número de topos: 157), o método estatístico (algoritmo padrão do método), as variáveis (as oito variáveis selecionadas) e o número de perfis que se deseja obter.

A resposta do algoritmo apresenta a probabilidade de inserção dos topos nos perfis puros criados, tendo por base a teoria dos conjuntos nebulosos, e é determinada pelo grau de pertencimento que este elemento possui (g_{ik}). Para a definição do número de tipos, foram realizados testes com dois, três, cinco e dez perfis. Verificou-se o número de topos com grau de pertencimento superior a 0,7 em algum perfil, para avaliação do ajuste do modelo, uma vez que este valor representa a predominância absoluta das características de determinado tipo criado nas nascentes avaliadas.

Os resultados mais satisfatórios foram encontrados com três perfis. Dos 157 topos, 70,06% possuem g_{ik} superior a 0,7. Além disso, 50,95% se inserem somente em um perfil, apresentando grau de inserção 1,0, o que facilita a análise dos resultados.

4.2 Classificação

Com base na revisão da literatura, foi possível estabelecer *a priori* as características dos perfis, no intuito de criar ‘tipos puros’ (MANTON et al., 1994) para os topos. O primeiro deveria contemplar características consideradas ‘boas’ em todas as variáveis, o segundo características ‘razoáveis’ e o terceiro, ‘ruins’. O método de execução da classificação é similar ao da tipologia.

Dessa maneira, fixam-se as características ideais para cada variável em uma matriz de controle que é inserida no arquivo-base do GoM. Essa matriz indica, para cada perfil, a resposta esperada. Os perfis são estáticos e os elementos são posicionados em relação ao grau de pertencimento que possuem com cada perfil. Assim, o Quadro 2 apresenta a matriz final de agrupamento das variáveis utilizadas e suas características em função dos

três tipos puros criados.

As respostas são apresentadas em função da probabilidade da existência de determinada característica nos respectivos tipos. Nota-se que, como os perfis criados são puros, a probabilidade de uma característica ser encontrada deve sempre ser igual a zero ou um, exatamente.

Quadro 2: Probabilidade de inserção das características levantadas nos perfis puros estabelecidos *a priori*

Variável	Característica	A	B	C
Morfologia do topo	Crista	1,0000	1,0000	0,0000
	Arredondada	0,0000	0,0000	1,0000
Cobertura do solo	Urbana	1,0000	0,0000	0,0000
	Semi-Vegetada	0,0000	1,0000	0,0000
	Vegetada	0,0000	0,0000	1,0000
Permeabilidade (geologia)	Máficas	1,0000	0,0000	0,0000
	Sabará, Gandarela, Barreiro e Fecho do Funil	0,0000	1,0000	0,0000
	Cercadinho, Cauê, Taboões e Complexo Belo Horizonte	0,0000	0,0000	1,0000
Proteção por parques	Ausente	1,0000	0,0000	0,0000
	Parcialmente	0,0000	1,0000	0,0000
	Integral	0,0000	0,0000	1,0000
Número de falhas e contatos geológicos	0	1,0000	0,0000	0,0000
	1	0,0000	1,0000	0,0000
	Mais de 2	0,0000	0,0000	1,0000
Espessura do manto de intemperismo (m)	Inferior a 20	1,0000	0,0000	0,0000
	21-40	0,0000	1,0000	0,0000
	Superior a 40	0,0000	0,0000	1,0000
Número de canais de primeira ordem	0	1,0000	0,0000	0,0000
	1-4	0,0000	1,0000	0,0000
	Mais de 5	0,0000	0,0000	1,0000
Potencial de água subterrânea	Baixo	1,0000	0,0000	0,0000
	Médio	0,0000	1,0000	0,0000
	Alto	0,0000	0,0000	1,0000

Fonte: Os autores

Assim o Perfil A é um ‘tipo puro’ em que todas as variáveis possuem as piores características para a recarga (Quadro 1). Por outro lado, o Perfil C é um ‘tipo puro’ em que todas as variáveis apresentam as melhores características para a recarga subterrânea (Quadro 1). Por fim, o Perfil B é considerado intermediário.

Com os tipos determinados *a priori*,

em média o g_{ik} obtido foi consideravelmente baixo, conforme o esperado. Considerando g_{ik} acima de 0,7 como mínimo para os topos serem considerados como bem caracterizados em um determinado perfil, dos 157 topos, apenas 8,28% assim se encaixam. Desse total, 12 topos possuem g_{ik} no Perfil A (de baixa eficiência) superior a 0,7 e apenas 1 no Perfil B (eficiência razoável). Todos os outros 144 topos foram considerados nebulosos, tendo em vista o baixo g_{ik} em todos os perfis.

