

Proposta de Utilização do Método *Grade of Membership* (GoM) para o Desenvolvimento de Classificações Multivariadas Qualitativas em Recursos Hídricos: Aplicação para Zonas de Recarga de Aquíferos de Belo Horizonte-MG

Miguel Fernandes Felipe¹; Antônio Pereira Magalhães Junior²; Ricardo Alexandrino Garcia²
miguel.felippe@ufff.edu.br; magalhaesufmg@yahoo.com.br; alexandrinogarcia@gmail.com

Recebido: 20/12/11 - revisado: 12/02/12 - aceito: 05/11/13

RESUMO

A gestão dos recursos hídricos demanda continuamente novas ferramentas para subsidiar os processos decisórios, como no caso da alocação adequada de investimentos. Porém, as principais estratégias são baseadas em estudos de caso complexos e custosos, que não podem ser replicados em outras áreas e que envolvem elevada demanda de tempo e dinheiro. Todavia, muitos recortes espaciais já possuem certas bases de dados secundários disponíveis que podem ser utilizados para pesquisas de gabinete. Esse trabalho comunga dessa perspectiva ao introduzir no campo dos estudos dos recursos hídricos, um método estatístico desenvolvido nas ciências médicas para agrupar pacientes de acordo com sua susceptibilidade a determinadas patologias. O modelo estatístico qualitativo de máxima verossimilhança denominado *Grade of Membership* (GoM), baseado na teoria dos conjuntos nebulosos, é aplicado via sensoriamento remoto e alimentado por dados secundários. A partir de uma matriz de características, um algoritmo de máxima verossimilhança pode criar perfis (tipos) e alocar neles os elementos estudados, definindo graus de pertinência de cada elemento em cada perfil. Esse trabalho traz uma aplicação experimental do modelo GoM para avaliar a eficiência dos topos de morro em Belo Horizonte na recarga de aquíferos. Os topos das elevações do relevo são considerados zonas preferenciais de recarga de sistemas aquíferos em Belo Horizonte. Apesar da relativa homogeneidade hidrogeológica, as características ambientais da superfície são muito variadas, alterando as possibilidades de recarga da água meteórica. O modelo *Grade of Membership* (GoM) criou tipos ideais de topos fundamentados nos fatores limitantes e/ou facilitadores da recarga subterrânea. Os resultados confirmam que a recarga de aquíferos em Belo Horizonte está prejudicada pela ocupação humana e por limitações naturais do ambiente. O GoM, apesar de pouco explorado, é um método potencialmente útil para as ciências ambientais, capaz de responder a questões que não podem ser esclarecidas pelos procedimentos matemáticos tradicionais.

Palavras-chave: Zonas de recarga de aquíferos, *Grade of Membership*, Topos de morro.

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 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, centro da terceira maior Região Metropolitana do Brasil que

abriga praticamente cinco milhões de habitantes, possui um Plano Diretor de Drenagem que está focado nas águas superficiais: sua disponibilidade quantitativa e qualitativa, ações de recuperação ambiental e diretrizes de saneamento. Parte deste quadro se deve ao fato de que 95% do abastecimento urbano do município é realizado por águas fluviais. Porém, não há como 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 e TRIMBLE, 2004; TODD e MAYS, 2005).

Essa lacuna no planejamento urbano-ambiental, que pode ser considerada generalizada no contexto brasileiro, está intimamente relacionada à dificuldade metodológica de estudos de intera-

¹ Universidade Federal de Juiz de Fora

² Universidade Federal de Minas Gerais

ção entre águas meteóricas, superficiais e subterrâneas em escala regional. Isso ocorre devido à maioria dos estudos basear-se em ensaios pontuais ou modelagens em microbacias para estimativas de infiltração, percolação e recarga, como mostram os trabalhos de Zuquete e Palma (2006), Gaspar *et al* (2007), Santoro *et al* (2007) e Santos e Koide (2011).

