

Artigos

Estimando a Potencialidade Hidrogeológica da Bacia Cárstica do Rio Vieira, Região Hidrográfica do Verde Grande, MG

Estimating Groundwater Potentiality of the Vieira River Karst Watershed, Verde Grande Hydrographic Region, MG

Rafaela Assunção Gurita¹; Paulo Henrique Ferreira Galvão²; Maria Antonieta Alcântara Mourão³; Pedro Henrique da Silva Assunção²

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

² Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, MG.

³ Serviço Geológico do Brasil – CPRM.

✉ rafagurita@hotmail.com, hidropaulo@gmail.com, maria.antonietta@cprm.gov.br, pedroassuncao94@hotmail.com

Palavras-chave:

Potencialidade Hidrogeológica;
Aquífero Cárstico;
Bacia Hidrogeológica;
Montes Claros;
Método APLIS.

Keywords:

Hydrogeological Potentiality;
Karstic Aquifer;
Hydrogeological Basin;
Montes Claros;
APLIS Method.

Revisão por pares.

Recebido em: 30/06/2022.

Aprovado em: 01/09/2022.

Resumo

Na bacia do rio Vieira, norte de Minas Gerais, onde há o predomínio de três domínios hidrogeológicos (granular, fissural e cárstico-fissural), questões sobre ineficiência da gestão dos recursos hídricos, aliadas ao clima semiárido e escassez de estudos locais, agravam as condições de disponibilidade hídrica, principalmente na estiagem. O objetivo deste artigo foi aplicar e adaptar um método de delimitação de potencial hidrogeológico em uma região cárstica, associando dados geológicos e morfoestruturais com testes de bombeamento de poços profundos (capacidade específica, Q/s, e transmissividade, T), bem como geofísica e sensoriamento remoto. O método foi validado com a calibração dos pesos de mapas temáticos com valores de T e Q/s, indicando que as regiões potencialmente mais produtivas estão relacionadas a quatro fatores: 1) densidade de lineamentos (morfoestruturais e geofísicos) e de feições cársticas, nas direções principais NE-SW e NNE-SSW; 2) tipos de sistemas aquíferos locais (granular, fissural e cárstico-fissural); 3) baixas declividades e proximidades com drenagens; e 4) recarga. Em toda a área, é notável a distribuição espacial de poços com alta variabilidade de produtividade (Q/s variando de 0,01 a 60 m³/h/m e T variando de 10-5 a 10-3 m²/h), o que indica que o aquífero cárstico na região é anisotrópico e heterogêneo.

Abstract

In the Vieira River basin, north of Minas Gerais, where there is a predominance of three hydrogeological domains (granular, fractured, and karst-fractured), issues about inefficiency in the water resource management, coupled with the semi-arid climate and scarcity of local studies, worsen the conditions of water availability, mainly in the dry season. The objective of this paper was to apply and adapt a method of delimitation of hydrogeological potentiality in a karst region by associating geological and morphological data with pumping tests (specific capacity, Q/s, and transmissivity, T), as well as geophysics, and remote sensing. The method was validated by calibrating weights of thematic maps with values of T and Q/s, indicating that the potentially more productive regions are correlated to four factors: 1) density of lineaments (morphostructural and geophysical) and karst features, mainly in the NE-SW and NNE-SSW directions; 2) types of local aquifer systems; 3) low slopes and nearby drainages; and 4) recharge. In the whole area, the spatial distribution of wells with high productivity variability is remarkable (Q/s ranging from 0.01 to 60 m³/h/m and T ranging from 10-5 to 10-3 m²/h), which indicates how much the karst aquifer in the region is anisotropic and heterogeneous.

DOI: <http://doi.org/10.14295/ras.v36i2.30156>

1. INTRODUÇÃO

A expansão urbana e o crescimento das atividades industrial, agropecuária e mineral demandam, cada vez mais, recursos hídricos subterrâneos (FEITOSA *et al.*, 2008). Como consequência, podem ocorrer impactos na qualidade e quantidade das águas, caso não haja um estudo prévio hidrogeológico e monitoramento das reservas hídricas (AFONSO, 2015). Em regiões cársticas, esses impactos podem ser significativos, pois a água subterrânea é uma alternativa de abastecimento ainda maior

em relação à água superficial, já que nessas regiões a rede de drenagem é subterrânea e o fluxo superficial é transferido para os aquíferos, via sumidouros, dolinas ou cavernas para condutos subterrâneos (ANA, 2010). Ademais, aquíferos cársticos são altamente vulneráveis à contaminação, devido o rápido fluxo d'água, sem tempo suficiente para possíveis degradações do contaminante (GOLDSCHIEDER; DREW, 2007).

Em certas regiões do estado de Minas Gerais, principalmente aquelas inseridas geologicamente no Grupo Bambuí,

caracterizadas por rochas calcárias e pelíticas, são comuns os relevos cársticos, com redes de drenagens superficiais pouco desenvolvidas, fluxo dinâmico de água e reservas subterrâneas expressivas suficientes para abastecer cidades de pequeno e médio portes (CPRM/IGAM, 2019). No caso da região cárstica no norte de Minas Gerais, e que abrange a cidade de Montes Claros, são comuns problemas associados ao abastecimento de água, principalmente na estiagem.

ANA (2018) atribui esses problemas ao déficit hídrico gerado pelo uso intensivo da agricultura irrigada, iniciada na década de 1980, e ao regime hidrológico irregular do semiárido com registros prolongados de seca. Nesse sentido, o esgotamento dos recursos hídricos, como seca de nascentes ou rebaixamentos d'água em poços, prejudica não só o abastecimento, mas também gera conflitos entre usuários. Essas questões, associados a uma ineficiente gestão hídrica e urbanização não planejada, corroboram o surgimento de potenciais consequências, como uso intensivo da água e rebaixamento do nível freático, podendo ocorrer esgotamento de condutos, supressão de nascentes e subsidências de terrenos em zonas urbanas (GALVÃO *et al.*, 2015).

Uma forma para minimizar essas consequências é entender melhor as regiões mais prováveis de fluxo e armazenamento hídricos, de modo a reduzir o insucesso de perfurações ou evitar extrações de água em áreas mais sensíveis em termos quali-quantitativos. Existem estudos que aplicam métodos teóricos ou empíricos para zonestar potenciais hídricos subterrâneos, desenvolvidos para aquíferos porosos (NIEDZIELSKI ANDREA, 2013), fraturados (BARRETO *et al.*, 2001; LIMA *et al.*, 2009; AYER *et al.*, 2017, BRITO *et al.*, 2018) e cársticos (MAGNABOSCO *et al.*, 2020), todos considerando características e contextos hidrogeológicos locais.

Com relação ao desenvolvimento econômico e urbano de Montes Claros, ocorreu uma expansão acelerada e não planejada na década de 1960, quando o município foi inserido na área de atuação da SUDENE (BORGES, 2007). Atualmente, a cidade tem cerca de 418.000 habitantes (IBGE, 2022) e o abastecimento é quase que integralmente por água superficial. Entretanto, o uso de poços tubulares, que explora majoritariamente águas do Aquífero Cárstico Lagoa do Jacaré, constitui uma alternativa adotada pela indústria, comércio e residências (ANA, 2018).