Resumidamente, pode-se dizer que um topo ideal para a recarga inserir-se-ia de forma perfeita (100%) no Perfil C. Isso, contudo, não ocorreu. Porém, quanto maior o escore de pertencimento (g_{iC}) ao Perfil C, melhor a eficiência do topo.

Todavia, o g_{iB} dos topos também deve ser avaliado. Assim, o escore de pertinência para esse perfil, deve integrar a análise, mas não com o mesmo peso do Perfil C.

Vislumbrando o estabelecimento de um indicador de recarga (I_r) que pudesse auxiliar na classificação, os escores de pertencimento ao Perfil C e ao Perfil B foram considerados na Equação 2:

$$I_r = g_{iC} + 0,5g_{iB} \quad (2)$$

Sob essa perspectiva, a classificação de um topo quanto a eficiência na recarga subterrânea fica sintetizada ao seu escore de pertencimento aos Perfis B e C. Em um caso hipotético de um topo inserido perfeitamente (100%) no Perfil C, seu indicador (I) seria 1,0. Contudo, se estivesse 100% no Perfil B, teria I igual a 0,5. No último caso, com g_{iA} de 1,0, seu I equivaleria 0,0. A lógica de distribuição dos pesos respeitou a lógica da divisão dos valores máximo (1,0), mínimo (0,0) e médio (0,5) das possibilidades de g_{ik}

5 RESULTADO E DISCUSSÃO

5.1 Tipologia

O Quadro 3 apresenta a matriz final de caracterização dos perfis criados a partir do agrupamento das variáveis utilizadas. As respostas são apresentadas em função da percentagem da ocorrência de determinada

característica nos respectivos perfis.

O Perfil A abrange 14 topos em crista, vegetados, sem falhas ou contatos, sem canais de primeira ordem e de alto potencial de água subterrânea. Em relação à geologia, à proteção por parques e à profundidade do manto de intemperismo esse perfil comporta mais de uma resposta. Dessa forma, o Perfil A compreende ‘topos estruturais vegetados’.

Quadro 3: Probabilidade de inserção das características nos perfis tipológicos resultantes

Variável	Característica	A	B	C
Morfologia do topo	Crista	1,0000	0,0000	0,0000
	Arredondada	0,0000	1,0000	1,0000
Cobertura do solo	Urbana	0,0000	0,7777	0,7142
	Semi-Vegetada	0,1433	0,2223	0,2858
	Vegetada	0,8567	0,0000	0,0000
Permeabilidade (geologia)	Máficas	0,0000	0,0426	0,0000
	Sabarã, Gandarela, Barreiro e Fecho do Funil	0,5198	0,0000	1,0000
	Cercadinho, Cauê, Taboões e Complexo Belo Horizonte	0,4802	0,9574	0,0000
Proteção por parques	Ausente	0,6129	1,0000	0,8241
	Parcialmente	0,1936	0,0000	0,1759
	Integral	0,1936	0,0000	0,0000
Número de falhas e contatos geológicos	0	0,7049	1,0000	0,0000
	1	0,2951	0,0000	0,6387
	Mais de 2	0,0000	0,0000	0,3613
Espessura do manto de intemperismo (m)	Inferior a 20	0,4583	0,4151	0,4232
	21-40	0,0000	0,5849	0,5768
	Superior a 40	0,5417	0,0000	0,0000
Número de canais de primeira ordem	0	0,8528	0,8768	0,4284
	1-4	0,1472	0,1232	0,3214
	Mais de 5	0,0000	0,0000	0,2503
Potencial de água subterrânea	Baixo	0,0000	0,0000	1,0000
	Médio	0,0000	1,0000	0,0000
	Alto	1,0000	0,0000	0,0000

Fonte: Os autores

O Perfil B apresenta 80 topos que possuem como características principais, a morfologia arredondada, com predomínio da ocupação urbana, e geologia permeável. Todos os topos desse perfil não possuem proteção, nem falhas ou contatos, além de médio potencial de água subterrânea. Os topos do Perfil B foram chamados ‘topos esculturais de alta permeabilidade’.

O Perfil C não apresenta uma caracterização bem definida a partir das variáveis avaliadas, abrangendo os topos que não se inserem nos dois perfis anteriores. Destaca-se nesse caso, que todos os topos do Perfil C são arredondados, com média permeabilidade e baixo potencial de água subterrânea. A maioria dos elementos desse grupo é ocupada e não possui proteção por parques. Os 16 topos deste tipo foram denominados de ‘topos de baixo potencial hidrogeológico’.

