

UTILIZAÇÃO DO MÉTODO *GRADE OF MEMBERSHIP* (GoM) NA CLASSIFICAÇÃO DA EFICIÊNCIA AMBIENTAL DE ZONAS DE RECARGA DE AQUIFEROS EM BELO HORIZONTE-MG

Miguel Fernandes Felipe¹; Antônio Pereira Magalhães Junior² & Ricardo Alexandrino Garcia²

RESUMO --- O objetivo principal deste trabalho é verificar a possibilidade e a validade da utilização do método *Grade of Membership* (GoM) na caracterização ambiental dos topos de Belo Horizonte, enquanto zonas de recarga de aquíferos. A metodologia foi baseada na comparação dos resultados obtidos em uma classificação pelo método GoM com uma pré-existente realizada pela interpretação de uma matriz qualitativa. As mesmas oito variáveis dos topos foram utilizadas nesses métodos. Os resultados mostram que ambos os métodos consideram que a recarga de aquíferos em Belo Horizonte está prejudicada pela intensa ocupação humana e por limitações naturais do ambiente. Assim, praticamente 84% dos topos têm a mesma classificação em ambos os métodos, o que demonstra uma congruência significativa. Consequentemente, acredita-se que o GoM é um método muito útil para as ciências ambientais, capaz de responder a questões que não podem ser clarificadas pelos procedimentos tradicionais.

ABSTRACT --- This work aims to verify the possibilities and the legitimacy of utilization of *Grade of Membership* (GoM) method in the hilltops classification as aquifer recharge zones. The study unit is the municipality of Belo Horizonte, MG, Brazil. The methodology was based in the comparison of the results of the GoM classification with a previous classification made through the interpretation of a qualitative matrix. The same eight environmental variables of the hilltops were used in these methods. The results show that both of the methods consider that the aquifer recharge in Belo Horizonte is harmed by the intense human occupation, and by natural limitations of environment. Therefore, almost 84% of the hilltops have the same classification in both of the methods, what shows a significant congruence. Consequently, it is believed that GoM is a useful method for environmental sciences, capable of answer questions that could not be answered by traditional procedures.

Palavras-chave: Zonas de recarga de aquíferos, *Grade of Membership*, Belo Horizonte-MG.

¹ Mestrando em Geografia e Análise Ambiental – IGC/UFMG – felippegeo@yahoo.com.br.

² Professores Adjuntos do Departamento de Geografia – IGC/UFMG – magalhaesufmg@yahoo.com.br; alexandrinogarcia@gmail.com.

1. INTRODUÇÃO

O planejamento ambiental das águas urbanas no Brasil é comumente restrito à drenagem pluvial e ao esgotamento sanitário. Raros são os esforços de integrar, na abordagem do meio urbano, os processos 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).

Belo Horizonte pode ser considerado uma exceção à regra brasileira. O município possui um Plano Diretor de Drenagem considerado um dos mais completos do País. Além das tradicionais questões de saneamento ambiental e drenagem urbana, são incluídos projetos de recuperação ambiental *latu sensu*. Porém, ainda muitas questões de primeira importância em termos de águas urbanas permanecem ocultas.

A recarga subterrânea só é tratada como consequência de ações de controle de inundações, como na exigência de 20% de área não edificada nos lotes urbanos e na proposta de bacias de contenção. Porém, há carência de estudos direcionados à melhoria nas condições de recarga subterrânea, processo extremamente prejudicado pela impermeabilização do solo.

Essa lacuna tanto no planejamento urbano-ambiental, quanto no meio acadêmico, exige grandes esforços para ser preenchida. Trata-se de uma necessidade multidisciplinar de estudos focados em como ampliar a recarga subterrânea. Todavia, para tanto é necessário primeiro compreender a dinâmica do processo de recarga, quais são seus condicionantes e quais são as especificidades do local que contribuem ou prejudicam a realimentação das águas subterrâneas.