Em função do desenvolvimento da região e o consequente aumento da demanda hídrica, o uso da água subterrânea foi ampliado, nas últimas três décadas, como alternativa de abastecimento, especialmente em períodos de estiagem prolongada. Os impactos são notados a partir de 2013, quando importantes trechos de drenagens se tornam intermitentes, afetando diversos ramos da economia, estimulando o aumento de conflitos entre usuários, sendo estes registrados desde a década de 1980 (ANA, 2009).

O objetivo desse artigo foi aplicar e adaptar o método de mapeamento do potencial hidrogeológico do aquífero cárstico. Foram analisados parâmetros relevantes do potencial hídrico subterrâneo, como lineamentos (morfoestrutural e geofísicas radiométrica e magnetométrica), características das unidades aquíferas (parâmetros hidráulicos, tipos de aquíferos), declividade do terreno, feições cársticas e recarga. O método foi validado com base na calibração dos pesos dos mapas de transmissividade do aquífero e capacidade específica de poços.

Esta pesquisa é resultado de dados cedidos do projeto “Estudos para Implementação da Gestão Integrada de Águas Superficiais e Subterrâneas na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco: Sub-bacias dos Rios Verde Grande e Carinhanha (BA/MG)”, coordenado pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) e executado pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM).

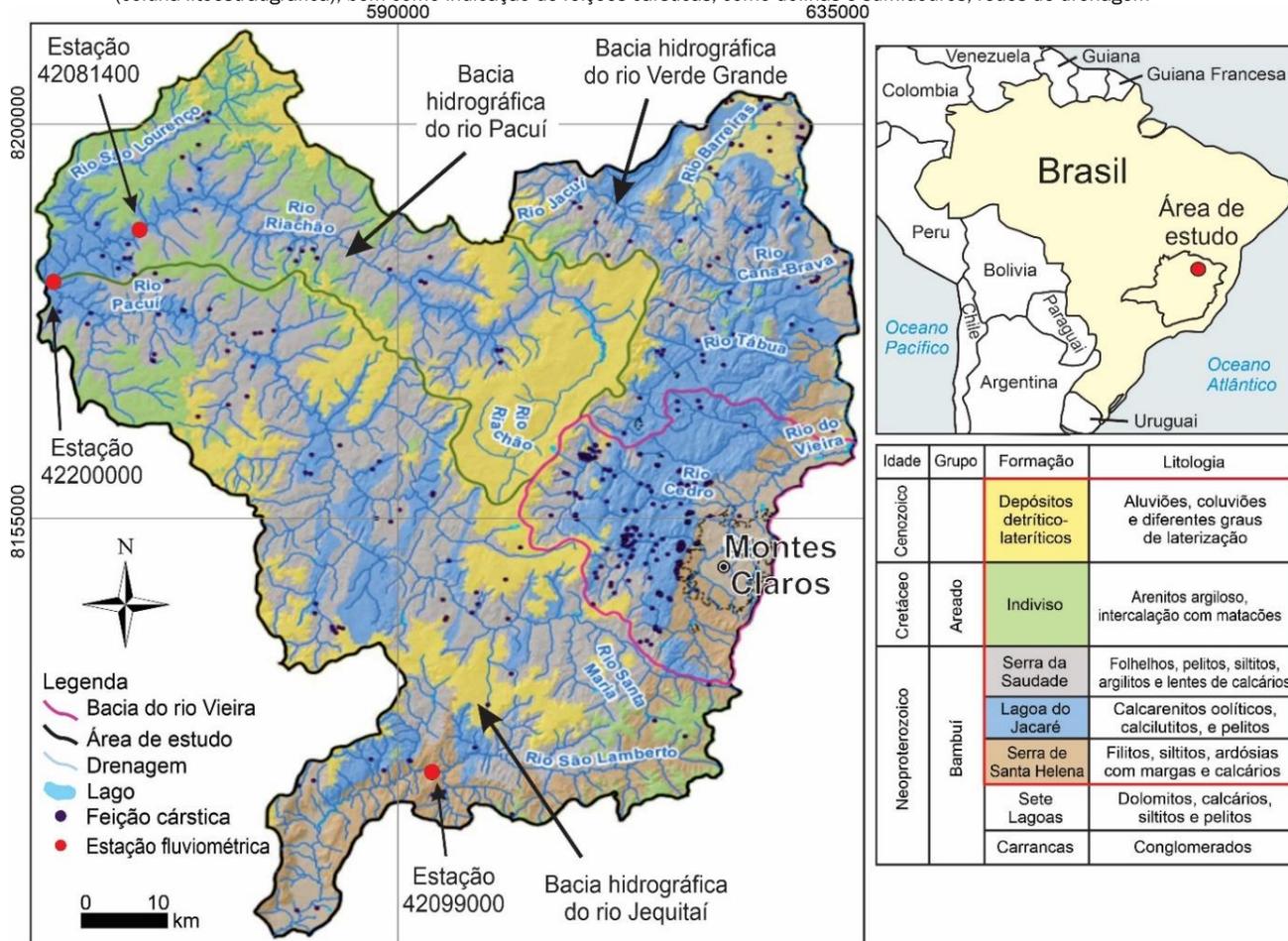
2. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo (Figura 1) está inserida na mesorregião norte de Minas Gerais (CPRM/IGAM, 2019), abrangendo os municípios de Montes Claros, Mirabela, Brasília de Minas, Coração de Jesus e São João da Lagoa. Montes Claros se destaca por ser um importante polo na região, principalmente nos ramos da pecuária, indústria e comércio. Essas atividades demandam grande quantidade de recursos hídricos, especialmente nos períodos de estiagem. Dessa forma, é comum o aumento expressivo do uso da água subterrânea como alternativa de abastecimento (BRANDÃO; SILVA, 2016).

Para delimitar a área de estudo foi considerada a proposta feita pela Agência Nacional das Águas (ANA, 2018), com base em um compartimento hidrogeológico onde não há perdas ou ganhos de água subterrânea para bacias adjacentes. Essa delimitação, considerada um domínio de controle do balanço hídrico, e denominada de “bacia hidrogeológica do rio Vieira”, compreende: i) bacia do rio Verde Grande: sub-bacias hidrográficas dos rios Canabrava e Barreiras, situadas ao norte da área; ii) bacia do rio Pacuí: sub-bacias hidrográficas dos rios São Lourenço e Riachão; iii) bacia do rio Jequitaiá: sub-bacia do rio São Lamberto; e iv) bacia do rio Vieira: onde está a cidade de Montes Claros. As estações fluviométricas nas calhas dos rios Riachão (nº 42081400, pertencente ao Instituto Mineiro de Gestão das Águas - IGAM), São Lamberto (nº 42099000, da ANA - Claro dos Poções) e rio Pacuí (nº 42200000 do IGAM - Ibiá) determinaram, juntamente com os divisores de água, o delineamento da porção oeste da área (Figura 1).

Geologicamente, a região está no domínio da Bacia Sedimentar do São Francisco, próximo à borda leste do Cráton São Francisco, uma unidade geotectônica estruturada no Ciclo Brasileiro (ALKMIM; MARTINS-NETO, 2001). Na região, ocorrem os grupos Areado e Bambuí (descritos a seguir); este último composto pelas formações Serra de Santa Helena, Lagoa do Jacaré e Serra da Saudade (Figura 1).

