

Artigos

Aplicação do método AHP para confecção de modelo de favorabilidade hídrica subterrânea de aquíferos fraturados

Application of AHP method to make underground water favorability model

Nilcileia Cristina de Magalhães Oliveira¹; Luis de Almeida Prado Bacellar¹; Bruna Fiume²; Cesar Falcão Barella¹; Iraydes Tálita de Sena Nola¹✉

¹ Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Ouro Preto, MG

² Serviço Geológico do Brasil (CPRM), Belo Horizonte, MG.

✉ bacellar@ufop.edu.br, nill.cristinas2@hotmail.com, bruna.fiume@cprm.gov.br, cesarbarella@ufop.edu.br, talitanola@ufop.edu.br

Palavras-chave:

Favorabilidade hídrica.
Aquífero fraturado.
Álgebra de mapas.
Produtividade de aquíferos.

Keywords:

Water favorability.
Fractured aquifer.
Map algebra.
Aquifer productivity.

Revisado por pares.

Recebido em: 18/12/2019.

Aprovado em: 17/03/2020.

Resumo

A locação de poços tubulares em aquíferos fraturados é complexa devido à dificuldade de se encontrar água nestes meios, de alta heterogeneidade e anisotropia. Há várias propostas metodológicas que têm como objetivo encontrar áreas mais favoráveis para a produção de água nestes aquíferos, que normalmente envolvem condicionantes geológicos e geomorfológicos. No presente trabalho, pretende-se definir um mapa de favorabilidade hídrica subterrânea para uma área a norte do Quadrilátero Ferrífero (MG) por meio da integração dos mapas litológico, de declividade, HAND (Height Above the Nearest Drainage) e densidade de lineamentos morfoestruturais, magnetométricos e radiométricos. Para tal, adotou-se o método AHP (Analytic Hierarchy Process), que possibilita a integração de vários planos de informação de forma menos subjetiva. O mapa de favorabilidade, validado com dados de capacidade específica de 361 poços tubulares, mostrou que os fatores condicionantes mais relevantes são em ordem decrescente, o HAND, declividade, densidade de lineamentos e litologia. Com os resultados, criou-se um modelo de favorabilidade hídrica subterrânea para a área de estudo, que poderá ser utilizado em outras regiões similares.

Abstract

The location of wells in fractured aquifers is complex due to the difficulty of finding water in these media, characterized by high heterogeneity and anisotropy. There are several methodological proposals that aim to find favorable areas for water production in these aquifers, which usually involve geological and geomorphological conditions. In the present work, we intend to define an underground water favorability map for an area north of the Quadrilátero Ferrífero (MG) by integrating lithological, slope, HAND (Height Above Closest Drain) maps and morphostructural, magnetometric and radiometric lineaments. For this, we adopted the AHP method (Analytic Hierarchy Process), which allows the integration of various information planes in a less subjective way. The favorability map, validated with specific capacity data from 361 tubular wells, showed that the most relevant conditioning factors are in descending order, HAND, slope, lineament density and lithology. With the results, a groundwater favorability model was created for the study area, which can be tested in other similar regions.

DOI: <http://dx.doi.org/10.14295/ras.v34i1.29769>

1. INTRODUÇÃO

Diferente dos aquíferos com porosidade intergranular, os aquíferos fraturados são anisotrópicos e heterogêneos, o que torna sua exploração muito mais complexa. Além disto, tais aquíferos são normalmente de baixa produtividade, sendo difícil local poços tubulares produtivos. Mesmo assim, o interesse na exploração destes aquíferos tem crescido, devido à demanda crescente pelo uso da água e pelo fato deles se distribuírem em área considerável no Brasil e no mundo (SINGHAL & GUPTA, 2010).

A produtividade dos aquíferos fraturados está diretamente relacionada com as descontinuidades litológicas, como fraturas,

juntas e falhas. Sua caracterização hidrodinâmica é dependente de várias características das fraturas, como abertura e material de preenchimento, conectividade, frequência, comprimento e rugosidade (COOK, 2003, COSTA, 2008, SINGHAL & GUPTA, 2010). A conectividade das fraturas é atributo importante, pois é através da ocorrência de múltiplas fraturas que se cruzam que o fluxo hídrico é favorecido. No mesmo sentido, o aumento da densidade e do comprimento das fraturas favorece a conectividade e a possibilidade de interseção entre elas (LACHASSAGNE, 2008, SINGHAL & GUPTA, 2010, BRITO, 2018). As fraturas extensionais tendem a apresentar maior abertura hidráulica e, conseqüentemente, maior transmissividade hidráulica. Contudo, mesmo as fraturas de outra natureza podem se tornar abertas se sua direção

for paralela ou subparalela com a direção de máximo esforço da tectônica atual (FERNANDES, 2008, SÁ *et al.*, 2008).

As falhas e os conjuntos de fraturas tendem a apresentar direções coincidentes e a se manifestar por lineamentos. Os lineamentos também podem representar contatos litológicos, trends estruturais e importantes condicionantes hidrogeológicos (O'LEARY *et al.*, 1976). A detecção de lineamentos pode ser feita por imagens de sensoriamento remoto, especialmente fotos aéreas e imagens de radar, ou por aerogeofísica. Entre os métodos geofísicos se destacam a magnetometria e a radiometria, que têm mostrado bons resultados para identificação de lineamentos em diversas profundidades (BRITO, 2018).

A magnetometria é baseada na magnetização das rochas, dependente da quantidade e distribuição dos minerais magnéticos presentes, e quanto maior a magnetização, maior o sinal resultante (LOWRIE, 2004). Como as rochas apresentam conteúdo distinto de minerais magnéticos, este método permite a identificação de contatos litológicos, diques e sills, entre outras feições geológicas em profundidade (ERNESTO & USSAMI, 2002).

A radiometria ou gamaespectrometria diz respeito à medida da distribuição de substâncias radioativas nos materiais terrestres. Apenas alguns elementos se apresentam em abundância e com forte radiação para serem detectados pelos equipamentos de aerolevantamento atuais. A principal fonte de radiação gama detectada na superfície terrestre presente na composição da maioria das rochas são o potássio (K40) e as séries do urânio (U238) e do tório (Th232) (TELFORD *et al.*, 1990). Como estes elementos tendem a ser mobilizados em direção às fraturas, a radiometria pode ser um bom indicador destas feições (TELFORD, *op. cit.*).

As litologias também apresentam potenciais diferentes para a produção de água em aquíferos fraturados e embora não seja consensual na literatura, normalmente considera-se que os gnaissees apresentam maior potencial hídrico, seguidos dos granitos e, depois, xistos (SINGHAL & GUPTA, 2010, FERNANDES *et al.*, 2016).

O relevo, e sua inerente relação com a espessura do regolito, é considerado um condicionante importante da produtividade de todos os aquíferos, e não somente dos fraturados. Áreas com relevo mais suave tendem a apresentar perfis de intemperismo mais espesso, como solos mais antigos, mais lixiviados e, conseqüente, mais porosos (BACELLAR, 2000). Tais fatores favorecem a recarga dos aquíferos e, em tese, sua produtividade. Outro condicionante do relevo considerado igualmente importante é a proximidade com áreas de descarga, normalmente situadas nos fundos de vale, onde o nível d'água tende a ser mais raso, o que facilita encontrar

poços produtivos em profundidades menores. Este fator é normalmente avaliado pela distância horizontal em relação aos canais de drenagem (CHILTON & FOSTER, 1995, Fernandes *et al.*, 2016) ou pelo modelo HAND (RENNÓ *et al.*, 2008).

No modelo HAND avalia-se a diferença entre a cota do ponto de interesse em relação à cota do canal de drenagem mais próximo, o que expressa de forma aproximada a possível profundidade do nível d'água em cada ponto. Este modelo é tradicionalmente empregado para estimar áreas suscetíveis a enchentes, mas Brito (2018) o utilizou com sucesso para avaliar favorabilidade à produção de água subterrânea em aquíferos fraturados.