O resultado gráfico da tipologia é apresentado na Figura 2. Reafirma-se que os topos híbridos possuem simultaneamente características de mais de um tipo. Além disso, a inserção de um topo em um perfil, não impede que ele possua alguma semelhança com os demais. Porém, para os parâmetros aqui utilizados, seu grau de pertencimento aos demais tipos não ultrapassa 0,3.

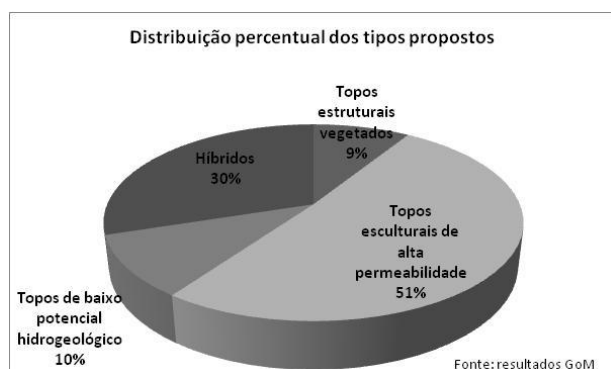


Figura 2: Distribuição percentual dos tipos propostos pelo método *Grade of Membership*
Fonte: Resultados GoM.

5.2 Classificação

A partir da resposta do grau de pertencimento de cada topo a cada perfil ideal criado, foi calculado um índice que sintetiza a eficiência na recarga potencial dos aquíferos. Os resultados dos g_{ik} de cada topo, bem como os índices resultantes e a classificação proposta são apresentados no Quadro 4.

Quadro 4: Grau de pertencimento dos topos aos perfis puros criados, índice de eficiência na recarga e classificação proposta

TOPO	Perfil A	Perfil B	Perfil C	I_r	CLASSE
1	0,469	0,156	0,375	0,453	Média
2	0,500	0,000	0,500	0,500	Média

3	0,312	0,313	0,375	0,531	Média
4	0,146	0,729	0,125	0,490	Média
5	0,375	0,250	0,375	0,500	Média
6	0,125	0,501	0,375	0,625	Média-Alta
7	0,250	0,500	0,250	0,500	Média
8	0,250	0,500	0,250	0,500	Média
9	0,125	0,501	0,375	0,625	Média-Alta
10	0,187	0,188	0,625	0,719	Média-Alta
11	0,750	0,125	0,125	0,188	Baixa
12	0,625	0,125	0,250	0,312	Média-Baixa
13	0,625	0,250	0,125	0,250	Média-Baixa
14	0,125	0,375	0,501	0,688	Média-Alta
15	0,125	0,374	0,501	0,688	Média-Alta
16	0,250	0,250	0,500	0,625	Média-Alta
17	0,375	0,125	0,500	0,562	Média
18	0,500	0,125	0,375	0,438	Média
19	0,500	0,375	0,125	0,312	Média-Baixa
20	0,375	0,500	0,125	0,375	Média-Baixa
21	0,375	0,375	0,250	0,437	Média
22	0,500	0,250	0,250	0,375	Média-Baixa
23	0,375	0,375	0,250	0,437	Média
24	0,500	0,250	0,250	0,375	Média-Baixa
25	0,625	0,250	0,125	0,250	Média-Baixa
26	0,625	0,250	0,125	0,250	Média-Baixa
27	0,625	0,250	0,125	0,250	Média-Baixa
28	0,625	0,250	0,125	0,250	Média-Baixa
29	0,625	0,250	0,125	0,250	Média-Baixa
30	0,750	0,125	0,125	0,188	Baixa
31	0,750	0,125	0,125	0,188	Baixa
32	0,750	0,125	0,125	0,188	Baixa
33	0,500	0,375	0,125	0,312	Média-Baixa
34	0,334	0,167	0,500	0,583	Média
35	0,450	0,300	0,250	0,400	Média
36	0,125	0,250	0,625	0,750	Média-Alta
37	0,600	0,150	0,250	0,325	Média-Baixa
38	0,250	0,500	0,250	0,500	Média
39	0,450	0,300	0,250	0,400	Média
40	0,500	0,250	0,250	0,375	Média-Baixa
41	0,500	0,125	0,375	0,438	Média
42	0,625	0,250	0,125	0,250	Média-Baixa
43	0,375	0,500	0,125	0,375	Média-Baixa
44	0,750	0,125	0,125	0,188	Baixa
45	0,375	0,375	0,250	0,437	Média
46	0,500	0,250	0,250	0,375	Média-Baixa
47	0,375	0,375	0,250	0,438	Média
48	0,376	0,500	0,125	0,375	Média-Baixa
49	0,625	0,125	0,250	0,312	Média-Baixa
50	0,584	0,291	0,125	0,271	Média-Baixa
51	0,625	0,250	0,125	0,250	Média-Baixa
52	0,625	0,250	0,125	0,250	Média-Baixa
53	0,583	0,292	0,125	0,271	Média-Baixa
54	0,600	0,150	0,250	0,325	Média-Baixa
55	0,584	0,291	0,125	0,271	Média-Baixa
56	0,714	0,286	0,000	0,143	Baixa
57	0,625	0,250	0,125	0,250	Média-Baixa
58	0,571	0,429	0,000	0,214	Média-Baixa
59	0,375	0,250	0,375	0,500	Média
60	0,625	0,000	0,375	0,375	Média-Baixa
61	0,156	0,469	0,375	0,609	Média-Alta
62	0,469	0,156	0,375	0,453	Média
63	0,469	0,156	0,375	0,453	Média
64	0,300	0,450	0,250	0,475	Média
65	0,500	0,000	0,500	0,500	Média
66	0,469	0,156	0,375	0,453	Média
67	0,500	0,000	0,500	0,500	Média
68	0,312	0,313	0,375	0,531	Média
69	0,600	0,150	0,250	0,325	Média-Baixa
70	0,714	0,286	0,000	0,143	Baixa