Figura 1 - Área de estudo, na mesorregião norte de MG, tendo Montes Claros como principal município. Informações sobre a geologia da região (coluna litoestratigráfica), bem como indicação de feições cársticas, como dolinas e sumidouros, redes de drenagem



Fonte: Modificado de (CPRM, 2019; CECAV, 2021)

A Formação Serra de Santa Helena (SCHÖLL, 1976) é subdividida em três subunidades: base (filitos, ardósias intercaladas com margas e calcários); intermediária (siltitos subordinados e filitos); e topo (quartzitos finos intercalados com filitos e siltitos). A Formação Lagoa do Jacaré (DARDENNE, 1978) é formada por calcarenitos oolíticos ricos em intraclastos, lentes de calcilitos e calcissiltitos, e finas camadas de pelitos. A Formação Serra da Saudade é constituída, majoritariamente, por siltitos argilosos cinza a cinza-esverdeado, com raras lentes de calcário cinza claro (ALVARENGA, 1978).

O Grupo Areado, considerado indiviso na região, ocorre principalmente a oeste e sudeste da área (Figura 1). É formado por arenitos de granulometria fina a média. Restritamente, há arenitos brancos argilosos intercalados com matacões silicificados (KUCHENBECKER *et al.*, 2014). Normalmente, é capeado por sedimentos cenozoicos.

Os depósitos detrítico-lateríticos estão sobre superfícies aplai-

nadas, na forma de aluviões e coluviões em diferentes graus de laterização. Eles recobrem até 15 km de largura ao longo do rio Verde Grande e principais tributários. Podem atingir até 40 m de espessura (KUCHENBECKER *et al.*, 2014).

Geomorfologicamente, são comuns feições cársticas, como cavernas e vales cegos, com ressurgência, bem como dolinas e sumidouros associados a rochas carbonáticas do Grupo Bambuí. Nas regiões central e sudeste, predominam morros e serras com cristas alinhadas, além de vales encaixados sobre rochas sedimentares do Grupo Areado e/ou coberturas detrítico-lateríticas que configuram platôs e chapadas (LEITE; PEREIRA, 2008). A região é caracterizada pelo clima quente semiúmido (IBGE, 2002). A média anual de precipitação varia de 800 a 1200 mm, distribuída de maneira irregular espacialmente e ao longo do ano. Cerca de 90% das chuvas são concentradas no verão (outubro a abril), sendo o período de dezembro a fevereiro o mais úmido. Durante o inverno, há redução significativa nos índices pluviométricos (maio a setembro), sendo junho a agosto os

meses de maior estiagem. Devido às características ambientais e socioeconômicas, uma parcela da área apresenta semelhanças ao semiárido nordestino, com considerável aridez, déficit hídrico e irregularidades de chuvas, além de solos pobres em matéria orgânica e elevadas temperaturas locais (SUDENE, 1989).

A rede hidrográfica compõe a bacia do rio São Francisco e contempla duas Unidades de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos (UPGRH): SF10 (Rio Verde Grande) e SF06 (Rios Jequi-taí e Pacuí). Os principais mananciais superficiais na área de e a rochas pelíticas das formações Serra da Saudade e Serra de Santa Helena, do Grupo Bambuí; e 3) cárstico-fissural (de maior abrangência na área de estudo), associado à fratura e dissolução de rochas carbonáticas, principalmente da Formação Lagoa do Jacaré. A recarga ocorre pela infiltração direta (autogênica, em feições cársticas), e indiretas (alógênica, via aquíferos superiores granulares). Na região, o aquífero cárstico tem uma grande importância no abastecimento público, pois é o de maior produção, com T entre 233-7700 m²/d, Q/s médio de 12 m³/h/m e vazões superiores a 100 m³/h (MOURÃO et al., 2001).

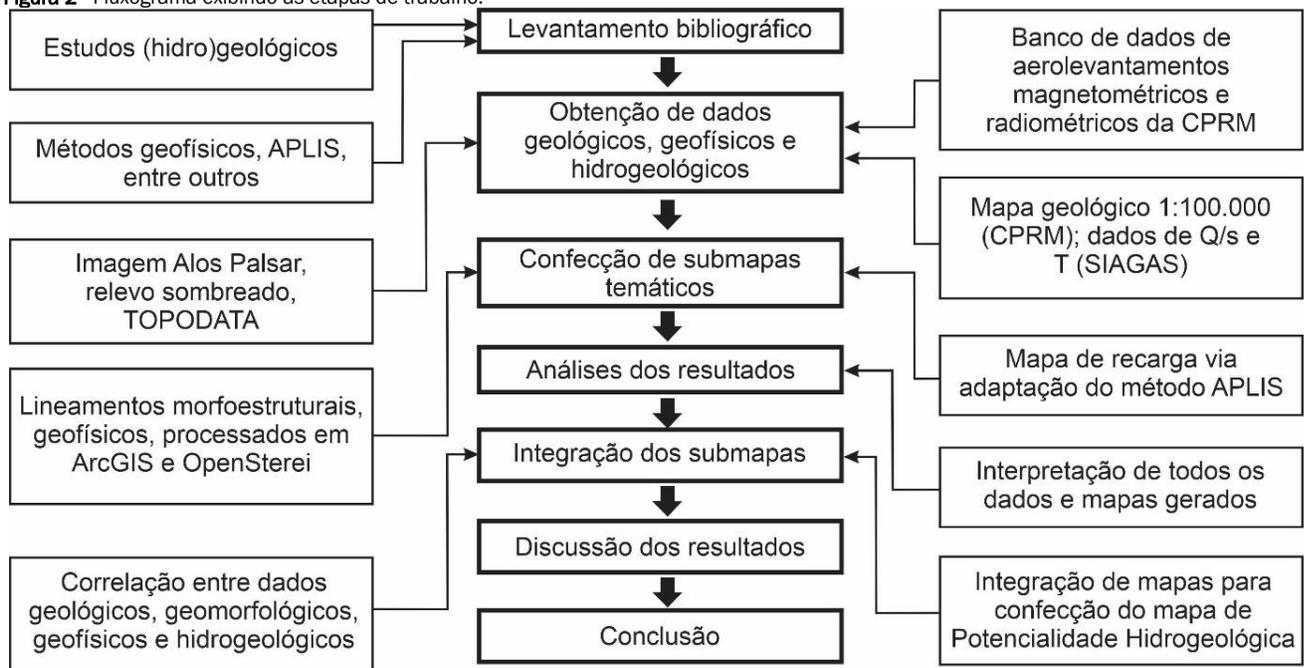
estudo inseridos na UPGRH SF10 são os rios Verde Grande e Vieira; enquanto na UPGRH SF06 destacam-se os rios Pacuí, Riachão e São Lamberto (IGAM, 2012).

Três domínios hidrogeológicos se destacam (CPRM/IGAM, 2019): 1) granular, associado a rochas sedimentares areníticas do Grupo Areado e a coberturas detrítico-lateríticas e aluviais. Possui taxa de infiltração entre 9-15%, transmissividade (T) média de 58 m²/d e capacidade específica (Q/s) média de 2 m³/h/m; 2) fissural, relacionado a falhas/fraturas subverticais. As formações Serra de Santa Helena e Serra da Saudade, pelas características gerais metapelíticas, devido aos baixos valores de permeabilidade, são consideradas como aquíferos (MOURÃO et al., 2001).

3. MATERIAL E MÉTODOS

Para alcançar os objetivos, que é aplicar e adaptar o método de mapeamento do potencial hidrogeológico do aquífero cárstico, o artigo foi dividido em diferentes etapas, descritas a seguir, e indicadas na Figura 2.