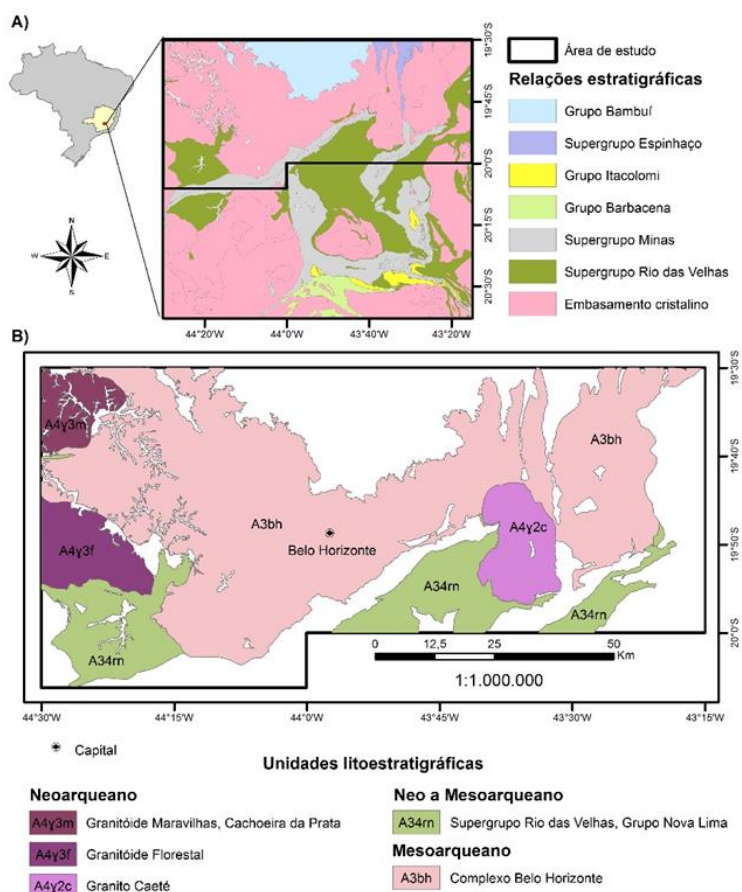
Em suma, como são vários fatores condicionantes, avaliar a favorabilidade hídrica de aquíferos fraturados não é tarefa simples (COOK, 2003, COSTA, 2008, FERNANDES, 2008, FERNANDES *et al.*, 2016). Tradicionalmente, os pesquisadores procuram relacionar os fatores acima mencionados, que são cruzados e validados com dados de poços tubulares na respectiva área (CHILTON & FOSTER, 1995). O cruzamento dos diversos planos de informação é feito usualmente pelo método de avaliação de especialistas, que é algo subjetivo. No presente estudo, pretende-se utilizar o modelo AHP (Analytic Hierarchy Process), como proposto por Brito (2018), que é um processo de álgebra de mapas, mais versátil e menos subjetivo. Brito (2018) analisou a favorabilidade de produção de águas subterrâneas em aquíferos fraturados de dois complexos do embasamento cristalino do Quadrilátero Ferrífero, e encontrou os seguintes graus de relevância em ordem decrescente dos fatores condicionantes: HAND, com 34,1%, declividade, com 20,5%, densidade de lineamentos morfoestruturais, com 20,5%, densidade de lineamentos radiométricos, com 12,3%, densidade de lineamentos magnetométricos, com 7,6%, e, por último, litologia, com apenas 5,0%. Ou seja, segundo esta autora, os fatores geomorfológicos seriam mais relevantes que os fatores estruturais e estes que os litológicos.

Neste trabalho, pretende-se avaliar a funcionalidade do método AHP, como proposto por Brito *et al.* (2019), para a elaboração de um modelo de favorabilidade hídrica subterrânea de aquíferos fraturados de uma área a norte do Quadrilátero Ferrífero. Se os resultados se mostrarem novamente positivos, o método poderá ser replicado em outras áreas com condições similares.

2. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo apresenta aproximadamente 5.000 km² e está localizada na porção centro-sudeste do estado de Minas Gerais. É constituída por unidades do embasamento cristalino, como o Complexo Belo Horizonte, que corresponde a área de maior interesse, além de rochas do Supergrupo Rio das Velhas, do Granito Caeté e de rochas intrusivas (Figura 1).

Figura 1 - Localização da área de estudo e suas respectivas unidades litoestratigráficas. A) Região de estudo em relação ao Quadrilátero Ferrífero e ao Supergrupo São Francisco. B) Unidades presentes na área de estudo



Fonte: Modificado de CPRM (2014).

O Complexo Belo Horizonte, de idade arqueana, é composto por rochas de coloração cinza, que apresentam bandamento composicional e feições de migmatização. Em termos petrográficos, são observadas regiões mais tonalíticas, com K-feldspato de caráter intersticial, e nas porções granodioríticas a graníticas são encontrados megacristais geralmente perfiticos e com muitas inclusões, em sua maioria plagioclásio, sendo a biotita o mineral máfico mais abundante (NOCE, 1995). As rochas desse Complexo apresentam-se saprolitizadas ou muito alteradas e/ou recobertas por um manto de intemperismo silto-argiloso. O solo residual possui grandes espessuras em regiões de relevo suave e é delgado ou inexistente em áreas de relevo mais acidentado (CAMPOS, 2011).

O Supergrupo Rio das Velhas, de idade arqueana, é constituído por rochas metavulcânicas, xistos, filitos, metagrauvacas, metaconglomerados, quartzitos, metacherts, formação ferrífera e rocha calcissilicáticas (DORR II, 1969, CPRM, 2009), integrando um greenstone belt (ALKMIM & MARSHAK, 1998). Este supergrupo foi subdividido no Grupo Nova Lima, mais antigo, e no Grupo Maquiné, mais novo.

O Granito Caeté, de idade em torno de 2776 Ma (MACHADO & NOCE, 1993), é composto por rochas graníticas e gnáissicas (NOCE *et al.*, 1998). Apresenta foliação milonítica NS e lineação de estiramento mineral EW em suas porções leste e oeste. A oeste encontra-se sobreposto por rochas do Grupo Nova Lima (CHEMALE JR. *et al.*, 1991). É constituído por plagioclásio, feldspato potássico, quartzo, biotita, sericita e clorita

(MOORE, 1969).

O Granitoide Florestal (2,593 Ga) é tarditectônico, e faz contato com o Grupo Nova Lima (Supergrupo Rio das Velhas) a oeste e a sul, e a norte com o Complexo Belo Horizonte (ROMANO & SOARES, 2007). Apresenta petrografia e geoquímica homogêneas, com caráter intermediário entre os granitos cálcio-alcálicos e trojêmíticos (ROMANO *et al.*, 1995).

O Granitoide Maravilhas - Cachoeira da Prata, datado em 2.714 ± 2 Ma pelo método U-Pb (OLIVEIRA, 1999), apresenta contato com o Supergrupo Rio das Velhas a oeste se estendendo até a cidade de Cachoeira da Prata a leste. A norte é coberto com sedimentos neoproterozoicos do Grupo Bambuí e a sul se limita por rochas do Supergrupo Rio das Velhas e pelo embasamento (ROMANO & SOARES, 2007). Ele é dividido em dois corpos: corpo I, de composição granítica e peraluminosa, e corpo II, de composição granodiorítica a tonalítica (OLIVEIRA, 1999).

A região é drenada pela bacia hidrográfica do rio São Francisco, cujas cabeceiras se situam na porção norte do Quadrilátero Ferrífero (DORR II, 1969). Segundo Varajão (1991), o relevo da região apresenta forte controle litoestrutural, com as unidades do Supergrupo Rio das Velhas em áreas de relevo mais íngreme e as rochas dos complexos metamórficos e intrusivas nas porções com relevo mais suave e topograficamente mais baixa, na Depressão Belo Horizonte (CAMPOS, 2011). A Depressão de Belo Horizonte é delimitada a sul pela

Serra do Curral, porção norte do Quadrilátero Ferrífero, e a norte pela bacia sedimentar de rochas carbonáticas e pelíticas do Grupo Bambuí (CAMPOS, 2011).