Assim, o objetivo principal deste trabalho é verificar a possibilidade e a validade da utilização do método *Grade of Membership* (GoM) na caracterização ambiental dos topos de Belo Horizonte, enquanto zonas de recarga de aquíferos. Permite-se, desse modo, identificar os principais fatores controladores do processo, bem como aqueles que o restringem.

Para tanto, busca-se criar uma tipologia dessas unidades morfológicas a partir de suas características ambientais (físicas e humanas) a fim de possibilitar uma identificação mais clara do comportamento hidrológico dos topos. Como forma de validar a metodologia utilizada, bem como avaliar sua aplicabilidade, foi realizada uma comparação dos resultados da classificação dos topos pelo GoM com uma classificação qualitativa realizada previamente por Felipe e Magalhães Jr. (2007), posto que é um método relativamente novo e ainda pouco explorado pelas ciências.

2. BASES TEÓRICO-CONCEITUAIS

2.1 Topos: 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. Não obstante, existem recortes espaciais que são mais eficazes na recarga dos aquíferos, ou seja, são zonas preferenciais.

A espacialização dessas zonas é determinada pela dinâmica dos fluxos subterrâneos e, por consequência, pelo potencial hidráulico. As zonas de recarga caracterizam-se por elevada energia hidráulica potencial, contrariamente às zonas de descarga.

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 preferencialmente do tipo livre a semi-confinado (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 aqui considerados como zonas preferenciais de recarga de aquíferos.

Sabendo-se que a infiltração, a percolação, a transmissão e o armazenamento são os principais processos na efetivação da recarga, o primeiro esforço para a 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 com o máximo de detalhe possível do quadro geográfico da unidade de estudo.

A capacidade de infiltração de um meio é determinada por uma conjuntura de elementos entre os quais se destacam as propriedades do solo, as características da cobertura superficial 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).

A dinâmica da água em sub-superfície é traduzida pelos processos de transmissão e armazenamento. A diferenciação dos aquíferos se configura, essencialmente, em relação à sua porosidade, permeabilidade e capacidade de armazenamento. Neste sentido, características litológicas, como a granulometria, e estruturais, como a existência de falhas, fraturas ou outras discontinuidades, são ímpares para a determinação da transmissividade e armazenamento (Todd; Mays, 2005). No caso de Belo Horizonte, a importância dos mantos de intemperismo que revestem os substratos cristalinos também deve ser considerada (Beato, 2001).

2.2 O método *Grade of Membership*

Os procedimentos estatísticos clássicos sempre apresentaram impedimentos quanto a sua utilização nas ciências ambientais, sobretudo na Geografia. A exigência de quantificação dos

fenômenos em estudo por esses métodos inviabiliza a utilização de uma série de informações que são, em princípio, 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 *et al*, 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 recentemente por Manton *et al* (1994), extrapola a teoria tradicional dos conjuntos que dicotomiza a relação de pertencimento, permitindo com isso uma interpretação fluida e dinâmica entre o elemento em questão e suas características. Assim, o GoM é um método de estimação estatística de máxima verossimilhança que se baseia na teoria dos conjuntos nebulosos em que um mesmo elemento pode se inserir, simultaneamente, em diversos conjuntos, apresentando graus de pertencimento distintos em relação a esses (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, seja uma tipologia ou uma classificação. A soma dos escores de um mesmo elemento para seus diversos perfis é 1. 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 GoM para cada unidade de estudo permite a representação da heterogeneidade entre as mesmas, dentro de cada perfil gerado (Cerqueira, 2004). Essa característica coloca vantagens comparativas do GoM em relação às metodologias mais comuns como a Análise de Cluster e a Análise Discriminante, que apresentam problemas com a heterogeneidade dos indivíduos. Todavia, o GoM lida com o agrupamento e a 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. Tal característica facilita os estudos ambientais, pois a maior parte de suas variáveis é, por natureza, qualitativa; ademais, variáveis quantitativas também podem ser usadas ao serem classificadas (categorizadas). Destarte, é na geração agrupamentos dos elementos em função da proximidade de suas características que o GoM permite a construção de tipologias (Alves *et al*, 2004; 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*, 2004). 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.