Figura 2 - Fluxograma exibindo as etapas de trabalho.



3.1. Levantamento de Dados

A topografia foi obtida por meio do Modelo Digital de Elevação (MDE), gerado pelo radar Alos Palsar, com resolução espacial 12,5 x 12,5 m, disponível em <https://search.asf.alaska.edu/#/>, sendo gerado o mapa de declividade de terreno.

As imagens geofísicas correspondem aos arquivos de Amplitude

do Sinal Analítico (ASA), auxiliando na identificação de lineamentos em subsuperfície, adquiridos no banco de dados da CODEMIG (<http://www.codemig.com.br/>). Sobre a geologia, foram utilizados cinco mapas técnicos e arquivos *shapefiles*, escala 1:100.000, todos obtidos na plataforma GeoBank, da CPRM (<https://geosgb.cprm.gov.br/>).

Dados sobre as estruturas cársticas (entradas de cavernas, do

linas e sumidouros) foram obtidos no Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas (<https://www.icmbio.gov.br/cecav/>). Contatos de formações geológicas em profundidade, espessuras das camadas e parâmetros hidrodinâmicos foram obtidos no SIAGAS/CPRM (<http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/>). Foram analisados 1.419 poços cadastrados na região, dos quais 207 com perfil litoconstrutivo, sendo 22 deles com dados de T e 694 com dados de Q/s.

3.2. Sensoriamento Remoto

Para este trabalho, todos os mapas temáticos (lineamentos, feições cársticas e recarga), descritos a seguir, e o mapa de potencial hidrogeológico foram elaborados no Datum Sirgas 2000, UTM 23S, escala 1:100.000.

3.2.1. Lineamentos

Os lineamentos morfoestruturais foram traçados manualmente, com base no MDE e *shapefile* de hidrografia sobrepostos à imagem de relevo sombreada, com uso da ferramenta *Hillshade*, do *ArcGis*. Buscou-se feições geológicas em superfície, como drenagens retilíneas, topografia, talwegues, vales e cristas alinhadas.

Os lineamentos radiométricos foram definidos pelo mapa temático de radioisótopo tório (Th), pois as anomalias desse elemento são mais nítidas para reconhecer estruturas lineares sub-superficiais, comparativamente ao urânio e potássio (KEAREY *et al.*, 2002). De forma auxiliar, foram utilizados outros mapas temáticos: canal de potássio (K), canal de urânio (U) e ternário RGB (KEAREY *et al.*, 2002).

Para lineamentos magnetométricos, utilizou-se o mapa de Amplitude do Sinal Analítico (ASA), em função do comportamento monopolar capaz de exibir as anomalias de maneira nítida e precisa. Ademais, foram manipulados outros mapas auxiliares, sendo eles: campo magnético anômalo (CMA), primeira derivada horizontal (DX1 e DY1) e primeira derivada vertical (DZ1) (KEAREY *et al.*, 2002). Os lineamentos geofísicos foram também traçados manualmente, sobre as bordas ou centros das anomalias.

Os lineamentos foram agrupados e resultaram em três mapas de densidade de lineamentos. Adotou-se a ferramenta *Kernel Density*, do *ArcGIS*, com a configuração de que cada estrutura linear tivesse raio de influência de 3.000 m (valor que melhor se adequou à escala regional) e valor igual a 1. O método aplicado foi o "Planar", considerando a morfologia de lineamentos e em relação ao tamanho da área e escala de trabalho. Em cada célula, de dimensão 100 x 100 m, a densidade de lineamentos foi calculada adicionando-se os valores de todas as superfícies que se sobrepõem, derivando na unidade km/km² de lineamentos.

Em seguida, foram considerados os azimutes das linhas usando a ferramenta *AzimuthFinder*, conforme Queiroz *et al.* (2014). As morfoestruturas e lineamentos geofísicos foram representados em diagramas de roseta, com o *software OpenStereo*, a partir da atribuição de pesos (método de comprimento), conferindo maior representatividade às estruturas de maiores extensões.

3.2.2. Feições cársticas

Dados das estruturas cársticas, como entradas de cavernas, dolinas e sumidouros foram compilados do Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas (CECAV, 2021). Como complemento, outras estruturas foram reconhecidas pelo programa Google Earth, escala 1:100.000, a partir do método de ambientes cársticos de Pardo-Igúzquiza (2013). Similarmente ao adotado nos mapas de densidade de lineamentos, usou-se o método de densidade Kernel, considerando raio de influência de 20.000 m, para representar pontos em escala regional. Como o arquivo de origem é baseado em pontos, o resultado é em unidade pontos/km². Também foram retirados os azimutes dos principais *trends* das feições cársticas, a partir da ferramenta *AzimuthFinder*.

3.2.3. Recarga

O método APLIS (ANDREO *et al.*, 2007), desenvolvido para aquíferos cársticos, foi utilizado para estimar as zonas de recarga a partir das seguintes variáveis: altitude (A), declividade (P), litologia (L), existência ou não de zonas de infiltração preferencial (I) e tipo de solo (S). Ele se baseia na classificação de categorias ou intervalos que alcançam valores de 1 (mínima influência na recarga) a 10 (máxima influência). O mapa de fator de correção (Fh) também foi usado para diferenciar aquíferos de aquíferos, em que regiões onde há calcário, arenito (Grupo Areado), ou sedimento inconsolidado, (aquíferos) atribuiu-se o peso 1, enquanto áreas nas formações Serra de Santa Helena e Serra da Saudade (aquíferos), receberam o peso 0,1. A partir dos mapas temáticos (Tabela 1), foi utilizada a ferramenta *Raster Calculator*, do *ArcGIS* 10.7 para aplicar a equação: Recarga (% de precipitação) = $[A + P + 3L + 2I + S] / 0,9 \times Fh$.

O APLIS original foi desenvolvido para condições de clima mediterrâneo, sendo utilizado em estudos na Europa Meridional em regiões com precipitações médias anuais entre 500 e 1300 mm. Uma adaptação foi realizada no parâmetro "tipo de solo" (S), pois o mapa disponível é de escala regional, prejudicando as análises. Assim, optou-se por substituí-lo pelo "mapa hidrológico de solos" (CPRM/IGAM 2019), por ser mais detalhado. Os resultados foram então classificados em cinco níveis de taxa de recarga: muito baixa (0-5%), baixa (6-25%), moderada (26-35%), alta (36-55%) e muito alta (56-75%), conforme Andreo *et al.* (2007) e adaptado por Magnabosco *et al.* (2020).

Tabela 1 - Distribuição dos pesos para elaboração do mapa de recarga

Altitude (m) - A		Declividade do terreno (%) - P		Litologia - L		Feição cárstica e lineamento - I		Solo - S		Fator de correção - Fh	
Intervalo	Peso	Intervalo	Peso	Tipo	Peso	Feição	Peso	Tipo	Peso		Peso
< 550	1	< 3	10	Calcário	8	Cavernas	10	Classe A	9	Calcário	1
550 - 600	2	3 - 8	9	Metapelito	1	Sumidouros	10	Classe B	7	Metapelito	0,1
600 - 650	3	8 - 13	8	Metassilito	1	Lagoas	5	Classe C	5	Sedimento inconsolidado	1
650 - 700	4	13 - 20	5	Sedimento inconsolidado	4	Dolinas	10	Classe D	2	Arenito	1
700 - 750	5	20 - 45	3			Lineamentos	5	Área urbana	5		
750 - 800	6	> 45	1			Feições identificadas Google Earth (Pardo-Igúzquiza 2013)		5			
800 - 850	7										
850 - 900	8										
900 - 950	9										
> 950	10										

Fonte: Adaptado de Andreo et al. (2007).