O clima dessa região é tropical chuvoso, com invernos secos (BARBOSA, 1980). O principal fator condicionante do clima é o relevo, pois as serras altas do norte do Quadrilátero Ferrífero agem como barreiras físicas ao transporte de umidade, proporcionando diferenças na precipitação e temperatura (DAVIS *et al.*, 2005).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Inicialmente, foram obtidos os materiais necessários para o estudo, tais como: mapa geológico, na escala de 1:1.000.000 (CPRM, 2014); dados aerogeofísicos, como radiometria e magnetometria, na escala de 1:100.000, do banco de dados geofísicos da CPRM; imagem de radar SRTM-30m e o respectivo modelo digital de elevação.

Para o levantamento de lineamentos de relevo morfoestruturais, utilizou-se a imagem de radar sombreada. Os lineamentos radiométricos foram traçados com base nos mapas do canais de tório (Th), urânio (U), potássio (K) e ternário. O mapa do canal de tório foi o mais utilizado por apresentar energia maior que os demais, de potássio (K) e de urânio (U) (BRITO, 2018), permitindo melhor detecção dos lineamentos.

Os mapas temáticos utilizados para traçar os lineamentos

magnetométricos foram o ASA (amplitude do sinal analítico), derivadas de primeira ordem nas direções X, Y e Z, GHT (gradiente horizontal total), ISA (inclinação do sinal analítico) e CMA (campo magnético anômalo). O mapa temático ASA se destaca por apresentar mais nitidamente as anomalias lineares (TELFORD *et al.*, 1990, KEAREY *et al.*, 2002).

As direções dos lineamentos morfoestruturais e geofísicos foram obtidas com a ferramenta Line Directional Mean do tópico Spatial Statistic Tools, e os mapas de densidade de lineamentos a partir da ferramenta Line Density, todas integrantes do ArcGis 10.3 (ESRI, 2014). Esta última possibilita o cálculo da magnitude das feições lineares por unidade contidas dentro da área de um raio ao redor de cada célula. Os raios foram definidos de acordo com valores aproximados da mediana do comprimento dos lineamentos, sendo atribuídos raios de 1000m para os mapas morfoestruturais e de 2000m para os mapas magnetométricos e radiométricos. Por fim, todos os lineamentos foram tratados no software OpenStereo (GROHMANN & CAMPANHA, 2010), onde foram geradas rosetas, apresentando as direções preferenciais.

O mapa de declividade foi obtido por meio da imagem de radar SRTM (30 m) para avaliar a influência da topografia na infiltração e recarga. A classificação do relevo foi baseada na divisão sugerida por Ramalho-Filho & Beek (1995), e apenas a última classe (45-75%) não foi utilizada por ocorrer em baixíssima proporção na área de estudo (Tabela 1).

Tabela 1 - Classificação do relevo

Declividade (%)	Classes de relevo
0 – 3	Plano
3 – 8	Suave-ondulado
8 – 13	Moderadamente ondulado
13 – 20	Ondulado
20 – 45	Forte-ondulado
45 – 75	Montanhoso

Fonte: Ramalho-Filho & Beek (1995)

O modelo HAND (Height Above the Nearest Drainage), criado por Rennó *et al.* (2008), permite o cálculo da distância vertical do canal de drenagem mais próximo (GOERL *et al.*, 2017). Por meio desse modelo, é possível inferir de forma aproximada a profundidade do nível de água subterrânea a partir da topografia, pois ele leva em consideração a variação altimétrica entre cada ponto da superfície do relevo e o canal de drenagem mais próximo (RENNÓ *et al.*, 2008). O modelo HAND e o mapa de declividade foram gerados a partir da imagem de radar SRTM 30 metros, utilizando o software TerraView 4.2.2 (INPE, 2019), com extensão TerraHidro 4.2.2, e o software ArcGis 10.3, respectivamente.

Todos os mapas foram reclassificados para posterior integração, sendo utilizado para isso, o método de quebras naturais (Jenks) para os mapas de densidade de lineamentos e HAND. O mapa de declividade seguiu a classificação de Ramalho-Filho & Beek (1995) e o litológico foi baseado em análises estatísticas prévias de produtividades de aquíferos que apontam para os diferentes potenciais das rochas com porosidade fissural (SINGHAL & GUPTA, 2010, FERNANDES *et al.*, 2016).

O AHP (Analytic Hierarchy Process), desenvolvido por Saaty (1987), é um método multicritério utilizado na tomada de decisões, organizando o problema de maneira hierárquica, estando o objetivo do trabalho no ponto mais elevado, seguido pelos critérios e, na porção inferior, as alternativas. Assim, é possível classificar por meio da atribuição de pesos, a ordem de prioridade dos critérios e subcritérios de um determinado projeto (VARGAS, 2010, BRITO, 2018; BRITO *et al.*, 2019). O maior diferencial do AHP é sua capacidade de conversão de dados empíricos em valores numéricos e o cálculo de um índice de consistência, que tem a função de diminuir a subjetividade na atribuição de pesos entre critérios e subcritérios. Consequentemente, este método possibilita cruzar planos de informações de forma menos subjetiva que os métodos de superposição de mapas usualmente empregados em diversas áreas do conhecimento (SAATY, 1987). Para isso, comparam-se os critérios, dois a dois, por meio de uma matriz (Tabela 2). Para que a comparação seja efetuada, deve-se atribuir valores de 1 a 9 para cada alternativa, segundo seu grau de importância, de acordo com a escala fundamental (Tabela 3), proposta por Saaty (2005).

Tabela 2 - Exemplo de tabela de matriz comparação

	Critério 1	Critério 2	Critério n
Critério 1	1	$a_{1,2}$	$1/a_{1,n}$
Critério 2	$1/a_{1,2}$	1	$a_{2,n}$
Critério n	$a_{1,n}$	$1/a_{2,n}$	1

Fonte: Saaty (1987)

Tabela 3 - Escala de relativa importância de Saaty

Escala	Avaliação Numérica	Recíproco
Extremamente preferido	9	1/9
Muito forte a extremo	8	1/8
Muito fortemente preferido	7	1/7
Forte a muito forte	6	1/6
Fortemente preferido	5	1/5
Moderado a forte	4	1/4
Moderadamente preferido	3	1/3
Igual a moderado	2	1/2
Igualmente preferido	1	1

Fonte: Saaty (2005)

Depois da análise comparativa, passa-se à normatização, para assim atribuir pesos aos critérios. Isto consiste na divisão de cada valor da tabela pelo somatório total de cada coluna. Por meio da média aritmética dos valores de cada critério normalizado, obtém-se o vetor de Eigen. Esse vetor, também chamado de vetor prioritário, mostra o peso relativo de cada item comparado (VARGAS, 2010).

Com o vetor de Eigen, verifica-se a consistência dos dados pelo índice de consistência (CI), que utiliza o valor do número principal de Eigen (λ_{\max}). Esse número é adquirido por meio do somatório do produto de cada elemento do vetor de Eigen pela soma total de cada coluna, efetuada anteriormente (tabela de comparação). O cálculo do índice de consistência,

em que n é o número de critérios avaliados, é fornecido pela equação 1:

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) \quad (1)$$

Em seguida, Saaty (2005) propõe o cálculo da taxa de consistência (CR), que deve ser inferior a 0,1 e pode ser calculada pela equação 2:

$$CR = CI / RI < 0,1 \approx 10\% \quad (2)$$

Onde,

RI = índice de consistência aleatório, obtido na tabela 4.

Tabela 4 - Índices de consistência aleatório (Saaty, 2005).

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Para efetuar esses cálculos e posterior geração da tabela de pesos, foi utilizado o programa Excel (Microsoft Office 2010) e a integração com o software ArcGis 10.3, por meio da sobreposição de layers.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na área de estudo foram reconhecidos 2121 lineamentos morfoestruturais, que se orientam preferencialmente de acordo com as seguintes direções, em ordem decrescente de abundância: NW-SE (N30-70W), NE-SW (N70-80W) e N-S e E-W (Figura 2 A).