71	0,729	0,146	0,125	0,198	Baixa
72	0,857	0,143	0,000	0,071	Baixa
73	0,714	0,286	0,000	0,143	Baixa
74	0,857	0,143	0,000	0,071	Baixa
75	0,625	0,125	0,250	0,313	Média-Baixa
76	0,625	0,125	0,250	0,313	Média-Baixa
77	0,625	0,125	0,250	0,313	Média-Baixa
78	0,500	0,250	0,250	0,375	Média-Baixa
79	0,500	0,250	0,250	0,375	Média-Baixa
80	0,625	0,125	0,250	0,313	Média-Baixa
81	0,625	0,125	0,250	0,313	Média-Baixa
82	0,625	0,125	0,250	0,312	Média-Baixa
83	0,500	0,250	0,250	0,375	Média-Baixa
84	0,500	0,250	0,250	0,375	Média-Baixa
85	0,500	0,250	0,250	0,375	Média-Baixa
86	0,500	0,250	0,250	0,375	Média-Baixa
87	0,125	0,625	0,250	0,562	Média
88	0,250	0,500	0,250	0,500	Média
89	0,500	0,250	0,250	0,375	Média-Baixa
90	0,500	0,250	0,250	0,375	Média-Baixa
91	0,500	0,250	0,250	0,375	Média-Baixa
92	0,250	0,375	0,375	0,563	Média
93	0,500	0,250	0,250	0,375	Média-Baixa
94	0,625	0,125	0,250	0,313	Média-Baixa
95	0,625	0,125	0,250	0,313	Média-Baixa
96	0,375	0,375	0,250	0,438	Média
97	0,375	0,375	0,250	0,437	Média
98	0,500	0,250	0,250	0,375	Média-Baixa
99	0,500	0,250	0,250	0,375	Média-Baixa
100	0,250	0,375	0,375	0,563	Média
101	0,000	0,625	0,375	0,688	Média-Alta
102	0,625	0,125	0,250	0,313	Média-Baixa
103	0,500	0,250	0,250	0,375	Média-Baixa
104	0,375	0,375	0,250	0,437	Média
105	0,375	0,375	0,250	0,438	Média
106	0,375	0,375	0,250	0,438	Média
107	0,500	0,250	0,250	0,375	Média-Baixa
108	0,500	0,125	0,375	0,437	Média
109	0,500	0,250	0,250	0,375	Média-Baixa
110	0,625	0,125	0,250	0,313	Média-Baixa
111	0,500	0,250	0,250	0,375	Média-Baixa
112	0,125	0,625	0,250	0,563	Média
113	0,250	0,500	0,250	0,500	Média
114	0,500	0,250	0,250	0,375	Média-Baixa
115	0,500	0,250	0,250	0,375	Média-Baixa
116	0,500	0,250	0,250	0,375	Média-Baixa
117	0,500	0,250	0,250	0,375	Média-Baixa
118	0,375	0,250	0,375	0,500	Média
119	0,250	0,250	0,500	0,625	Média-Alta
120	0,250	0,375	0,375	0,563	Média
121	0,250	0,250	0,500	0,625	Média-Alta
122	0,375	0,250	0,375	0,500	Média
123	0,500	0,250	0,250	0,375	Média-Baixa
124	0,500	0,250	0,250	0,375	Média-Baixa
125	0,625	0,125	0,250	0,313	Média-Baixa
126	0,250	0,375	0,375	0,563	Média
127	0,625	0,125	0,250	0,313	Média-Baixa
128	0,500	0,250	0,250	0,375	Média-Baixa
129	0,500	0,250	0,250	0,375	Média-Baixa
130	0,500	0,250	0,250	0,375	Média-Baixa
131	0,625	0,125	0,250	0,313	Média-Baixa
132	0,250	0,500	0,250	0,500	Média
133	0,500	0,125	0,375	0,437	Média
134	0,500	0,250	0,250	0,375	Média-Baixa
135	0,500	0,125	0,375	0,437	Média
136	0,500	0,250	0,250	0,375	Média-Baixa
137	0,250	0,375	0,375	0,563	Média
138	0,375	0,375	0,250	0,437	Média