O geoprocessamento emerge como importante ferramenta no avanço da aplicação de modelos matemáticos pela sua capacidade multiescalar. Porém, os dados de entrada continuam sendo fundamentais para o sucesso das abordagens metodológicas. Uma vez que dados quantitativos são escassos e muitas vezes não replicáveis em escalas menores, buscam-se métodos qualitativos de interpretação da recarga que, associados a um Sistema de Informações Geográficas (SIG) permitam a extrapolação dos dados de forma zonal.

Sob esta perspectiva, o objetivo principal deste trabalho é apresentar uma inovadora proposição metodológica que utiliza conceitos da teoria dos conjuntos nebulosos (*fuzzy sets*), baseado em um algoritmo de máxima verossimilhança para dados qualitativos, na elaboração de classificações voltadas para a gestão de recursos hídricos. Como estudo de caso, tomou-se a eficiência ambiental dos topos na recarga de aquíferos em Belo Horizonte-MG. Como arcabouço metodológico, foi utilizado o método *Grade of Membership* (GoM), desenvolvido no final do século XX por Manton *et al.* (1994), já respaldado em diversos trabalhos nas ciências médicas. Adicionalmente, os resultados foram espacializados e foram apontados os principais fatores controladores do processo de recarga em Belo Horizonte, bem como aqueles que o restringem, contribuindo para a gestão das águas no município.

Para tanto, buscou-se criar uma tipologia dos topos a partir de suas características ambientais (físicas e humanas) a fim de possibilitar uma identificação mais clara do seu comportamento hidrológico. 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.

Zonas preferenciais 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 promo-

ção da recarga dos aquíferos, ou seja, são zonas preferenciais.

A espacialização dessas áreas é determinada pela dinâmica dos fluxos subterrâneos e, por consequência, por seu potencial hidráulico. As zonas de recarga caracterizam-se por elevada energia hidráulica potencial, contrariamente às zonas de descarga (WARD e TRIMBLE, 2004).

De uma forma geral, há três tipos de energia envolvidos nesses fluxos: de elevação, de pressão e de velocidade (WARD e TRIMBLE, 2004). Tendo em vista que os aquíferos em Belo Horizonte são do tipo livre com importante participação do material 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 de colinas e morros que marcam a morfologia do município são considerados como zonas preferenciais de recarga dos aquíferos de 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 ambientais mais importantes no condicionamento dos processos supracitados. Esse procedimento deve ser precedido de um levantamento detalhado do quadro geográfico da unidade de estudo e as informações devem ser espacializáveis na escala adequada para o estudo.

A capacidade de infiltração de cada manto de intemperismo 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 e TRIMBLE, 2004; BRANDÃO *et al.* 2006). Quanto à percolação, sua dinâmica está diretamente relacionada à infiltração, sendo que os mesmos elementos a condicionam (WARD e TRIMBLE, 2004). Destaca-se ainda a importância da espessura 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, são ímpares para a determinação da transmissividade e armazenamento (TODD e MAYS, 2005). No caso de Belo Horizonte, também para essas propriedades, a importância dos mantos de intemperismo que revestem os substratos

cristalinos não pode ser negligenciada (SILVA *et al.*, 1995; BEATO *et al.*, 2001, COSTA, 2002).

PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Os procedimentos estatísticos clássicos sempre apresentaram impedimentos quanto a sua utilização nas ciências ambientais, sobretudo na gestão de recursos hídricos. 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 *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, foi consolidada a matemática dos Conjuntos Nebulosos. Enquanto 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. 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, 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 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. 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). Uma vantagem adicional é que o GoM trabalha com dados categóricos ou nominais, o que facilita os estudos ambientais, já que a maior parte das variáveis é qualitativa. Ademais, variáveis quantitativas também podem ser usadas ao serem classificadas (categorizadas). Destarte, é na geração de 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 muito útil na determinação de classificações (a partir da elaboração de tipologias) baseadas em variáveis 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.

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

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.

Tomando por base o arcabouço proporcionado pelo GoM, a metodologia proposta está baseada em uma sucessão de etapas analíticas e interpretativas, conforme demonstra a Figura 1.