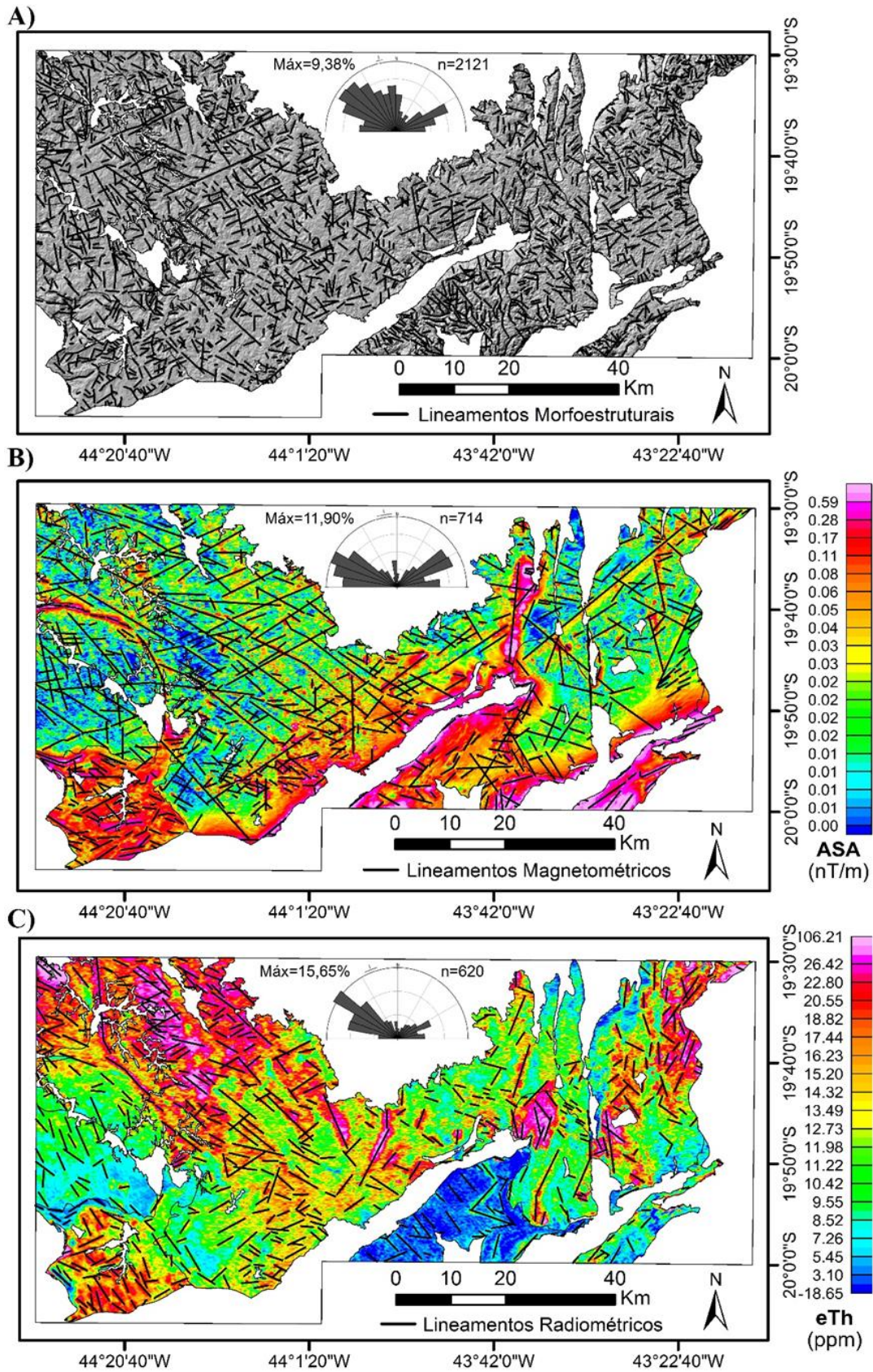
Foram obtidos 714 lineamentos no mapa magnetométrico, com direções preferenciais em ordem decrescente de frequência: NW-SE (N50-80W), NE-SW (N50-70E) e E-W e N-S (Figura 2 B). Ao todo foram traçados 620 lineamentos no mapa radiométrico, com as seguintes direções preferenciais em ordem decrescente de abundância: NW-SE, com destaque para N50-60W, NE-SW, E-W e N-S (Figura 2 C).

Analisando-se as rosetas confeccionadas por meio dos valores valores das direções dos lineamentos morfoestrutura-

is, magnetométricos e radiométricos (Figuras 2 A, B e C), é possível verificar similaridade em suas orientações. Todas apresentaram direção preferencial NW-SE e, secundariamente, NE-SW. Os lineamentos morfoestruturais e magnetométricos mostram também tendência de orientação N-S, diferentemente dos lineamentos radiométricos.

O mapa HAND (Figura 3 A), que fornece a profundidade aproximada do nível d'água subterrânea, foi obtido por meio do modelo digital de elevação (MDE) SRTM (30 m). Utilizou-se para confecção deste mapa o método de quebras naturais dos valores (Chen *et al.*, 2013) e ao final empregou-se quatro classes de valores: 0-43m, 43-102m, 102-208m e >208m. Quando se leva em consideração a profundidade da água subterrânea, os locais com valores entre 0 - 43m seriam os mais propícios a locação de poços tubulares. Em contrapartida, as poções com valores >208m seriam pouco favoráveis à exploração, pelo custo de perfuração e pelo fato de que dificilmente são encontradas fraturas abertas em grandes profundidades.

Figura 2 - Mapas dos três tipos de lineamentos: a) morfoestruturais; b) magnetométricos (ASA) e c) radiométricos (canal de tório)



No mapa de declividades (Figura 3 B), as áreas com valores inferiores à 13% são em tese mais propícias a exploração de água, pois correspondem a relevo ondulado a plano, onde o regolito tende a ser mais espesso e a infiltração e recarga da água subterrânea maiores (Brito, 2018). Assim, a unidade do

Complexo Belo Horizonte, principalmente a sua porção oeste, bem como as rochas intrusivas, mostraram relevo menos acentuado, constituindo áreas mais favoráveis. Já a área com as unidades do Supergrupo Rio das Velhas exibe topografia mais acidentada, em especial, na porção sudeste, onde o es-