139	0,500	0,250	0,250	0,375	Média-Baixa
140	0,500	0,250	0,250	0,375	Média-Baixa
141	0,500	0,250	0,250	0,375	Média-Baixa
142	0,500	0,250	0,250	0,375	Média-Baixa
143	0,625	0,125	0,250	0,313	Média-Baixa
144	0,375	0,375	0,250	0,438	Média
145	0,500	0,250	0,250	0,375	Média-Baixa
146	0,500	0,250	0,250	0,375	Média-Baixa
147	0,500	0,250	0,250	0,375	Média-Baixa
148	0,375	0,500	0,125	0,375	Média-Baixa
149	0,625	0,250	0,125	0,250	Média-Baixa
150	0,750	0,125	0,125	0,188	Baixa
151	0,500	0,250	0,250	0,375	Média-Baixa
152	0,500	0,250	0,250	0,375	Média-Baixa
153	0,625	0,125	0,250	0,313	Média-Baixa
154	0,375	0,375	0,250	0,437	Média
155	0,250	0,375	0,375	0,563	Média
156	0,250	0,375	0,375	0,563	Média
157	0,375	0,375	0,250	0,437	Média

Fonte: Resultados GoM.

A média dos índices foi consideravelmente baixa: 0,395. O desvio padrão foi 0,126, 32% em relação à média.

As classes de eficiência foram delimitadas a partir dos quantis de Ir , sendo: Alta ($Ir \geq 0,8$); Média-alta ($0,8 > Ir \geq 0,6$); Média ($0,6 > Ir \geq 0,4$); Média-baixa ($0,4 > Ir \geq 0,2$); Baixa ($Ir \leq 0,2$).

Desse modo, 12 topos foram considerados de baixa eficiência; 82 de eficiência média-baixa; 52 de eficiência média; 11 de eficiência média-alta; e nenhum topo teve como resultado alta eficiência para a recarga subterrânea. Na Figura 3 apresenta-se a distribuição dos resultados por classe.

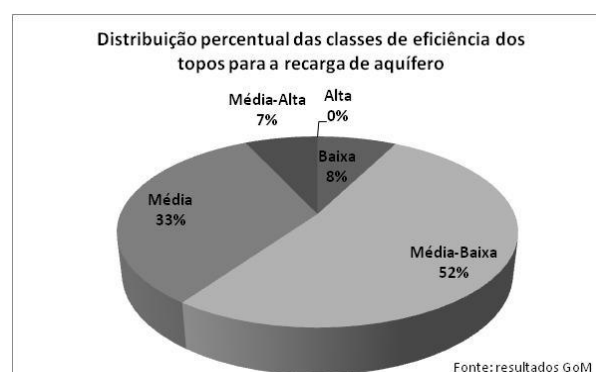


Figura 3: Distribuição percentual das classes de eficiência dos topos para a recarga de aquífero
Fonte: Resultados GoM.

A espacialização dos resultados é apresentada na Figura 4 e a sua distribuição não é homogênea. Os poucos topos que se destacam com eficiência média-alta estão

distribuídos em porções do município com baixa densidade de ocupação urbana (como o extremo nordeste) ou em áreas total ou

parcialmente protegidas por unidades de conservação (incluindo as serras do Quadrilátero Ferrífero, ao sul do município).