Seleção das variáveis

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 (CHRISTOFOLLETTI, 1999).

Para a classificação da eficiência dos topos como zonas de recarga de aquíferos foram utilizadas as variáveis: i) *permeabilidade*, inferida a partir do domínio hidrogeológico de acordo com as mensurações no solo e rocha realizadas por 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; 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 forne-

cida pela Fundação de Parques Municipais-PBH; viii) *uso do solo*, verificado em imagens CBERS-2 de 2007.

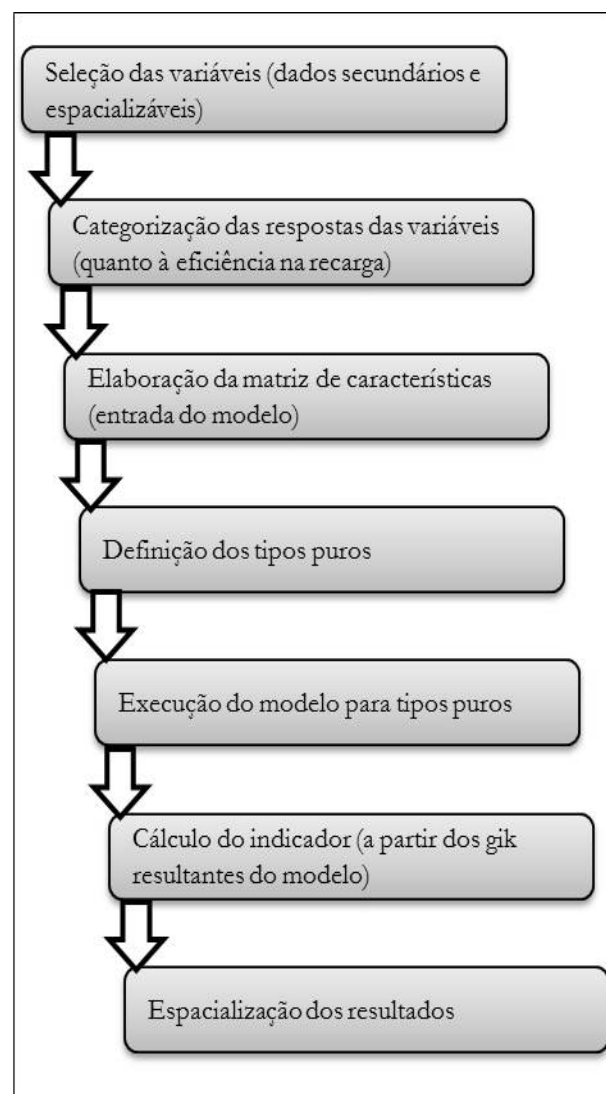


Figura 1 - Síntese dos procedimentos metodológicos.

Categorização das variáveis selecionadas

As respostas de cada variável foram categorizadas em função da sua contribuição teórica para a recarga subterrânea. Em todas as variáveis foram criadas três categorias de respostas qualitativamente distintas denominadas “0”, “1” e “2” para as respostas que contribuem de forma ruim, razoável ou boa, respectivamente – nota-se que esses valores não correspondem a pesos, mas sim ao identificador da qualificação determinada.

O Quadro 1 apresenta o resumo das oito variáveis estudadas, associando as possíveis respostas

que poderiam aparecer 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 Superficial	vegetada	Semi-vegetada	ocupada
Proteção por parques	integral	Parcial	ausente
Permeabilidade (geologia)	Formação Cercadinho	Grupo Sabará	
	Formação Cauê	Formação Gandarela	Máficas e
	Formação Taboões	Formação Barreiro	Ultra-máficas
	Complexo Belo Horizonte	Formação Fecho do Funil	
	Nº de canais de primeira ordem	mais de 5	1 a 4
	Profundidade do manto	superior a 40 metros	21 a 40 metros inferior a 20 metros
Potencial de água subterrânea	Alto	Médio	baixo
Nº de fraturas	mais de 2	1	0

Matriz de entrada no modelo

A partir das categorias definidas, foi criada uma matriz numérica para entrada no modelo que apresenta 157 linhas e nove colunas. Cada linha representa um topo individualizado e cada coluna representa uma característica do topo, qualificada de acordo com o Quadro 1. A primeira coluna representa um código de identificação dos topos, numerados sequencialmente de 1 a 157.