3.3. Potencialidade Hidrogeológica

Para o mapa de potencialidade hidrogeológica (PH), quatro premissas foram definidas: 1) lineamentos (morfoestruturais e identificados indiretamente por métodos geofísicos) ligados ao contexto geológico-estrutural da bacia, representando estruturas superficiais e/ou em maiores profundidades; 2) fluxo de água subterrânea, na maior parte, em condutos cársticos gerados pela interconexão de estruturas subverticais e planos de acamamento sub-horizontais; 3) dolinas, sumidouros e cavernas são indicadores de carstificação, e alinhamentos destes podem indicar influência de estruturas geológicas; e 4) mapa geológico que retrata unidades e litologias aflorantes, mas não necessariamente a unidade geológica abaixo captada por poços. Portanto, os parâmetros adotados que se encaixam nas premissas acima foram (Tabela 1): i) densidade e alinhamento de lineamentos (morfoestruturais e geofísicos); ii) densidade de feições cársticas; iii) sistemas aquíferos; iv) declividade; e v) recarga.

Foi atribuído um fator de calibração para cada parâmetro, com base em 93 valores de capacidade específica (Q/s) de poços e 16 de transmissividade (T) do aquífero cárstico. Tanto Q/s como T foram estimados e interpretados a partir de testes de bombeamentos durante a perfuração de poços; essas informações são de bancos de dados do SIAGAS/CPRM e SIAM/IGAM. A interpolação por IDW (*Inverse Distance Weighted*) de mapas temáticos indicou os potenciais de encontrar água subterrânea e de poços produtivos, onde regiões de maior PH devem coincidir com as áreas de maiores T e Q/s.

O mapa de PH foi dividido em 4 classes, conforme Magnabosco et al. (2020), variando de muito baixo a muito alto. Em comple-

mento, para calibração e validação do modelo, um gráfico de dispersão e uma matriz foram elaborados relacionando T e Q/s com a classificação de PH.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Lineamentos

Foram traçados 2.734 lineamentos morfoestruturais correspondentes, majoritariamente, a feições retilíneas de drenagens, cristas e vales alinhados que, indiretamente, indicam descontinuidades superficiais do aquífero. Conforme o diagrama de roseta, a maioria dos lineamentos possui direção geral NE-SW (Figura 3A) e maior densidade na região nordeste (Figura 3B).

Os 475 lineamentos magnetométricos indicam zonas com maior probabilidade de fraturas profundas em duas direções principais: NE-SW e ENE-WSW; e na direção secundária NNE-SSW (Figura 3C). A densidade de lineamentos magnetométricos ocorre de forma dispersa pela área, especialmente na região centro-sul e sudoeste (Figura 3D).

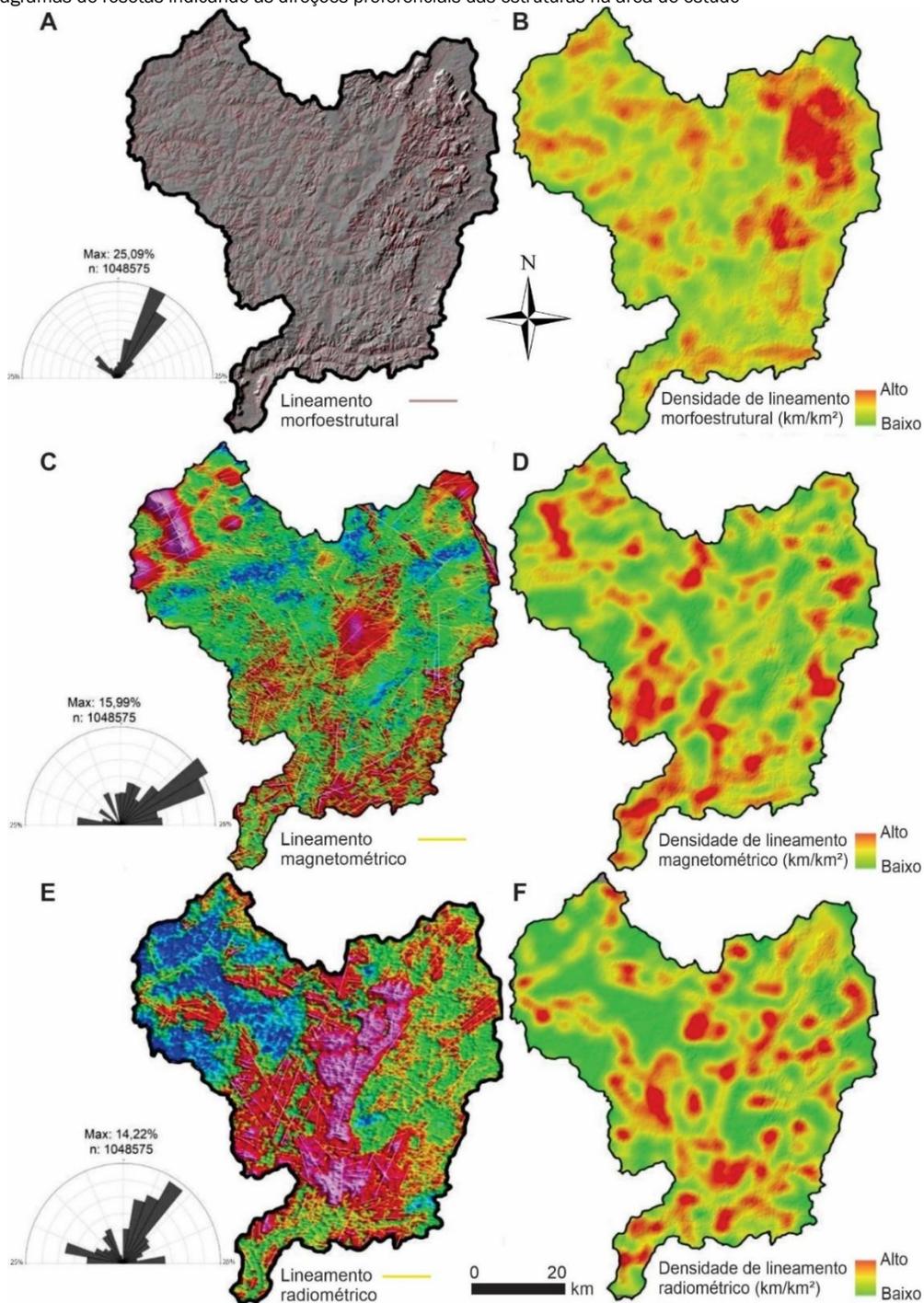
Os 224 lineamentos radiométricos revelam estruturas subsuperficiais, como descontinuidades geológicas pouco profundas, aflorantes ou não, que podem facilitar a recarga e circulação de água no aquífero. As direções preferenciais são NE-SW e NNE-SSW, e secundárias, WNW-ESE e E-W (Figura 3E). A densidade de lineamentos radiométricos (Figura 3F) indica concentrações de estruturas dispersas pela área, com uma certa semelhança com o verificado no magnetométrico.