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

Dessa forma, o método pode contribuir para o estudo dos topos como zona de recarga de aquíferos ao permitir a criação de uma tipologia multivariada para os topos. 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.

3. CLASSIFICAÇÃO DOS TOPOS COMO ZONAS DE RECARGA DE AQUÍFEROS: PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A primeira etapa de qualquer tipo de modelagem deve ser a seleção das variáveis utilizadas respeitando-se os critérios de seletividade, simplicidade e analogia, bem como a disponibilidade dos dados (Christofoletti, 1999). Para possibilitar a comparação dos resultados apresentados a partir das duas metodologias (matriz qualitativa e GoM) as variáveis utilizadas por Felipe e Magalhães Jr. (2007) foram preservadas para esta proposta, bem como suas bases de dados. Reafirma-se, porém, que as variáveis selecionadas comungam com os critérios acima.

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 nascentes*, 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; 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) *uso do solo*, verificado em imagens CBERS-2.

As respostas de cada uma das variáveis foram, então, categorizadas em função da contribuição dessas para a recarga subterrânea. Esse procedimento é essencial pra a utilização dos métodos propostos. Assim, em todas as variáveis foram criadas três categorias de respostas qualitativamente distintas denominadas “0”, “1” e “2”, respectivamente para as respostas que contribuiriam teoricamente de forma ruim, razoável ou boa, respectivamente³.

O QUADRO 1 apresenta o resumo das oito variáveis estudadas, associando as possíveis respostas que poderiam aparecer com sua respectiva categorização.

3.1 Classificação pelo método da matriz qualitativa

Os procedimentos utilizados por Felipe e Magalhães Jr. (2007) foram organizados de forma a permitir uma classificação que distinguisse a influência dos processos de infiltração/percolação e armazenamento/transmissão na eficiência dos topos. Em um segundo momento, um cruzamento dessas primeiras respostas produziu uma classificação geral da eficiência dessas zonas para a recarga dos aquíferos.

Para abranger os processos de infiltração/percolação foram selecionadas as variáveis: i) morfologia do topo; ii) cobertura superficial; iii) permeabilidade; iv) proteção por parques. As demais variáveis foram utilizadas para a classificação quanto ao armazenamento/transmissão: i) número de descontinuidades geológicas; ii) espessura do manto de intemperismo; iii) número de nascentes; iv) potencial de água subterrânea.

³ Nota-se que esses valores não correspondem a pesos, mas sim ao identificador da qualificação realizada.

A soma dos valores atribuídos a cada variável foi realizada, agrupando os topos em três classes de eficiência na infiltração/percolação e armazenamento/transmissão: “alta” – 6 a 8; “média” – 3 a 5; e “baixa” – 0 a 2. Como resposta, para a infiltração/percolação, foram obtidas 14 zonas de recarga baixa eficiência, 126 de média e 17 de alta eficiência. Para os processos de armazenamento/transmissão, as zonas de recarga de baixa eficiência totalizaram 104, 47 foram consideradas de média eficiência e apenas 6 de alta.

O segundo passo foi unir essas duas classificações em uma única que abarcasse todos os processos e alcançasse a recarga subterrânea. As informações obtidas foram cruzadas tendo por modelo o QUADRO 2.

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

VARIÁVEL / QUALIFICAÇÃO	BOM (2)	RAZOÁVEL (1)	RUIM (0)
<i>Morfologia do topo</i>	arredondado	crista	-
<i>Cobertura Superficial</i>	vegetada	semi-vegetada	ocupada
<i>Proteção por parques</i>	integral	parcial	ausente
<i>Permeabilidade (geologia)</i>	Formação Cercadinho	Grupo Sabará	
	Formação Cauê	Formação Gandarela	Máficas e Ultra-máficas
	Formação Taboões	Formação Barreiro	
	Complexo Belo Horizonte	Formação Fecho do Funil	
<i>Nº de nascentes</i>	mais de 5	1 a 4	0
<i>Profundidade do manto</i>	superior a 40 metros	21 a 40 metros	inferior a 20 metros
<i>Potencial de água subterrânea</i>	alto	médio	baixo
<i>Nº de fraturas</i>	mais de 2	1	0