Esse procedimento é indispensável, uma vez que o algoritmo trabalha, exclusivamente, com caracteres numéricos. Inicialmente a matriz foi elaborada no software Microsoft Excel 2007 e posteriormente transformada em um arquivo de texto (*.txt) *unicode* sem formatação para dar entrada no programa gom3.4.exe.

Definição dos tipos puros

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. O Quadro 2 apresenta a matriz final de agrupamento das variáveis utilizadas e suas características em função dos três tipos puros criados.

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 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, Cauê, Taboões e Complexo Belo Horizonte	0,0000	0,0000	1,0000
	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
Espessura do Manto de Intemperismo (m)	1	0,0000	1,0000	0,0000
	2-5	0,0000	0,0000	1,0000
	0-20	1,0000	0,0000	0,0000
	21-40	0,0000	1,0000	0,0000
	41-70	0,0000	0,0000	1,0000
	0	1,0000	0,0000	0,0000
Número de Nascentes	1-4	0,0000	1,0000	0,0000
	5-44	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

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 zero ou um, exatamente. 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.

Execução do modelo

Para execução da classificação 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 (três).

Como os tipos foram determinados *a priori*, em média o g_{ik} obtido foi consideravelmente baixo. 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.

Cálculo do indicador

Resumidamente, pode-se dizer que um topo ideal para a recarga inserir-se-ia de forma perfeita (100%) no Perfil C., mas isso, contudo, não ocorreu. Porém, quanto maior o escore de pertencimento (g_{ic}) ao Perfil C, melhor a eficiência do topo. Porém, o g_{ib} dos topos também deve ser avaliado. 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 classificação, os escores de pertencimento ao Perfil C e ao Perfil B foram considerados na Equação 2:

$$I = g_{ic} + 0,5g_{ib} \quad (2)$$

Sob essa perspectiva, a classificação de um topo quanto à 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, o I seria igual a 0,5. No último caso, com g_{ic} de 1,0, o I equivaleria a 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} .

Espacialização dos resultados

A espacialização dos resultados obtidos é apresentada no item subsequente na forma de aplicação da metodologia proposta para o estudo de caso dos topos de Belo Horizonte-MG.

RESULTADOS E DISCUSSÕES: APLICAÇÃO DOS PROCEDIMENTOS PROPOSTOS

Caracterização da área de estudo

Capital do estado de Minas Gerais, o município de Belo Horizonte situa-se na bacia do alto Rio das Velhas, afluente do Rio São Francisco. Possui uma população de 2,3 milhões de habitantes em um território de 331 Km², segundo o censo demográfico de 2010. A elevada densidade demográfica é correlata a uma extensa mancha urbana que já ocupa cerca de 83% da área municipal (FELIPPE, 2007), restando poucas porções não ocupadas, sobretudo, em unidades de conservação ambiental.

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 seca por ano, os totais pluviométricos médios de cerca de 1.500mm se concentram, principalmente, no período entre novembro e março.

De acordo com o balanço hídrico, a recarga subterrânea inicia-se no mês de outubro (COSTA,

2002) e é promovida 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 do território (com exceção da porção sul) é embasada por rochas cristalinas arqueanas. A 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 2): o Complexo Belo Horizonte; o Grupo Sabará; e os Grupos Piracicaba e Itabira (SILVA *et al.*, 1995).