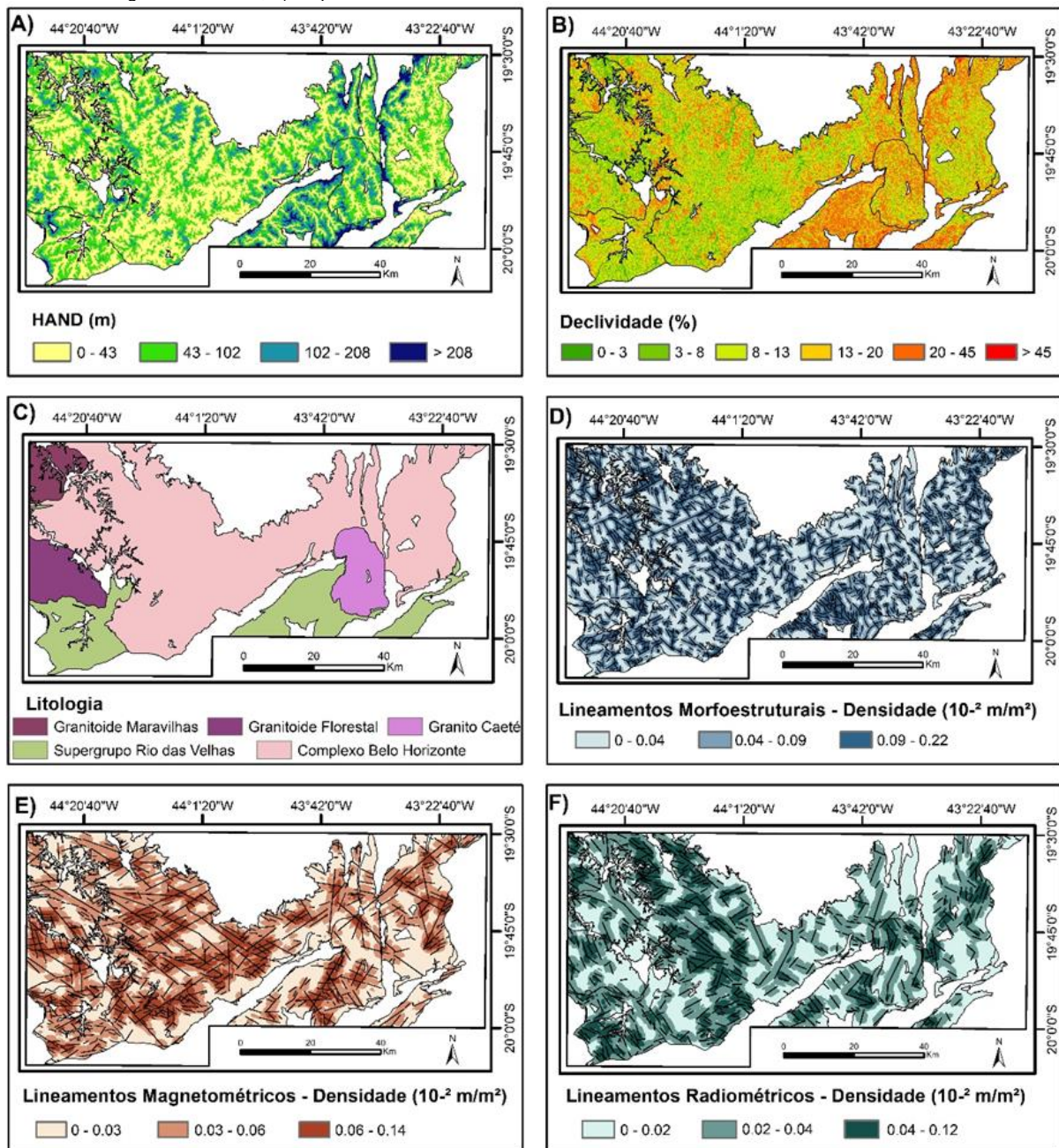
coamento superficial tende a ser maior e a recarga menor.

Quanto à litologia, considerando o histórico de produtividade em aquíferos fraturados discutidos anteriormente, o Complexo Belo Horizonte (gnaisse, granitos e migmatitos) figuraria como o mais favorável e os litotipos do Supergrupo Rio das Velhas (xistos, predominantemente) como menos favoráveis (Figura 3 C).

Foram ainda confeccionados três mapas de densidade de lineamentos (morfoestrutural, radiométrico e magnetométrico). Em cada mapa, os valores de densidade foram agrupados em

três classes pelo método das quebras naturais (otimização de JENKS, CHEN *et al.*, 2013), em baixa, média e alta densidade (Figuras 3 D, E e F) para realçar porções com maior quantidade e conectividade de lineamentos, que constituem atributos relevantes para aquíferos fraturados (SINGHAL & GUPTA, 2010). O mapa com maiores valores de densidade de lineamentos foi o morfoestrutural, seguido pelo magnetométrico e, por fim, pelo radiométrico. Em todos, a região com maior densidade de lineamentos foi a do Complexo Belo Horizonte, constituído por rochas de comportamento mais rúptil que o das rochas do Supergrupo Rio das Velhas.

Figura 3 - Mapas utilizados na integração para produção do modelo final de favorabilidade hídrica. A) Modelo HAND; B) mapa de declividade; C) mapa litológico; D) mapa de densidade de lineamentos morfoestruturais; E) mapa de densidade de lineamentos magnetométricos e, F) mapa de densidade de lineamentos radiométricos



Os mapas dos três tipos de lineamentos foram muito coerentes entre si, mostrando direções e densidade de lineamentos semelhantes. Isto sugere que os lineamentos mais profundos, captados pela magnetometria, foram reativados em eventos geológicos mais recentes, manifestados pelos lineamentos radiométricos e morfoestruturais.

Os mapas de favorabilidade para ocorrência de água subterrânea foram gerados a partir da ferramenta Raster Calculator, do software ArcGis 10.3, realizando-se a soma de quatro mapas temáticos (HAND, declividade, densidade de lineamentos e litologia) e superpondo layers de acordo com a classificação com o método AHP.

Inicialmente, aplicou-se a álgebra de mapas para os seis mapas, assim como no método proposto por Brito (2018). Contudo, ao validar os resultados com a utilização da capacidade específica dos poços tubulares da região, constatou-se não ser preciso empregar todos os mapas de densidade de lineamentos, possivelmente devido à redundância dos seus resultados. Deste modo, por meio de várias tentativas de inclusão e retirada de mapas, e consequente modificações nos pesos atribuídos, percebeu-se que com a integração de apenas três mapas (HAND, declividade e litológico), adicionando-se somente um dos mapas de densidade de lineamentos, o resultado já seria satisfatório (Figura 4). O mapa de

lineamentos morfoestruturais, mais usual e de mais fácil elaboração, tende a ser a opção natural neste tipo de estudo. Logo, foram atribuídos pesos para cada mapa (critérios) por meio da técnica AHP. Os pesos obtidos por Brito (2018) para o mapa de favorabilidade para os complexos metamórficos Bação e Bonfim Setentrional (Tabela 5) foram modificados, pois o número de mapas diminuiu. Ao final, no modelo adotado, o HAND ficou com um peso de 47,6%, o mapa de declividade de 28,8%, o mapa de densidade com 15,4% e o mapa litológico com apenas 8,1%. Embora tenham ocorrido algumas mudanças, a importância dos fatores geomorfológicos (HAND e declividade) se manteve na presente análise.

Também foram atribuídos pesos para os subcritérios (classes) de cada mapa, e os valores utilizados foram extraídos da tabela AHP de Brito (2018) para os mapas HAND, litológico e de densidade de lineamentos morfoestruturais, magnetométricos e radiométricos. Já para o mapa de declividade, os pesos foram recalculados, pois o número de classes empregadas foi diferente. Assim, para o modelo HAND foram utilizados os seguintes pesos: 50,6% (0-43m), 32,6% (43-102m), 11,4% (102-208m) e 5,4% (>208m). Para o mapa de declividade foram obtidos os pesos: 33,6% (0-3%), 33,6% (3-8%), 16,6% (8-13%), 8,9% (13-20%), 4,7% (20-45%) e 2,6% (>45%).

Tabela 5 - Tabela confeccionada por Brito (2018) para atribuição de pesos dos mapas temáticos

MATRIZ COMPARATIVA								
Critérios	HAND	Declividade	Den. Morfo.	Den. Rad.	Den. Mag.	Litologia		
HAND	1	2	2	3	4	5		
Declividade	1/2	1	1	2	3	4		
Den. Morfo.	1/2	1	1	2	3	4		
Den. Rad.	1/3	1/2	1/2	1	2	3		
Den. Mag.	1/4	1/3	1/3	1/2	1	2		
Litologia	1/5	1/4	1/4	1/3	1/2	1		
Total	2.7833	5.0833	5.0833	8.8333	13.5	19		
MATRIZ NORMALIZADA							Vetor de Eigen (λ)	%
HAND	0.35928	0.39344	0.39344	0.33962	0.29629	0.26316	0.341	34.087
Declividade	0.17964	0.19672	0.19672	0.22642	0.22222	0.21053	0.205	20.537
Den. Morfo.	0.17964	0.19672	0.19672	0.22642	0.22222	0.21053	0.205	20.537
Den. Rad.	0.11976	0.09836	0.09836	0.11321	0.14815	0.15789	0.123	12.262
Den. Mag.	0.08982	0.06557	0.06557	0.05660	0.07407	0.10526	0.076	7.615
Litologia	0.07186	0.04918	0.04918	0.03774	0.03704	0.05263	0.050	4.960

Os mapas de densidade de lineamentos morfoestruturais, magnetométricos e radiométricos foram divididos em três classes: baixa, moderada e alta, com pesos iguais a 10,6%, 26,1% e 63,3%, respectivamente. Por fim, o mapa litológico foi classificado em: gnaisses (Complexo Belo Horizonte) com peso 63,3%, granitóides (Granito Caeté, Granitóide Florestal e Granitóide Maravilhas - Cachoeira da Prata), com peso de 26,1% e os xistos do Supergrupo Rio das Velhas - Grupo Nova Lima correspondendo a um peso de 10,6%.