Quadro 2: Cruzamento das informações de eficiência de recarga nos grupos de processos para classificação final

		Infiltração/Percolação		
		Alta	Média	Baixa
Armazenamento/ Transmissividade	Alta	Alta	Média-Alta	Média
	Média	Média-Alta	Média	Média-Baixa
	Baixa	Média	Média-Baixa	Baixa

3.2 Classificação pelo método GoM

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 classificação dos topos pelo método GoM também foi realizada em função da eficiência destes como zonas de recarga de aquíferos. O procedimento consiste em criar uma tipologia em que os perfis são previamente determinados como “bons” (favoráveis) ou “ruins” (desfavoráveis) em relação à eficiência na recarga.

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”. Assim, de acordo com a inserção dos topos nos respectivos tipos puros, eles seriam classificados.

Dessa maneira, fixam-se as características “ideais” para cada variável em uma matriz de controle que é inserido do arquivo-base do GoM. Essa matriz que indica para cada perfil, qual é a resposta esperada. Os perfis são estáticos e apenas os elementos são posicionados em relação ao grau de pertencimento que possuem com cada perfil.

A determinação do número de perfis desejados foi condicionada pela categorização das variáveis da matriz de entrada. Como a qualificação foi estabelecida em três características (“boas”, “razoáveis” ou “ruins” para a recarga subterrânea), foram criados três perfis de topos.

Assim o Perfil A é um “tipo puro” em que todas as variáveis possuem as piores características para a recarga (ver QUADRO1). Por outro lado, o Perfil C é um “tipo puro” em que todas as variáveis apresentam as melhores características para a recarga subterrânea (ver QUADRO 1). Por fim, o Perfil B é considerado intermediário em todas as variáveis.

O QUADRO 3 apresenta a matriz final de agrupamento das variáveis utilizadas e suas características em função dos 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 nele deve sempre ser exatamente zero ou um.

A inserção dos topos nos perfis puros criados, tendo por base a teoria dos conjuntos nebulosos, é determinada pelo grau de pertencimento que este elemento possui (g_{ik}). Como os tipos foram determinados *a priori*, em média o g_{ik} obtido foi consideravelmente baixo. Considerando um 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.

Quadro 3: 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 Superficial	Ocupada	1,0000	0,0000	0,0000
	Semi-Vegetada	0,0000	1,0000	0,0000
	Vegetada	0,0000	0,0000	1,0000
Geologia	Máficas	1,0000	0,0000	0,0000
	Sabará, Gandarela, Barreiro e Fecho do Funil	0,0000	1,0000	0,0000
	Cercadinho, Cau, Taboos e Complexo Belo Horizonte	0,0000	0,0000	1,0000
Proteo por Parques	Não	1,0000	0,0000	0,0000
	Parcialmente	0,0000	1,0000	0,0000
	Sim	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
	2-5	0,0000	0,0000	1,0000
Espessura do Manto de Intemperismo (m)	0-20	1,0000	0,0000	0,0000
	21-40	0,0000	1,0000	0,0000
	41-70	0,0000	0,0000	1,0000
Número de Nascentes	0	1,0000	0,0000	0,0000
	1-4	0,0000	1,0000	0,0000
	5-44	0,0000	0,0000	1,0000
Potencial de gua Subterrânea	Baixo	1,0000	0,0000	0,0000
	Médio	0,0000	1,0000	0,0000
	Alto	0,0000	0,0000	1,0000

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, de forma geral pode-se dizer que quanto maior o escore de pertencimento (g_{iC}) ao Perfil C, melhor a eficiência do topo. Entretanto, 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 (I) que pudesse auxiliar na classificao, os escores de pertencimento ao Perfil C e ao Perfil B foram considerados na seguinte equao:

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

Sob essa perspectiva, a classificao de um topo quanto a eficiência na recarga subterrânea fica condicionada 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} .