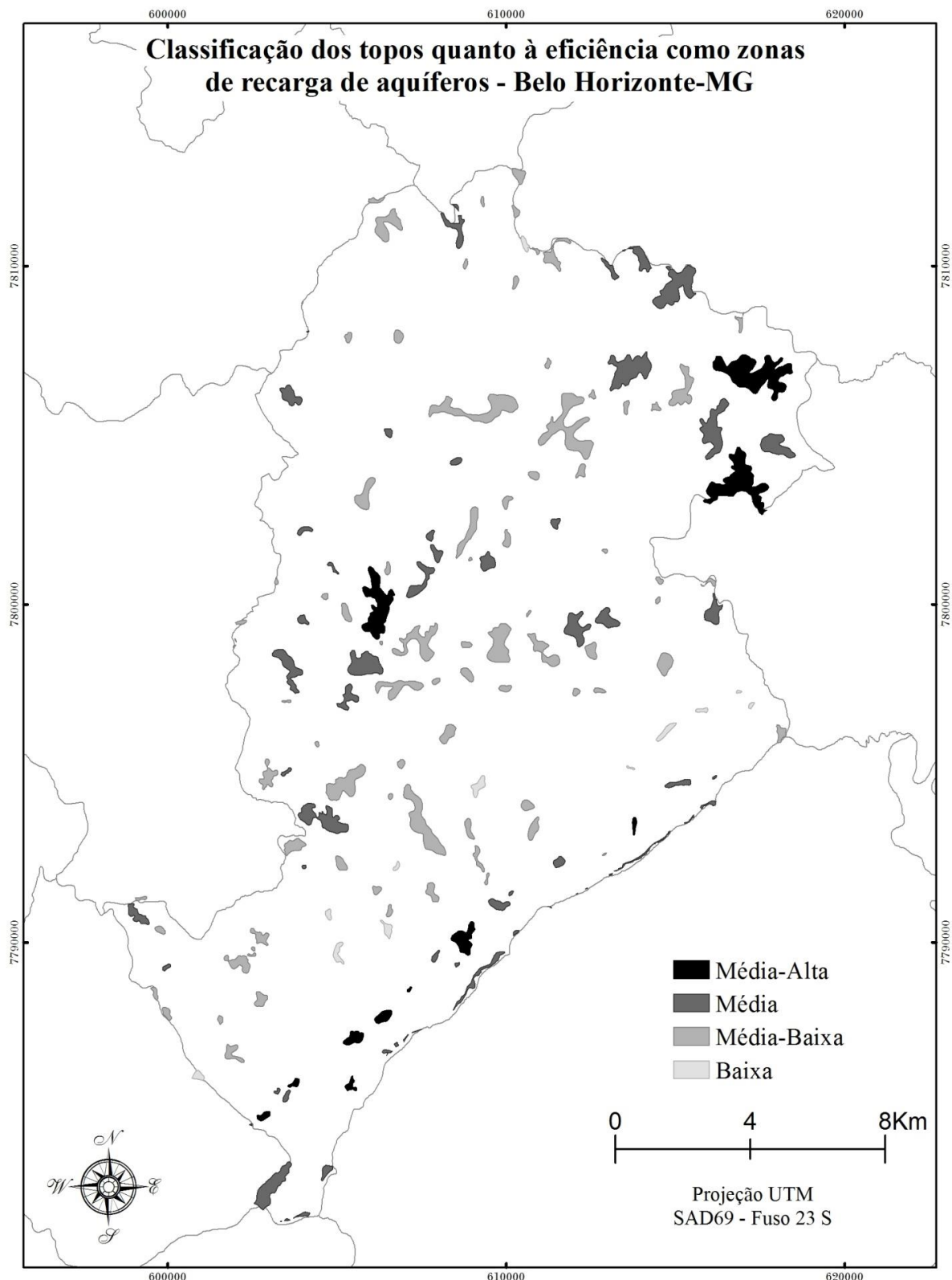


Figura 4: Eficiência dos topos como zonas de recarga pelo método *Grade of Membership*

Fonte: Resultados GoM. Bases cartográficas PBH.

A porção central do município – correspondente ao interflúvio das bacias dos ribeirões Arrudas e Onça – apresenta, em seu conjunto, topos na classe média e média-baixa. Tal característica se deve ao intenso percentual de ocupação nessa porção, que inclui a periferia norte do hipercentro de Belo Horizonte.