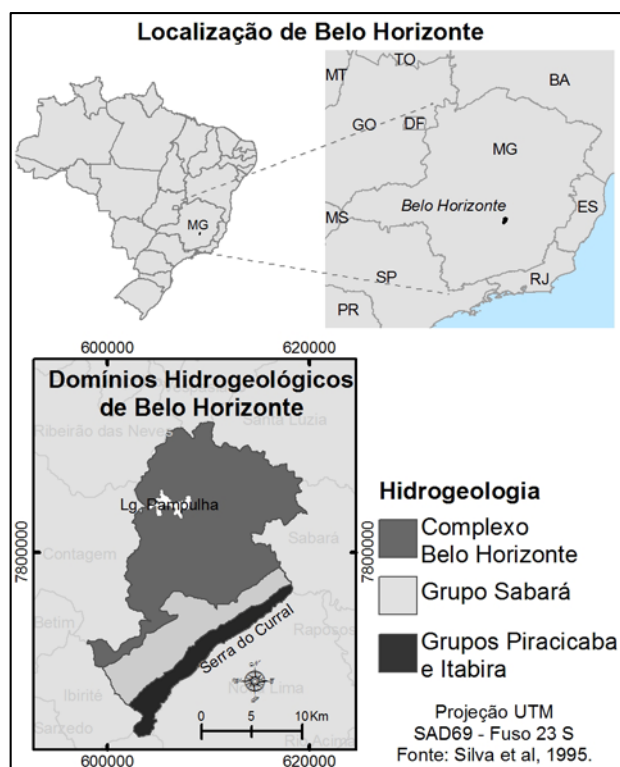


Figura 2 - Localização e domínios hidrogeológicos de Belo Horizonte-MG.

O domínio do Complexo Belo Horizonte é caracterizado por um sistema aquífero livre, defini-

do pelo manto de intemperismo e sedimentos coluvionares (aquífero granular) sobreposto às rochas gnáissicas (aquífero fissural). Possui baixa capacidade específica em poços escavados na rocha, porém, com aumento considerável das vazões no caso da água armazenada no material inconsolidado (BEATO *et al.*, 2001).

O Grupo Sabará é marcado por litologias com baixa permeabilidade, como xistos e filitos. Tais rochas apresentam cristais de textura pelítica e não apresentam 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 considerado como o de melhor eficiência de armazenamento em Belo Horizonte (SILVA *et al.*, 1995; BELO HORIZONTE, 1995). Caracterizado por grande variabilidade litológica (quartzitos, itabiritos, dolomitos, xistos, filitos, etc.), as rochas se comportam como aquíferos heterogêneos e anisotrópicos com elevada variação lateral e em profundidade, sendo 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.

Classificação

A classificação da eficiência dos topos como zonas de recarga em Belo Horizonte foi realizada a partir do cruzamento de oito variáveis: morfologia, número de falhas e fraturas, número de nascentes, profundidade do manto de intemperismo, permeabilidade, proteção por parques, potencial de água subterrânea e uso do solo. Os parâmetros foram qualificados em termos de sua contribuição para a recarga e trabalhados segundo o algoritmo estatístico de máxima verossimilhança - GoM.

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 3. A média dos índices foi consideravelmente baixa - 0,395 -, enquanto o desvio padrão foi 0,126 - 32% em relação à média. Para facilitar a interpretação e a espacialização dos resultados, as classes de eficiência foram 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 ($I \leq 0,2$).

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 apresentou-se como de alta eficiência para a recarga subterrânea. Na Figura 3, apresenta-se a distribuição dos resultados em cada classe de eficiência.

Quadro 3 - Grau de pertencimento dos topos aos perfis puros criados, índice de eficiência na recarga e classificação proposta

TOPO	Perfil A	Perfil B	Perfil C	INDICE	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

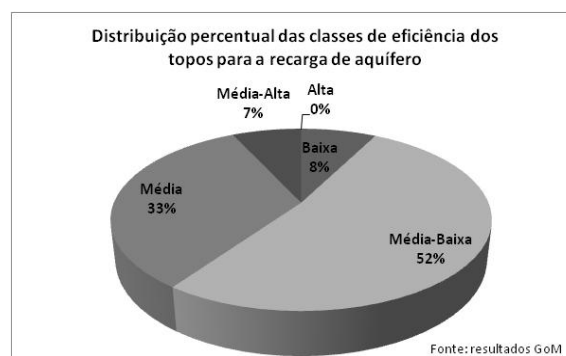


Figura 3 – Distribuição percentual das classes de eficiência dos topos para a recarga de aquífero.