As classes de eficiência foram determinadas na mesma forma estipulada por Felipe e Magalhães Jr. (2007), delimitadas a partir dos quantis de I , sendo: Alta ($I \geq 0,8$); Média-alta ($0,8 > I \geq 0,6$); Média ($0,6 > I \geq 0,4$); Média-baixa ($0,4 > I \geq 0,2$); Baixa ($I \leq 0,2$).

4. DISCUSSÃO DA TÉCNICA: COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DAS CLASSIFICAÇÕES REALIZADAS

A classificação da eficiência dos topos como zonas de recarga em Belo Horizonte, proposta por Felipe e Magalhães Jr. (2007), foi realizada a partir do cruzamento de oito variáveis ambientais: morfologia, número de falhas e fraturas, número de nascentes, profundidade do manto de intemperismo, permeabilidade, proteção por unidades de conservação municipais (parques), potencial de água subterrânea e uso do solo. Os parâmetros selecionados foram qualificados em termos de sua contribuição para a recarga.

Os resultados obtidos com o método da matriz qualitativa indicam que apenas nove zonas de recarga são consideradas de baixa eficiência, enquanto 89 são de média-baixa. Na classe de média eficiência, encontram-se 47 zonas de recarga. Essa constatação corroborou a idéia de que Belo Horizonte possui sua realimentação subterrânea comprometida pelo processo de urbanização. Verifica-se uma situação nitidamente grave pelo baixo número de topos incluídos na classe média-alta, apenas 12. Ademais, nenhum topo foi enquadrado como de alta eficiência.

Por outro lado, o método GoM foi testado para o mesmo fim de classificação da eficiência dos topos como zonas de recarga. Perfis puros foram criados e o escore de pertencimento dos topos a esses perfis foi interpretado pela equação 2. Desse modo, 12 topos foram considerados de baixa eficiência; 82 de eficiência média-baixa; 52 topos de eficiência média; 11 de eficiência média-alta; e nenhum topo foi verificado como possuindo alta eficiência para a recarga subterrânea.

Na TAB. 1 apresenta-se a comparação dos resultados obtidos pelos dois métodos a partir da frequência de topos em cada classe de eficiência. De uma forma geral, o método GoM apresentou um aumento no número de topos da classe média-baixa que se refletiu na diminuição da frequência nas classes baixa e média. Por outro lado, esse método, também, colocou um topo a mais que o método da matriz qualitativa na classe média-alta. Nota-se, ademais, que os dois métodos utilizados não apresentaram nenhum topo de alta eficiência como zona de recarga.

Entretanto, as diferenças encontradas entre os métodos podem ser consideradas ligeiras. Dos 157 topos estudados, 83,44% mantiveram a mesma classificação em ambos os métodos. As

modificações ocorreram em 26 topos sendo que metade deles teve sua classificação melhorada do método da matriz qualitativa para o GoM enquanto a outra metade piorou.

Tabela 1: Frequência de topos nas classes de eficiência na recarga para os dois métodos utilizados

<i>Classe</i>	<i>Matriz Qualitativa</i>		<i>Grade of Membership</i>	
	<i>N</i>	<i>%</i>	<i>N</i>	<i>%</i>
<i>Baixa</i>	12	7,64%	9	5,73%
<i>Média-Baixa</i>	82	52,23%	89	56,69%
<i>Média</i>	52	33,12%	47	29,94%
<i>Média-Alta</i>	11	7,01%	12	7,64%
<i>Alta</i>	0	0,00%	0	0,00%

Fonte: Pesquisa direta.

Entre os 26 topos que sofreram mudanças na classificação, a maior parte (30,8%) foi enquadrado na classe média-baixa no método da matriz qualitativa e média no GoM. Houve ainda 7,7% dos casos que foram transferidos de baixa para média-baixa e 11,5% de média para média-alta. Por outro lado, 19,2% dos topos foram classificados com eficiência média-baixa pela matriz qualitativa e baixa pelo GoM. Ademais, 15,4% dos casos eram de média-alta eficiência e foram classificados como média. Por fim, os últimos 15,4% dos topos que tiveram sua classificação alterada eram da classe de média eficiência no método da matriz qualitativa e após a utilização do GoM foram classificados com de média-baixa eficiência.