As direções gerais NE-SW e NNE-SSW, nos três diagramas de roseta, podem correlacionar com famílias de fraturas das rochas calcárias da Formação Lagoa do Jacaré. A direção N20-

60E, mais expressiva nos lineamentos magnetométricos, corresponde a fraturas em outras rochas do grupo ou a condutos de menor representatividade (RIBEIRO *et al.*, 2016). Na Figura 3, as regiões em vermelho (maior densidade de lineamentos) indicam uma boa correlação com as principais direções de

estruturas e características geológicas regionais vistas em estudos anteriores da região (ALKMIM; MARTINS-NETO, 2001; MOURÃO *et al.*, 2001; REIS *et al.*, 2017), onde os lineamentos correspondem às características do contexto geológico regional.

Figura 3 - Mapas de lineamentos Morfoestruturais (A), Magnetométricos (C) e Radiométricos (E), e respectivas densidades de lineamentos (B, D, F) com diagramas de rosetas indicando as direções preferenciais das estruturas na área de estudo



4.2. Declividades

A partir do mapa de declividade (Figura 4), foi feita a análise com base na relação inversa entre inclinação e acúmulo de água no solo, isto é, quanto mais íngreme um terreno, mais rápido o escoamento da água, superficial ou subterrâneo. O oposto ocorre em áreas planas, onde há a tendência de desenvolvimento de camadas espessas de solos tropicais, em função de processos de intemperismo e lixiviação (BUI *et al.*, 1989). Nesses lugares, os sedimentos pouco ou nada consolidados tendem a apresentar condições de elevada permoporosidade, resultando em maiores taxas de infiltração da água, podendo recarregar o aquífero (MOURÃO *et al.*, 2001).

4.3. Feições Cársticas

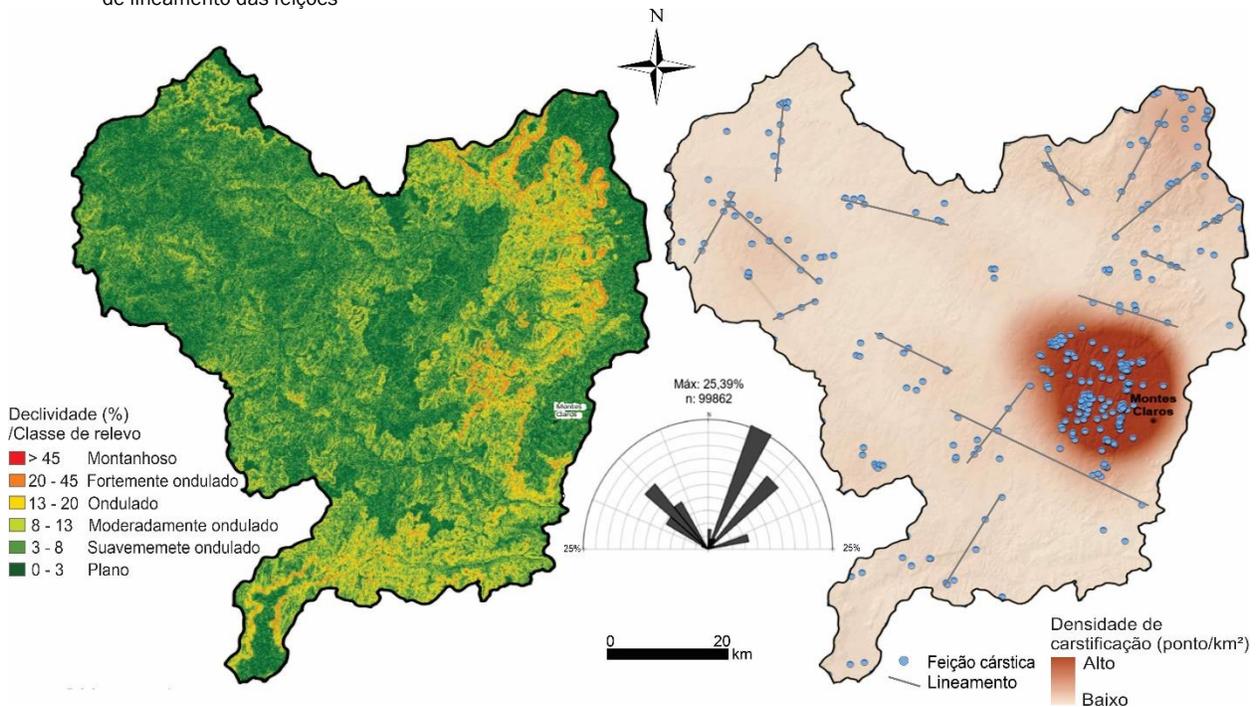
Foram identificadas 390 estruturas cársticas que correspondem a dolinas, lagoas, cavernas e sumidouros. Assim, foi elaborado o mapa de densidade de feições cársticas (Figura 5), onde

o maior grupo de cavidades naturais está nas porções noroeste e oeste de Montes Claros, num raio de até 20 km dos limites da cidade.

A aglomeração dessas estruturas pode indicar zonas carstificadas que permitem a conexão do aquífero cárstico com a superfície. Associando esses dados com a estrutural (Figura 3) e feições cársticas e alinhamentos dessas feições (Figura 4), nota-se que as feições seguem a direção dos lineamentos morfoestruturais, sugerindo que as áreas carstificadas são as regiões do aquífero com maior condutividade hidráulica.

As estruturas na área estão dispostas seguindo a tendência regional de direções principal NE-SW e secundária NW-SE. Isso corrobora a interpretação de CPRM/IGAM (2019), que identificou padrão de alinhamento de feições cársticas (dolinas/sumidouros) ao longo de fraturas que ocorrem nas direções N40-50W e N30-40E.

Figura 4 - Mapa de declividades da região (esquerda), indicando que as maiores declividades estão na parte centro-nordeste; mapa de feições cársticas (direita) com as principais zonas com dolinas, lagoas, cavernas e sumidouros, e diagrama de roseta com as direções principais de lineamento das feições



4.4. Recarga

As zonas de maiores recargas, embora restritas, referem-se a recargas autogênicas, ou seja, cujas ocorrências são verificadas durante os períodos de chuva, quando a água infiltra em rochas calcárias fraturadas ou áreas com elevado grau de carstificação. As regiões onde há calcários pouco fraturados e/ou carstificados, a taxa de recarga varia de 26-55% (média a alta) (Figura 5).