A faixa sul-sudeste, caracterizada pelo sistema aquífero de menor potencial hidráulico – Grupo Sabará – apresentou os piores resultados de eficiência de recarga. As baixas capacidades naturais de armazenamento e transmissividade do aquífero foram parcialmente responsáveis por esse cenário, associadas à elevada densidade de ocupação urbana.

Desse modo, é possível afirmar que o principal fator limitante da recarga é, de fato, a ocupação urbana. Quando essa cobertura superficial associa-se com outro parâmetro comprometedora da recarga, como a morfologia dos topos ou o potencial de água subterrânea, os resultados são ruins. Esse cenário é um reflexo da distribuição da frequência relativa desse parâmetro no modelo, posto que a grande maioria dos topos encontra-se ocupada pela mancha urbana.

Isso reflete a vulnerabilidade da recarga subterrânea em Belo Horizonte. A inexistência de topos de classe alta é sinal de preocupação. O domínio hidrogeológico do Grupo Sabará é singularmente problemático, já que além do baixo potencial subterrâneo, muitas de suas zonas de recarga possuem baixa eficiência, estando, portanto, comprometidas.

A espacialização dos resultados pode ser uma fonte de informações para a gestão integrada dos recursos hídricos em Belo Horizonte. Os topos com melhor eficiência devem ser priorizados para a manutenção de suas condições geográficas (sobretudo em termos de ocupação). Já aqueles em situação crítica, devem ser priorizados para ações de melhoria nas condições de recarga, por exemplo, na implantação de estruturas de indução artificial de infiltração.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O GoM não é um método de amplo conhecimento nas ciências ambientais, sobretudo no Brasil. Desse modo, ao mesmo tempo em que se exigem mais estudos para verificar sua eficiência nesse ramo do conhecimento, abrem-se as portas para investigações que rompam o paradigma de classificações e tipologias monovariadas e quantitativas.

A aplicação do GoM na avaliação dos topos como zonas de recarga de aquíferos pode referenciar e embasar futuros trabalhos ambientais de cunho metodológico semelhante. Porém, vislumbram-se trabalhos futuros com a missão de refinar as possibilidades de modelagem, bem como de validação dos procedimentos propostos a partir de mensurações de campo.

A tipologia resultante desse trabalho agrupa os topos em três perfis: ‘topos estruturais vegetados, topos esculturais de alta permeabilidade e topos de baixo potencial hidrogeológico’. Porém, a nebulosidade dos dados ficou evidente em 30% dos casos, em que não foi possível a adequação com clareza a qualquer dos perfis estabelecidos.

Acredita-se que um aumento no número de variáveis possa contribuir para a melhoria do ajuste do modelo. Além disso, variáveis limitantes determinadas a priori também podem ser incluídas, como a impermeabilização do solo. Porém, ressalta-se a dificuldade de se encontrar tais dados disponíveis na escala regional.

Por outro lado, a classificação gerada a partir do indicador de recarga obtido dos escores de pertencimentos a perfis de tipos puros apresentou um resultado mais aplicável na gestão ambiental, uma vez que proporciona a definição de um índice.

A capacidade da recarga potencial pelos topos em Belo Horizonte está evidentemente comprometida. Aproximadamente 60% dos topos possuem eficiência média-baixa a baixa. A média dos índices de eficiência foi de 0,395, sendo consideravelmente baixa.

Além da avaliação da classe em que se encontram os topos, é possível interpretar os fatores limitantes para a recarga e a distribuição espacial dos resultados. O principal fator limitante é a ocupação urbana, que prejudica a infiltração da água no solo. Além disso, características naturais como a baixa permeabilidade do Grupo Sabará, também comprometem a recarga.

Por fim, o trabalho permite testar uma nova abordagem metodológica de investigação das questões ambientais e geográficas, com um enfoque multivariado e sem a segregação dos elementos dos quadros físico e natural. Longe de definir novos paradigmas metodológicos, espera-se estimular a reflexão acerca da interpretação dos fenômenos a partir de uma multiplicidade de variáveis no escopo da epistemologia atual.