A validação dos resultados foi efetuada a partir do cálculo da capacidade específica dos poços obtidos no banco de dados hidrogeológicos SIAGAS (Sistema de Informações de Águas Subterrâneas) da CPRM. No total, foram adquiridos dados de 727 poços, mas constatou-se que apenas 361 detinham valores de vazão, nível estático e nível dinâmico, ou seja, apresentavam dados suficientes para calcular a capacidade específica. Parte destes poços não dispõem de informações sobre a duração do teste de bombeamento, mas em 88% dos

que tinham tais informações o tempo de bombeamento foi de 24 horas para determinação da capacidade específica. Como os rebaixamentos tendem a ser rápidos em aquíferos fraturados, as capacidades específicas não variam significativamente após algumas horas de bombeamento (RISSER, 2010). Assim, optou-se por utilizar os dados de capacidade específica sem considerar os tempos de bombeamento. As capacidades específicas foram divididas em três faixas de forma que a classe de baixa capacidade específica representa 33,33% dos dados, a moderada valores entre 33,33% e

66,66% das informações, e a alta a valores contidos acima de 66,66%. Assim, as capacidades específicas foram classificadas em baixa ($\leq 0,13 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$), moderada ($> 0,13 \text{ e } < 0,40 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$) e alta ($\geq 0,40 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$).

Foram definidas três classes de favorabilidade de água subterrânea, baixa, moderada e alta, utilizando o método de classificação por quebras naturais (Jenks) e estes dados foram cruzados com as áreas de diferentes favorabilidades (Figura 5).

Figura 4 - Modelos finais de favorabilidade hídrica subterrânea utilizando a densidade de lineamentos morfoestruturais (a), magnetométricos (b) e radiométricos (c). Os mapas foram validados por meio dos valores de capacidade específica dos poços tubulares na área de estudo

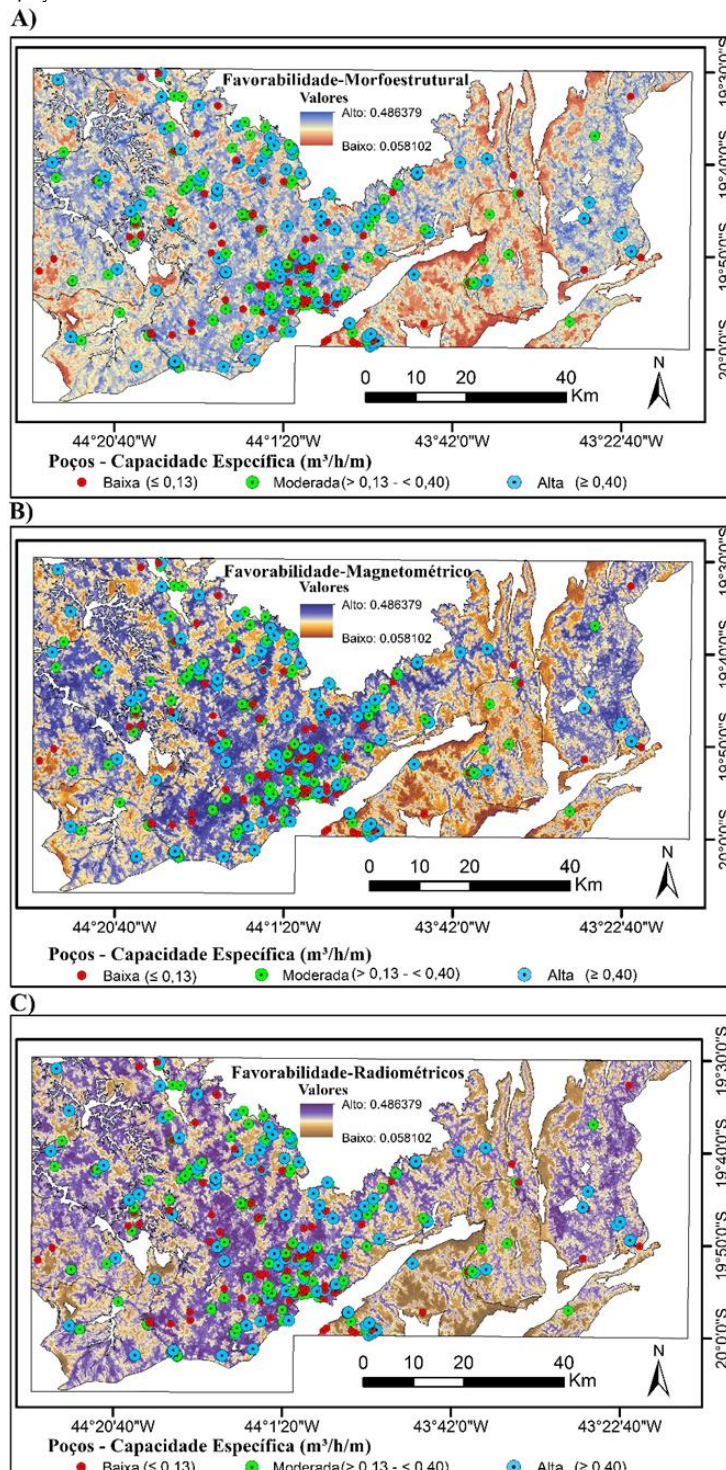
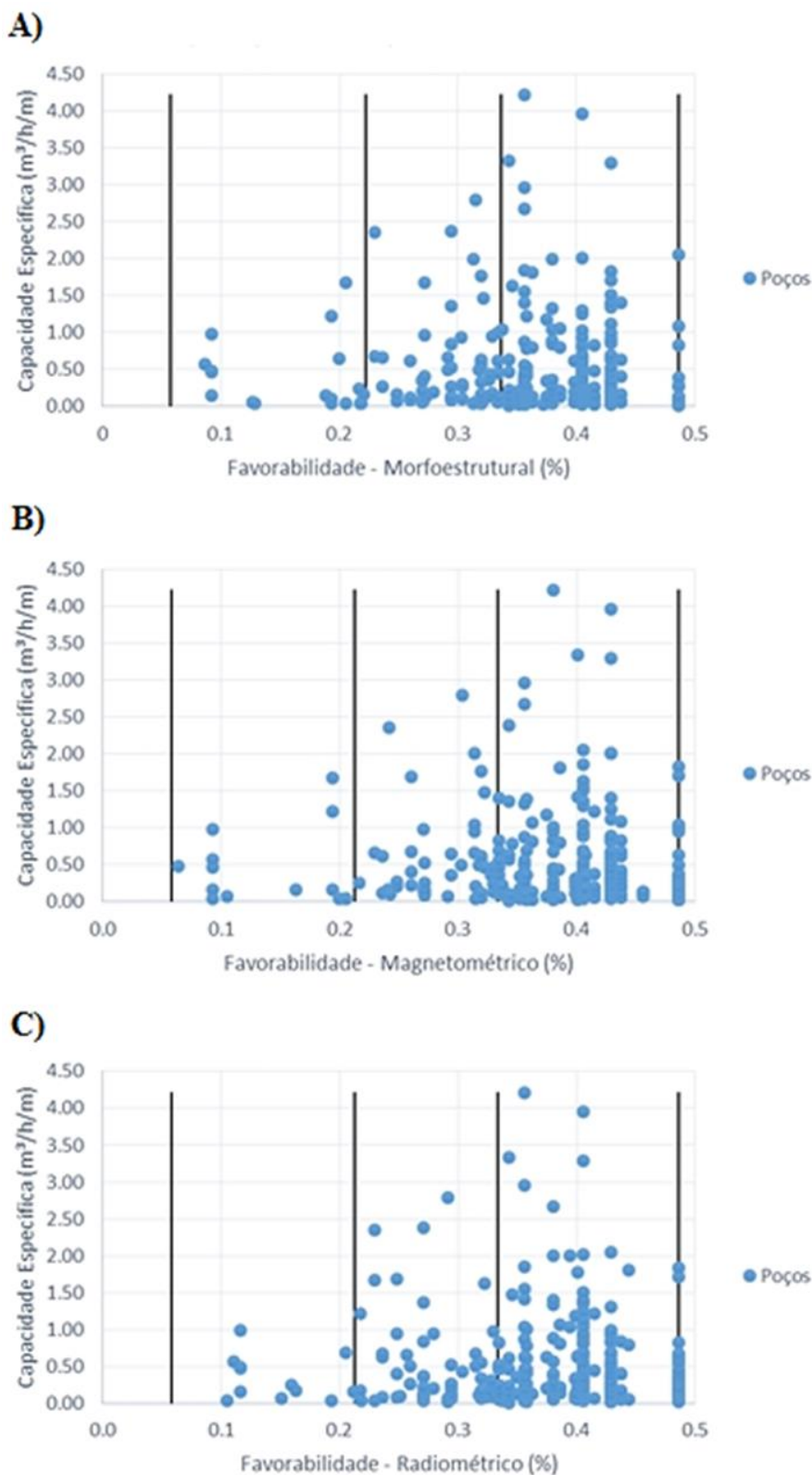