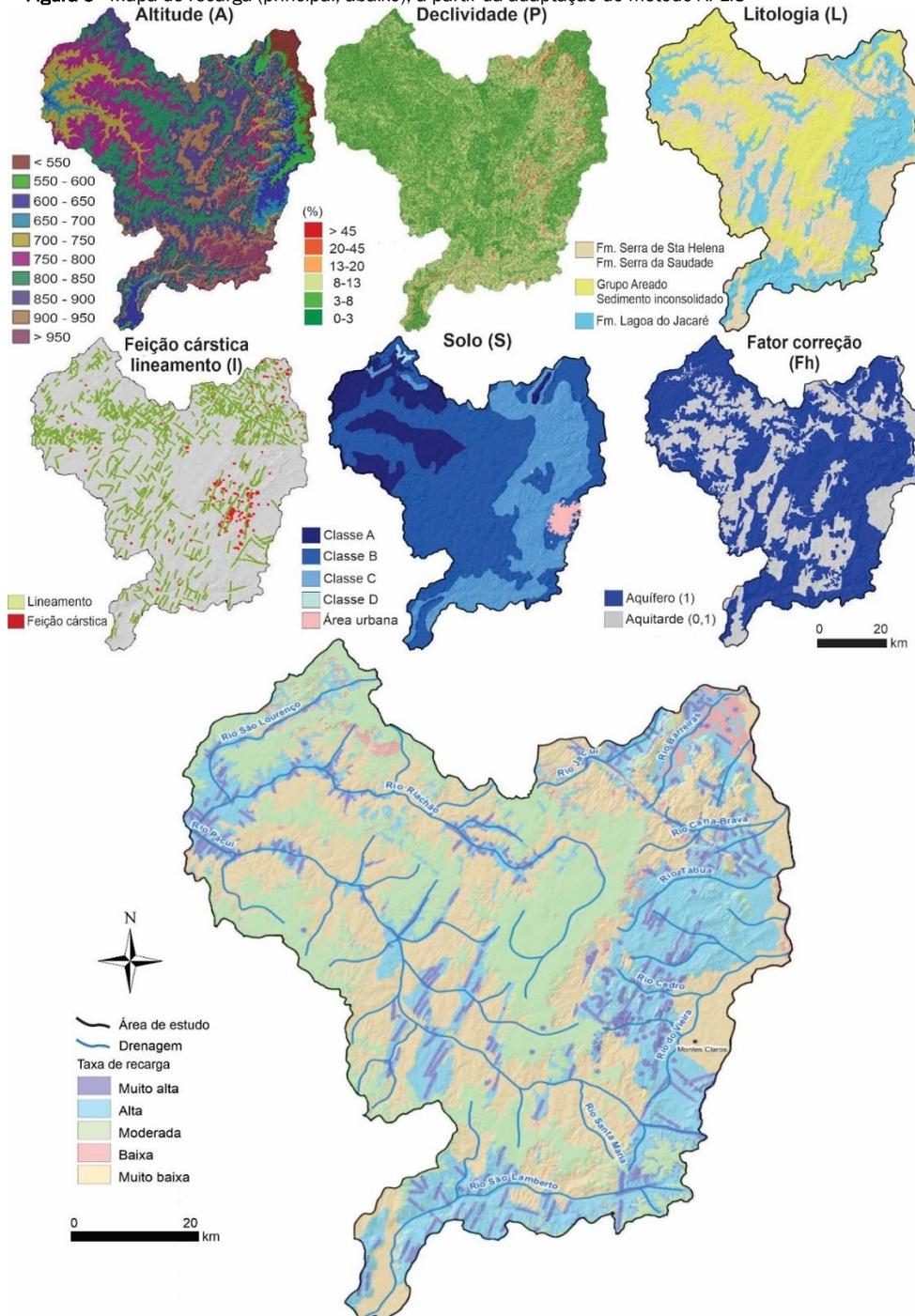
A recarga alogênica depende da granulometria do manto de intemperismo e do grau de fraturamento das rochas. Em declividades médias e em baixas altitudes a condição é de descarga, podendo contribuir pouco para a recarga dos aquíferos. Porém, caso essas regiões estejam associadas a espessas camadas de sedimentos inconsolidados, pode ocorrer drenança vertical descendente e garantir a recarga da unidade aquífera local. Regiões de maior declividade, alta altitude e baixa densidade de

lineamentos (região central da bacia) podem contribuir significativamente para a recarga do aquífero cárstico durante períodos de excedente hídrico, entre outubro a abril (IBGE, 2002), via percolação intergranular ou recarga contínua através de descontinuidades.

Os aquíferos Serra de Santa Helena e Serra da Saudade, em-

bora armazenem água, apresentam permeabilidade muito baixa. Assim, a contribuição para o aquífero cárstico só é possível por meio de fraturas abertas. Para a área urbana de Montes Claros, foi adotada uma condição quase nula de recarga (apesar da parcela potencial de perda de água pela rede de distribuição), pois existe o fator impermeabilização do solo ou supressão de dolinas e sumidouros, podendo afetar as zonas de recarga.

Figura 5 - Mapa de recarga (principal, abaixo), a partir da adaptação do método APLIS



Fonte: (ANDREO *et al.*, 2007) e mapas temáticos (secundários, superior).

4.4. Potencialidade Hidrogeológica

A potencialidade hidrogeológica (PH) é resultado da interação dos seguintes critérios: 1) densidade de lineamentos morfoestruturais e geofísicos; 2) densidade de feições cársticas; 3) declividade; 4) características das unidades aquíferas; e 5) taxa de recarga (Figura 6). Vale destacar a pouca informação existente na região central, centro-oeste, sul e nordeste da área. Em contraste, existe uma grande densidade de informações na região próxima a Montes Claros.

Em relação aos lineamentos, quanto maior a densidade maior a tendência de interconectividade das estruturas e, portanto, maior o desenvolvimento de carstificação e percolação de água. Os lineamentos morfoestruturais têm as melhores respostas à percolação de água, comparados aos lineamentos magnetométricos e radiométricos, pois as estruturas superficiais são correlacionadas a fraturas mais abertas. Em maiores profundidades, as estruturas são mais fechadas, em função de tensões tectônicas, peso de camadas sobrejacentes, ou preenchimento por mineralizações via processos hidrotermais (KEAREY *et al.*, 2002).

As feições cársticas, quando alinhadas, podem indicar direção de fluxo subterrâneo local. Com isso, a representação de zonas carstificadas, que envolvem condutos, cavidades, entradas d'água e sumidouros, apontam as áreas de maior condutividade hidráulica que podem transmitir grandes volumes de água (GALVÃO *et al.*, 2015).

As regiões de baixa declividade, geralmente próximas a vales e redes de drenagens, caso apresentem camadas espessas de coberturas sedimentares (confirmadas pelas descrições litoconstrutivas de perfis de poços), podem abrigar elevado PH. Os poços nessas regiões têm melhores condições de produção e armazenamento de água, além de ser provável que ocorra manutenção das taxas de fluxo superficial por longos períodos.

A recarga exerce influência sobre as condições de percolação de água no aquífero, pois se associa a parâmetros como

litologia, grau de fraturamento da rocha, feições cársticas, altitude, declividade e solo. Por isso, altas recargas contribuem com o maior desenvolvimento de carstificação e, conseqüentemente, maior percolação de água.

A interação desses critérios indica que, quanto mais parâmetros com maior peso atribuído a eles em uma área, mais favorável a região será para a exploração hídrica. Assim, as porções rosas (Figura 6) correspondem a maiores PH, pois estão em regiões com elevada densidade de feições cársticas e lineamentos, baixa declividade, alta recarga e em domínio de tipos aquíferos produtivos, ou seja, quatro fatores de peso 4.

4.5. Validação

A maioria dos poços apresenta baixo valor de capacidade específica (Q/s) enquadrando-se na Classe 5 (Tabela 2), segundo classificação de Diniz *et al.* (2014) (Figura 7). A ocorrência de poços com baixos Q/s (Classe 4 e 5) ao longo de toda a área, inclusive em zonas potencialmente favoráveis, indica quão anisotrópico e heterogêneo é o aquífero cárstico. Assim, é possível que um poço seco esteja próximo a um poço produtivo simplesmente por não ter interceptado um conduto com água. Dos 10 poços mais produtivos (Classes 1 e 2), 40% deles, com Q/s > 2,5 m³/h/m, estão em áreas de alta produtividade (rosas), e 45% em zonas altas e moderadas (vermelha e laranja).