A espacialização dos resultados é apresentada na Figura 4, podendo-se perceber que a sua distribuição não é homogênea. Os poucos topos que se destacam com eficiência média-alta estão distribuídos em porções do município ainda não ocupadas (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).

A porção central do município, correspondente ao interflúvio das bacias dos ribeirões Arrudas e Onça (os dois principais afluentes do Rio das Velhas que drenam Belo Horizonte) apresenta, em seu conjunto, topos nas classes média e média-baixa. Tal característica se deve ao intenso percentual de ocupação da área, incluindo a periferia imediata 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 próprias características de armazenamento e transmissividade do aquífero foram parcialmente responsáveis por esse cenário, associadas à elevada densidade de ocupação urbana.

É possível afirmar que o principal fator limitante da recarga é, de fato, a ocupação urbana. A impermeabilização do solo pelas edificações e pelo asfalto na maior parte da mancha urbana im-

pede que a água infiltre no aquífero granular e, por conseguinte, recarregue o aquífero fissural. As poucas manchas não impermeabilizadas, como os parques municipais, são escassas e fragmentadas, não impactando positivamente este cenário. Quando a cobertura superficial associa-se a outro parâmetro comprometedora da recarga, como a morfologia dos topos ou o potencial de água subterrânea, os resultados são ruins. Isto é reflexo da distribuição da frequência relativa desse parâmetro no modelo, posto que a grande maioria dos topos encontra-se ocupada pela mancha urbana.

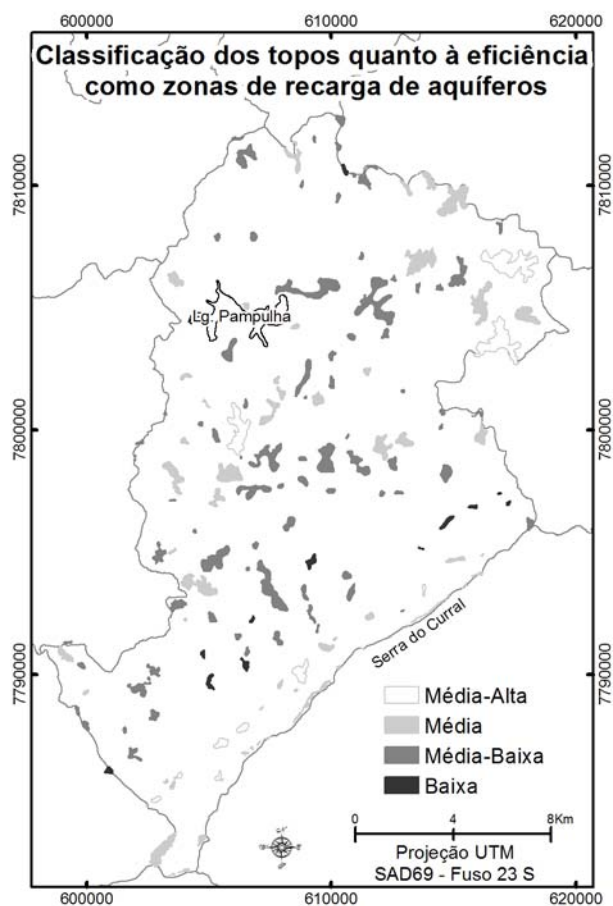


Figura 4 – Eficiência dos topos como zonas de recarga pelo método *Grade of Membership*.

Os resultados refletem a vulnerabilidade da recarga subterrânea em Belo Horizonte, como verificado na inexistência de topos de classe alta. 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 os processos de gestão territorial e de 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.

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 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.