Figura 5 - Gráficos de dispersão com a relação entre a capacidade específica dos poços tubulares e a favorabilidade hídrica subterrânea, utilizando os lineamentos morfoestruturais (a), lineamentos magnetométricos (b) e lineamentos radiométricos (c). Notar a similaridade dos resultados



Nas áreas interpretadas como de baixa favorabilidade encontram-se os poços com menores capacidades específicas e há uma tendência dos poços mais produtivos se situarem em áreas avaliadas como de favorabilidade média e, principalmente, alta, independentemente do mapa de densidade de lineamentos empregado. Nas áreas de média e alta favorabilidade há muitos poços com baixa capacidade específica, mas

a tendência de alta nestas classes é óbvia. Cabe lembrar que a produtividade de poços não depende somente do aquífero, como também das condições de perfuração do poço, inclusive da posição deste com relação às estruturas geológicas e, subsequentemente, de sua completação e desenvolvimento. Desta forma, considera-se que o resultado foi satisfatório e similar ao encontrado por Brito *et al.* (2019) em complexos do

embasamento situados mais ao sul. A única diferença em relação àquele trabalho foi o emprego de apenas um mapa de densidades de lineamentos. Esta diferença pode ser atribuída a maior redundância entre os lineamentos morfoestruturais, radiométricos e magnetométricos encontrada nesta área. No presente trabalho evidenciou-se que basta o emprego do mapa de densidade de lineamentos morfoestruturais, que é de mais fácil aquisição e processamento que os mapas geofísicos.

5. CONCLUSÃO

O método proposto anteriormente (Brito, 2018, Brito, et al., 2019) para a caracterização da favorabilidade de produção de água subterrânea se mostrou também eficaz para a presente área de estudo, com pequenas modificações. Diferentemente do modelo daquela autora, neste trabalho foi empregado apenas um mapa de densidade de lineamentos, já que os resultados foram similares para os três tipos de lineamentos levantados (magnetométricos, radiométricos e morfoestruturais). Isto ocorreu, provavelmente, devido à redundância dos três mapas de lineamentos, que pode ser consequência da reativação de estruturas geológicas antigas, por eventos tectônicos mais recentes.

Ao final, os pesos de cada um dos fatores condicionantes foi o seguinte: HAND (47,6%), declividade (28,8%), densidade de lineamentos (15,4%) e litologia (8,1%). Demonstrou-se, assim, que os condicionantes geomorfológicos apresentam maior peso, a estrutura geológica peso intermediário e a litologia, peso menor, situação similar a encontrada por Brito (2018).

O modelo HAND se mostrou uma ferramenta relevante para definição de regiões suscetíveis à ocorrência de água subterrânea, pois fornece uma profundidade mínima esperada da superfície freática, fator importante para aquíferos fraturados, já que as fraturas tendem a fechar em profundidade devido às tensões confinantes.

O método AHP (Analytic Hierarchy Process) foi muito útil, pois além da sua versatilidade, tende a minimizar os erros e a subjetividade dos métodos usuais de superposição dos mapas. Ele foi de suma importância na definição dos pesos dos mapas temáticos, que originaram o modelo de favorabilidade hídrica subterrânea. A determinação da capacidade específica dos 361 poços tubulares na área contribuiu para a confirmação da efetividade do modelo final, pois os maiores valores de capacidade específica se situaram em locais de favorabilidade média e, especialmente, alta.

Acredita-se que o modelo originalmente proposto por Brito (2018) e aqui refinado, pode ser útil para otimizar a perfuração de poços tubulares em aquíferos fraturados na região e, possivelmente, em outras regiões similares.

AGRADECIMENTOS

À UFOP e a CPRM pelo apoio e bolsa concedida. E ao CNPq, à CAPES, à FAPEMIG pelo apoio direto e indireto.

REFERÊNCIAS

- ALKMIM, F.F.; MARSHAK, S. Transamazonian Orogeny in the Southern São Francisco Craton Region, Minas Gerais, Brazil: Evidence for Paleoproterozoic Collision and Collapse in the Quadrilátero Ferrífero. *Precambrian Research*, v. 90, n. 1, p. 29-58, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(98\)00032-1](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(98)00032-1)
- BACELLAR, L.A.P. *Condicionantes geológicas, geomorfológicas e geotécnicas dos mecanismos de voçorocamento na bacia do rio Maracujá, Ouro Preto*, M.G.Tese (Doutorado) - COPP/UFRJ, 2000.
- BARBOSA, G.V. Superfícies de erosão no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. São Paulo. *Revista Brasileira de Geociências*, n. 10, p. 89-101, 1980. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.198089101>
- BRITO, T.P. *Avaliação do potencial hídrico de aquíferos fissurais dos Complexos Bação e Bonfim Setentrional, Quadrilátero Ferrífero - MG*. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto, 116p, 2018.
- BRITO, T.P.; BACELLAR, L.A.P.; BARBOSA, M.S.C.; BARELLA, C.F. Assessment of the groundwater favorability of fractured aquifers from the southeastern Brazil crystalline basement. *Hydrological Sci. Journ.*, 2019. <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1703993>.
- CAMPOS, L. C. *Proposta de reanálise do risco geológico/geotécnico de escorregamentos em Belo Horizonte - Minas Gerais*. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Geotecnia e Transportes, Universidade Federal de Minas Gerais, 143p, 2011.
- CHEMALE, JR.F.; ROSIÈRE, C.A.; ENDO, I. Evolução tectônica do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais: um modelo. *Pesquisas*, v. 18, n. 2, p. 104-127, 1991. <https://doi.org/10.22456/1807-9806.21350>
- CHEN, J.; YANG, S.; LI, H.; ZHANG, B.; LV J. Research on geographical environment unit division based on the method of natural breaks (JENKS), *ISPRS Archives*. v.XL-4/W3. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-4-W3-47-2013>
- CHILTON, P.J.; FOSTER, S. Hydrogeological Characterizations and Water-Supply Potential of Basement Aquifers in Tropical Africa. *Hydrogeology Journal*, 3, p. 36-49. <https://doi.org/10.1007/s100400050061>
- COOK, P.G. *A guide to regional groundwater flow in fractured rock aquifers*. Glen Osmond: CSIRO Land and Water, 2003.
- COSTA, W.D. Hidrogeologia dos meios fissurados. Cap. 3.2 In: FEITOSA F.A.C., MANOEL FILHO J., FEITOSA, E.C, DEMÉTRIO, J. G.A (eds.). *Hidrogeologia: conceitos e aplicações*. 3. ed. Rio de Janeiro. CPRM - Serviço Geológico do Brasil - CPRM, 812 p. 2008.
- CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. *Carta geológica Folha SE.23-Z-C-VI*. Belo Horizonte Esc 1:100.000, 2009
- CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. *Mapa Geológico de Minas Gerais*. Belo Horizonte: CPRM, 2003. Escala 1:1.000.000, 2014.
- DAVIS, E. G.; PINTO, E. J. A.; PINTO, M. C. F. Hidrologia. In: *Projeto APA Sul RMBH Estudos do Meio Físico: área de proteção*