Contudo, reafirma-se que os resultados encontrados por ambos os métodos possuem alta correspondência. O número de topos em cada classe determinada pelo método da matriz qualitativa é muito similar ao apresentado pelo método GoM. Isso indica que ambos parecem ser eficientes na classificação dos topos.

A espacialização dos resultados corrobora esta afirmação (FIG. 1 e 2). A distribuição espacial dos topos em função das classes de eficiência como zonas de recarga manteve-se bastante parecida para os dois métodos. Mesmo as poucas divergências encontradas não apresentaram uma espacialização homogênea, mostrando que foram meramente metodológicas e não acarretam em problemas na validação de nenhuma das classificações.

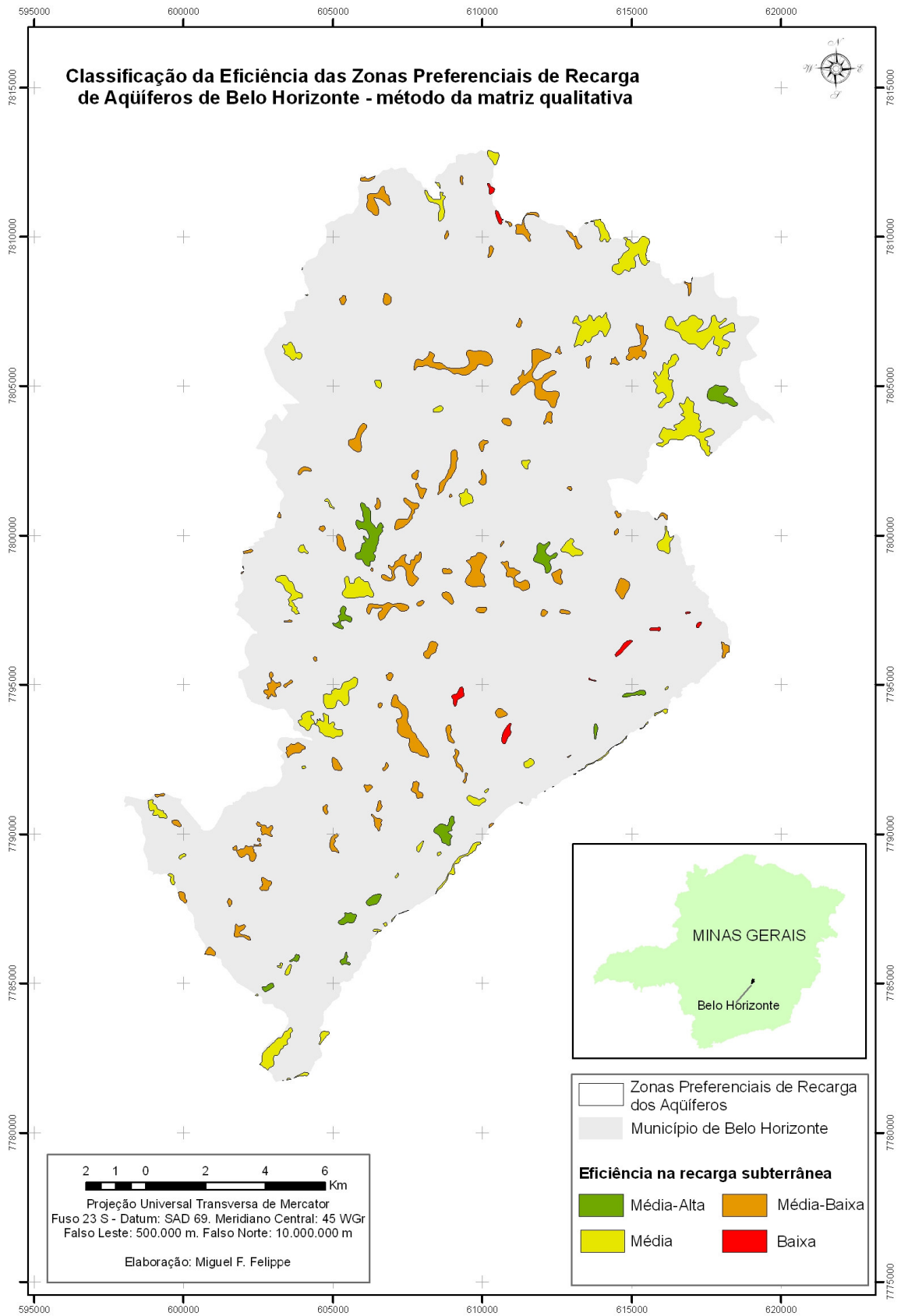


FIGURA 1 – Eficiência dos topos como zonas de recarga pelo método da matriz qualitativa.

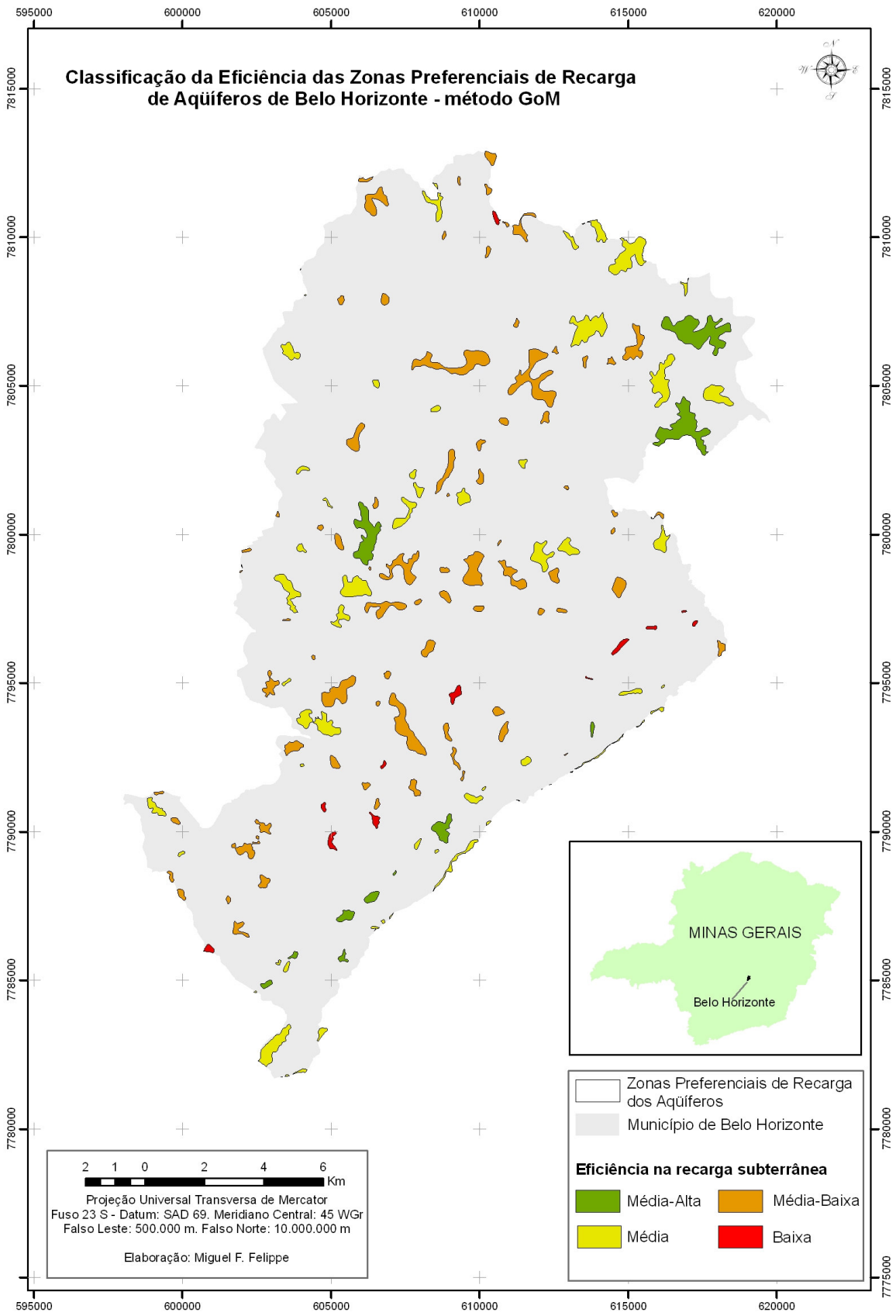


FIGURA 2 – Eficiência dos topos como zonas de recarga pelo método *Grade of Membership*.