REFERÊNCIAS

- ALVES, L. C.; LEITE, I. C.; MACHADO, C. J. Perfis de saúde dos idosos no Brasil: análise da Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios de 2003 utilizando o método *Grade of Membership*. **Cadernos de Saúde Pública**, Rio de Janeiro, v. 24, n. 3, p. 535-546, 2008.
- BEATO, D. A. C. (Coord.). **Estudo hidrogeológico da Bacia da Pampulha**: relatório final. Belo Horizonte: CPRM/PBH, 2001.
- BELO HORIZONTE. **Plano diretor de Belo Horizonte**: lei de uso e ocupação do solo, estudos básicos. Belo Horizonte: [s.n.], 1995.
- BRANDÃO, V. S. et al. **Infiltração da água no solo**. 3. ed. Viçosa: UFV, 2006.
- CERQUEIRA, C. A. **Tipologia e características dos estabelecimentos escolares brasileiros**. 2004. 294f. Tese (Doutorado)-Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.
- CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de sistemas ambientais**. São Paulo: Edgard Blucher, 1999.
- COSTA, W. D. **Caracterização das condições de uso e preservação das águas subterrâneas do município de Belo Horizonte – MG**. 2002. 450f. Tese (Doutorado)-Universidade de São Paulo, 2002.
- DAVIS, S. N. **Hidrogeology**. New York: [s.n.], 1966.
- FELIPPE, M. F. **Espacialização e classificação dos topos como zonas preferenciais de recarga de aquíferos em Belo Horizonte-MG**. Monografia (Graduação)-Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.
- FELIPPE, M. F. et al. Evolução da ocupação urbana das zonas preferenciais de recarga de aquíferos de Belo Horizonte-MG. **Revista de Geografia - UFJF**, Juiz de Fora, v. 2, n.1, p. 1-9, 2011.
- FETTER, C. W. **Applied hydrogeology**. 3. ed. New Jersey: Prentice Hall, 1994.
- GARCIA, R. A.; SOARES-FILHO, B.; SAWYER, D. O. Dimensões sócio-econômicas e movimentos populacionais: uma regionalização da Amazônia brasileira. In: ENCONTRO NACIONAL DE ESTUDOS POPULACIONAIS, 14., 2004, Caxambu. **Anais...** Caxambu: ABEP, 2004. http://www.abep.org.br/usuario/GerenciaNavegacao.php?caderno_id=030&nivel=1
- GASPAR, M. T. P.; CAMPOS, J. E. G.; CADAMURO, A. L. M. Condições de infiltração em solos na região de recarga do sistema aquífero Urucuia no oeste da Bahia sob diferentes condições de usos. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 37, n. 3, p. 542-550, 2007.
- HARRIS, A. L. N. C. **Metodologias baseadas na Teoria dos Sistemas Nebulosos (Fuzzy Systems Theory) para o tratamento das informações subjetivas do Projeto Arquitetônico**. 1999. 160f. Tese (Doutorado)-Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.
- MANTON, K.; WOODBURY, M.; TOLLEY, D. **Statistical applications using fuzzy sets**. [S.l.]: Wiley, 1994.

MOURA, H. S. Habitação e produção do espaço em Belo Horizonte. In: MONTE-MÓR, R. L. M. (Coord.). **Belo Horizonte: espaços e tempos em construção**. Belo Horizonte: Cedeplar/PBH, 1994. p. 51-77.

SANTORO, J. et al. Estimativa da recarga do aquífero freático na bacia do Rio Una, no município de Taubaté, SP. **Revista Ambiente & Água**, Taubaté, v. 2, n. 1, p. 57-82, 2007.

SANTOS, R. M.; KOIDE, S. Mapeamento da recarga de águas subterrâneas a partir da regionalização de estimativas pontuais via regressão múltipla espacial. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15., 2001, Curitiba. **Anais...** Curitiba: INPE, 2011. p. 5386-5393.

SILVA, A. B. et al. **Estudos geológicos, hidrogeológicos, geotécnicos e geoambientais integrados no município de Belo Horizonte**: projeto estudos técnicos para o levantamento da carta geológica do município de Belo Horizonte. Belo Horizonte: Fundep/UFMG-IGC, 1995. Relatório final.

SOARES, P. V. **As interrelações de elementos do meio físico natural e modificado na definição de áreas potenciais de infiltração na porção paulista da bacia do rio Paraíba do Sul**. 2005. 192f. Tese (Doutorado)-Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

SWYNGEDOUW, E. **Social power and the urbanization of water**: flows of power. [S.l.]: Hardback, 2004.

TODD, D. K.; MAYS, L. W. **Groundwater hydrology**. Hoboken: Willey, 2005.

WARD, A.; TRIMBLE, S. **Environmental hydrology**. 2. ed. Boca Raton: Lewis Publishers, 2004.

ZUQUETTE, L. V.; PALMA, J. B. Avaliação da condutividade hidráulica em área de recarga do aquífero Botucatu. **Revista da Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 59, n. 1, p. 1-7, 2006.

Data de submissão: 28.05.2012

Data de aceite: 17.09.2012