- ambiental da região metropolitana de Belo Horizonte. Belo Horizonte: CPRM/SEMAD/CEMIG, 2005. v.9, 2005.
- DORR II, J.V.N. Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. U.S. Geological Survey Professional Paper, 641-A:1-110, 1969. <https://doi.org/10.3133/pp641A>
- ERNESTO, M.; USSAMI, N. *Introdução à geofísica*. Apostila da disciplina AGG0115. Departamento de Geofísica, IAG/USP, 65p, 2002.
- ESRI. ARCGIS 10.3 *Enterprise Deployment* – An Esri Technical Paper, USA, 2014. disponível em: <https://www.esri.com/pt-br/arcgis/products/arcgis-maps-for-office/download>. Acesso: 10 set. 2018.
- FERNANDES, A.J.; CHRISTOFOLETTI, C.; PINO, D.S.; SIMONATO, M.D.; PINHATTI, A.; CONNCELLI, B. P.; HIRATA, R.; BERTOLO, R. Avaliação regional e identificação de critérios para locação de poços nos aquíferos fraturados da RMSP (Regional assessment and criteria identification for the location of wells in fractured aquifers of the RMSP). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 19., 2016. [Anais...]. 2016.
- FERNANDES, A.J. Aquíferos fraturados: uma revisão dos condicionantes geológicos e dos métodos de investigação. *Revista do Instituto Geológico*, v. 29, n. 1, p. 49-72, 2008. <https://doi.org/10.5935/0100-929X.20080005>
- GOERL, R.F.; MICHEL, G.P.; KOBIYAMA, M. Mapeamento de áreas suscetíveis a inundação com o modelo HAND e análise do seu desempenho em diferentes resoluções espaciais. *Revista Brasileira de Cartografia*, n. 69/1, Edição Especial Geotecnologias e Desastres Naturais, p. 61-69, 2017.
- GROHMANN, C.H.; CAMPANHA, G.A. OpenStereo: Open Source, Cross-Platform Software for Structural Geology Analysis, Institute of Geosciences - USP, São Paulo, SP. 2010. Disponível em: <http://sites.igc.usp.br/openstereo/download/>. Acesso: 17 abr. 2019.
- INPE. *TerraView* 4.2.2. 2019. Disponível em: www.dpi.inpe.br/terraview. Acesso: 29 abr. 2019.
- KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. *An introduction to geophysical exploration*. Blackwell Publishing, 249p, 2002.
- LACHASSAGNE, P. Overview of the Hydrogeology of Hard Rock Aquifers: Applications for their Survey, Management, Modeling and Protection. In: S. AHMED R. JAYAKUMAR, AND A. SALIH. (eds.) *Groundwater dynamics in hard rock aquifers*. India: Capital Publishing Company, p. 40-63, 2008. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6540-8_3
- LOWRIE, W. *Fundamentals of geophysics*. Cambridge, Cambridge University, 375 p, 2004.
- MACHADO, N.; NOCE, C.M. A evolução do setor sul do Cráton do São Francisco entre 3.1 e 0.5 Ga baseada em geocronologia U-Pb. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO CRÁTON DO SÃO FRANCISCO, 2., 1993. [Anais...] Salvador. Soc. Bras. Geol., Núcleo Bahia, Sergipe. pp. 100-102, 1993.
- MOORE, S.L. Geology and ore deposits of the Antonio dos Santos, Gongo Soco, and Conceição do Rio Acirna quadrangles, Minas Gerais, Brazil. U.S. Geol. Survey Professional Paper 341-1, 50 p, 1969. <https://doi.org/10.3133/pp3411>
- NOCE, C.M. *Geocronologia dos eventos magmáticos, sedimentares e metamórficos na região do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais*. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 128p, 1995. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.199895102>
- NOCE, C.M.; MACHADO, N.; TEIXEIRA, W. U-Pb geochronology of gneisses and granitoids in the Quadrilátero Ferrífero (southern São Francisco craton): age constraints for Archean and Paleoproterozoic magmatism and metamorphism. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 28, n. 1, p. 95-102, 1998.
- O'LEARY, D.W.; FRIEDMAN, J.D.; POHN, H. A. Lineament, linear, lineation: some proposed new standards for old terms. *Geological Society of America Bulletin*, v. 87, p. 1463-1469, 1976. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1976\)87<1463:LLLSPN>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1976)87<1463:LLLSPN>2.0.CO;2)
- OLIVEIRA E.A. *Geologia, Petrografia e Geoquímica do Maciço Granitóide de Cachoeira da Prata*. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, 82 p, 1999.
- RAMALHO-FILHO, A.; BEEK, K. J. *Sistema de avaliação da aptidão agrícola das terras*. 3. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPS, 65p, 1995.
- RENNÓ, C.D.; NOBRE, A.D.; CUARTAS, L.A.; SOARES, J.V.; HODNETT, M.G.; TOMASELLA, J.; WATERLOO, M.J. HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: Mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. *Remote Sens. of Environ.* V. 112, n. 9, p. 3469-3481. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.03.018>
- RISSER, D.W. Factors affecting specific-capacity tests and their application—A study of six low-yielding wells in fractured-bedrock aquifers in Pennsylvania: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010-5212, 44 p, 2010. <https://doi.org/10.3133/sir20105212>
- ROMANO, A.W.; BILAL, E.; CORREA NEVES, J.M.; GIRET, A.; MOUTTE, J. O Complexo Granítico de Florestal-parte meridional do Cráton de São Francisco - primeiros dados petrográficos e geoquímicos. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DE MINAS GERAIS. Diamantina. 8., 1995. [Anais...] Bol., Diamantina, SBG/MG, 13: 86-88, 1995.
- ROMANO, A.W.; SOARES, A.C.P. *Geologia da folha Pará de Minas SE.23-Z-C-IV*. Programa Geologia do Brasil. CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, 2007.
- SÁ, E.F.J. DE; SILVA, C.C.N; CORIOLANO, A.C.F.; MEDEIROS, W.E. Conceitos de Análise Estrutural Aplicados à Hidrogeologia de Terrenos Cristalinos. Cap. 3.1. In: FEITOSA A. C., MANOEL FILHO J., FEITOSA E.C., DEMÉTRIO J.G.A. *Hidrogeologia: conceitos e aplicações*. (ed.) 3. ed. Rio de Janeiro: Serviço Geológico do Brasil - CPRM, 812p, 2008.
- SAATY, R.W. The Analytic Hierarchy Process - What it is and how it is used, *Math. Model.* v. 9, n. 3, p. :161-176, 1987. [https://doi.org/10.1016/0270-0255\(87\)90473-8](https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8)
- SAATY, T.L. *Theory and applications of the analytic network process: Decision Making with Benefits, Opportunities, Costs, and Risks*. RWS Publ, 2005.
- SINGHAL, B.B.S.; GUPTA, R.P. *Applied hydrogeology of fractured rocks*. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 408 p, 2010. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-8799-7>

TELFORD, W.M.; GELDART, L.P.; SHERIFF, R.E. *Applied geophysics*. Cambridge University Press. 770p, 1990. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139167932>

VARAJÃO, C.A.C. A questão da correlação das superfícies de erosão do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 21, n. 2, p. 138-145, 1991. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.1991138145>

VARGAS, R. *Utilizando a programação multicritério (AHP) para selecionar e priorizar projetos na gestão de portfólio*. 2019. Disponível em: <https://ricardo-vargas.com/pt/articles/analytic-hierarchy-process/>. Acesso em: 18 abr. 2010.