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 obtido dos escores de pertencimentos a perfis de tipos puros apresentou um resultado digno de reflexão. 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 da recarga é a ocupação urbana, que prejudica a infiltração da água no solo. Além disso, características naturais como a baixa permeabilidade do domínio hidrogeológico do Grupo Sabará, também comprometem a recarga.

O trabalho permitiu 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. (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, C-PRM/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.
- DAVIS, Stanley N. *Hidrogeology*. New York: 1966.
- FELIPPE, Miguel Fernandes (2007). *Espacialização e classificação dos topos como zonas preferenciais de recarga de aquíferos em Belo Horizonte-MG*. Monografia (graduação). Universidade Federal de Minas Gerais.
- FETTER, C. W. *Applied Hydrogeology*. 3rd ed. New Jersey: Prentice Hall, 1994.
- 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.
- GASPAR, M. T. P.; CAMPOS, J. E. G.; CADAMURO, A. L. M. (2007). *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. 37 (3). p. 542-550. Setembro, 2007.
- 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.
- MOURA, Heloisa Soares de. *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.; DINIZ, H. N.; CORREIA, N. T.; CARBONE, F. R.; SCIOTTA L. C. O. (2007). Estimativa da recarga do aquífero freático na bacia do Rio Una, no município de Taubaté, SP. Revista Ambi-Água, Taubaté, v. 2, n. 1, p. 57-82, 2007.
- SANTOS, R. M.; KOIDE, S. (2001) *Mapeamento da recarga de águas subterrâneas a partir da regionalização de estimativas pontuais via regressão múltipla espacial*. in Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba, PR, Brasil, INPE. p.5386-5393. 30 de abril a 05 de maio de 2011.
- 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.
- SWYNGEDOUW, Erik. *Social Power and the Urbanization of Water: Flows of Power*. Hardback, 2004.
- TODD, D. K. e MAYS, L. W. (2005). *Groundwater hydrology*. John Wiley & Sons.

WARD, A. e TRIMBLE, S. (2004). *Environmental hydrology*. 2ª ed. Boca Raton, Lewis Publishers.

ZUQUETTE, L. V.; PALMA, J. B. (2006). *Avaliação da condutividade hidráulica em área de recarga do aquífero Botucatu*. Rev. Esc. Minas (online). v. 59 n.1. Ouro Preto-MG. Jan./Mar. 2006.

Proposal For The Use Of The Grade Of Membership (GoM) Method To Develop Qualitative Multivariate Classifications In Water Resources: Application To Aquifer Recharge Zones In Belo Horizonte - MG

ABSTRACT

Water management continually requires new tools to promote the adequate allocation of investments. However, the main strategies are based on complex and expensive case studies that cannot be replicated elsewhere. This kind of effort requires time and money. Nevertheless, in many of these areas secondary data that could be used for desk research have already been available. This work shares this perspective by introducing into water sciences a statistical method developed in medicine to group patients according to their susceptibility to some illness. The statistical model of maximum likelihood named Grade of Membership (GoM), based on the fuzzy sets theory, is applied by remote sensing based on secondary data. From a matrix of characteristics, an algorithm of maximum likelihood can create profiles (types) and allocate the studied elements into these groups, given the grade of membership of each element in each group. This work uses an experimental application of the GoM model to evaluate the efficiency of hilltops in the aquifer recharge in the municipality of Belo Horizonte, Brazil. The hilltops are considered preferential aquifer recharge zones in Belo Horizonte-MG. Despite the relative hydrogeological homogeneity, the environmental characteristics of the surface have great variability, changing the possibilities of water recharge. The maximum likelihood algorithm of GoM has created ideal types of hilltops based on the limiting and/or facilitating factors of the underground recharge. The results show that aquifer recharge in Belo Horizonte is compromised by human occupation and by the natural limitation of the environment. GoM is considered a very useful method for water sciences and it can answer some questions that cannot be clarified by traditional mathematics procedures.

Key-words: Aquifer recharge zones, Grade of Membership, Hilltops.