5. CONCLUSÕES

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.

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 a qualquer dos perfis supracitados. Acredita-se que um aumento no número de variáveis possa contribuir para a melhoria do modelo.

Por outro lado, a classificação gerada a partir do indicador obtido dos escores de pertencimentos a perfis de “tipos puros” apresentou um resultado extremamente interessante. Ademais, foi corroborada a classificação apresentada por Felipe e Magalhães Jr. (2007) a partir do cruzamento qualitativo das variáveis em sucessivas matrizes.

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 com esse trabalho, estimular a reflexão acerca da interpretação dos fenômenos a partir de uma multiplicidade de variáveis no escopo da epistemologia atual.

6. REFERÊNCIAS

- ALVES, L. C.; LEITE, I. C.; MACHADO, C. J. (2008). “*Perfis de saúde dos idosos no Brasil: análise da Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios de 2003 utilizando o método Grade of Membership*”. Cad. Saúde Pública, Rio de Janeiro, 24(3), pp. 535-546.
- BEATO, D. A. C. (coord). (2001). *Estudo Hidrogeológico da Bacia da Pampulha: relatório final*. Belo Horizonte, CPRM/PBH.
- BELO HORIZONTE (1995). *Plano diretor de Belo Horizonte: lei de uso e ocupação do solo, estudos básicos*. Belo Horizonte, [s.n].
- BRANDÃO, V. S.; CECÍLIO, R.A.; POUSKI, F.F. e SILVA, D.D. (2006). *Infiltração da água no solo*. 3ª ed. Viçosa, Ed. UFV.
- CERQUEIRA, Cezar Augusto (2004). *Tipologia e características dos estabelecimentos escolares brasileiros*. Tese (doutorado). Universidade Federal de Minas Gerais.

- CHRISTOFOLETTI, A. (1999). *Modelagem de sistemas ambientais*. São Paulo, Edgard Blucher.
- COSTA, W. D. (2002) *Caracterização das condições de uso e preservação das águas subterrâneas do município de Belo Horizonte – MG*. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo.
- FELIPPE, Miguel Fernandes; MAGALHÃES Jr, Antônio Pereira (2007). *Espacialização e classificação dos topos como zonas preferenciais de recarga de aquíferos em Belo Horizonte-MG*. Monografia (graduação). Universidade Federal de Minas Gerais.
- GARCIA, R. A; SOARES-FILHO, B.; SAWYER, D. O. (2004). *Dimensões sócio-econômicas e movimentos populacionais: uma regionalização da Amazônia brasileira* in Anais do XIV Encontro Nacional de Estudos Populacionais, ABEP, Caxambu.
- HARRIS, A.L.N.C. (1999). *Metodologias baseadas na Teoria dos Sistemas Nebulosos (Fuzzy Systems Theory) para o tratamento das informações subjetivas do Projeto Arquitetônico*. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo.
- MANTON, K., WOODBURY, M., TOLLEY, D. (1994). *Statistical applications using fuzzy sets*. [s.l.], Wiley.
- SILVA, A. B.; CARVALHO, E. T.; FANTINEL, L. M.; ROMANO, A. W. e VIANA, C. S. (1995) *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; relatório final*. Belo Horizonte, FUNDEP/UFMG-IGC.
- SOARES, P. V. (2005). *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*. Tese (doutorado). Universidade Estadual de Campinas.
- TODD, D. K. e MAYS, L. W. (2005). *Groundwater hydrology*. John Willey & Sons.
- WARD, A. e TRIMBLE, S. (2004). *Environmental hydrology*. 2ª ed. Boca Raton, Lewis Publishers.