Os dados de produtividade dos poços (Q/s) e do aquífero (T) foram classificados segundo o gráfico de dispersão e matriz (Figura 7). Há uma tendência de crescimento de Q/s e T em áreas com elevada potencialidade hidrogeológica, indicando que estes parâmetros são diretamente proporcionais, validando o método aplicado. Em função da diferença entre o menor e maior valor de Q/s, optou-se por apresentá-los em escala logarítmica, a fim de facilitar a visualização, enquanto valores de T estão em escala linear, devido a pouca disparidade entre os dados (Figura 7). Em relação ao eixo Q/s, foram destacados os limites das classes definidas por Diniz *et al.* (2014).

Figura 6 - Potencialidade hidrogeológica para os aquíferos da bacia do rio Vieira, associada aos valores de capacidade específica e transmissividade

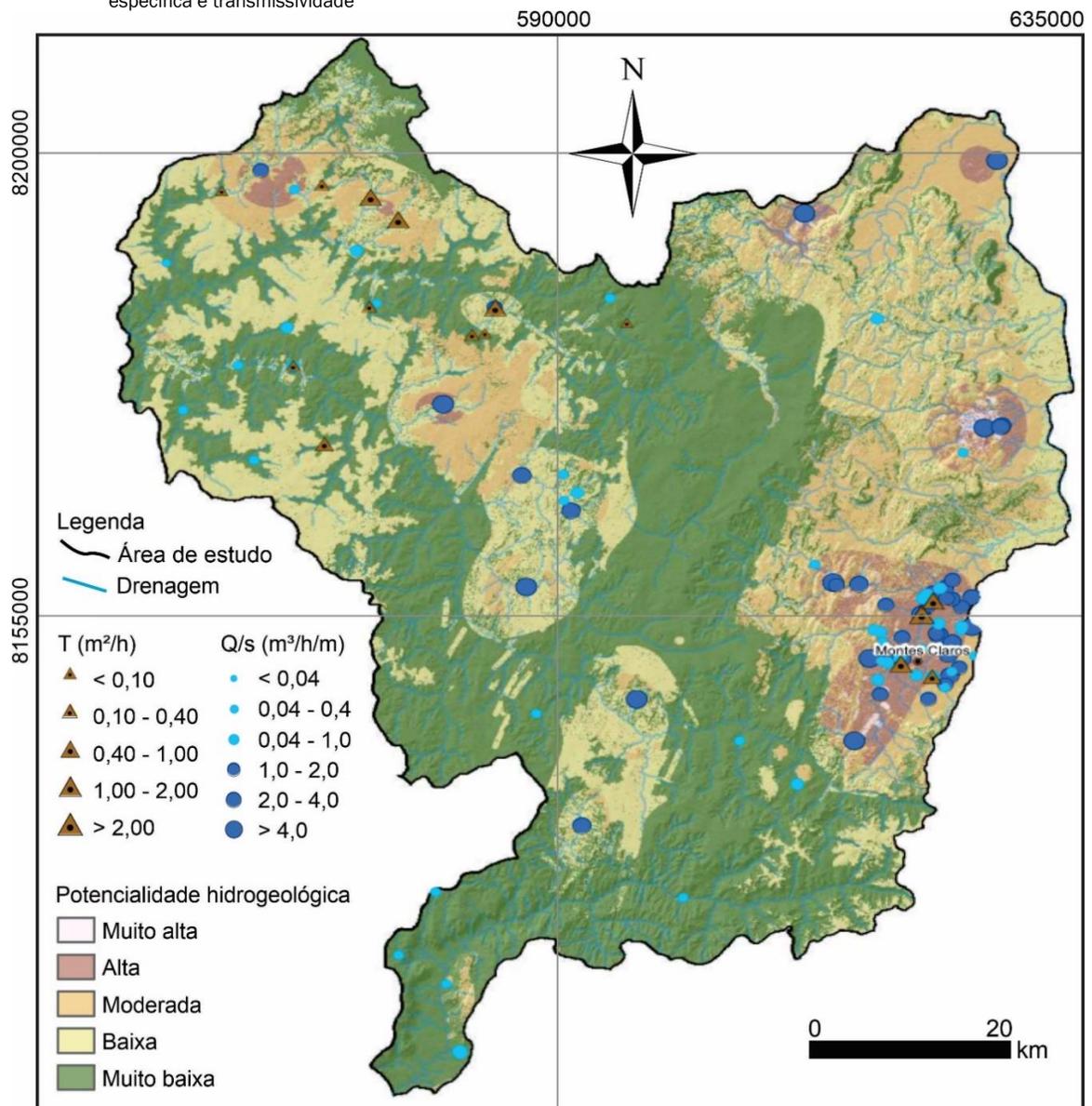


Figura 7 - Gráfico de dispersão e matriz dos valores de capacidade específica e transmissividade pela potencialidade hidrogeológica

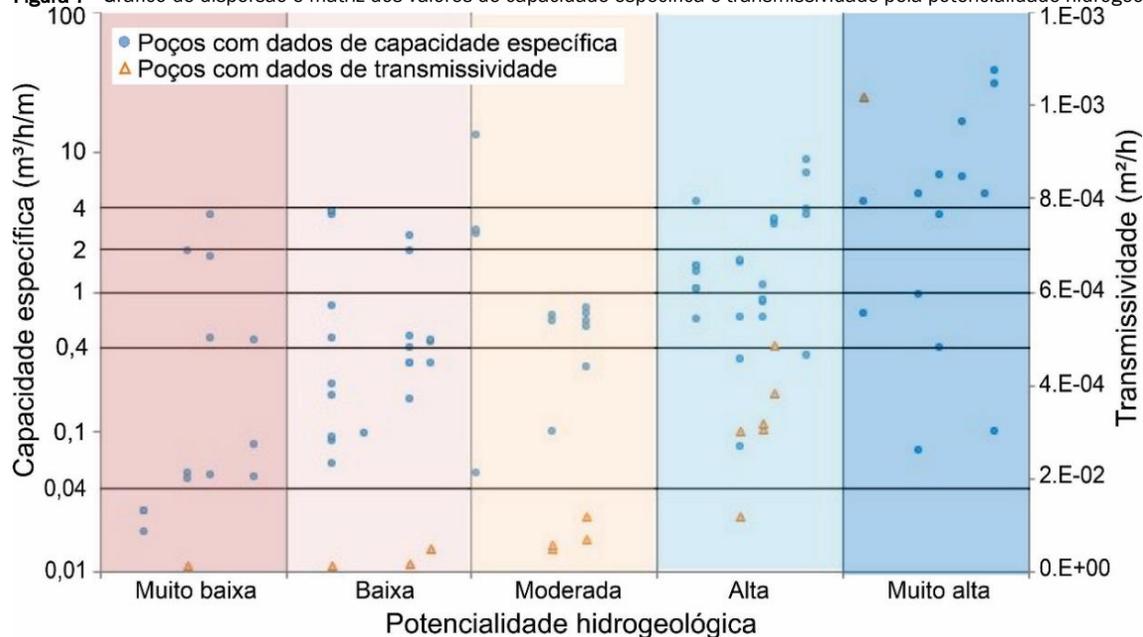


Tabela 2 - Resultado estatístico de capacidade específica e transmissividade, segundo classificação de Diniz et al. (2014).

Capacidade específica (m³/h/m)					
Classe	Núm. De Poços	Máximo	Mínimo	Média	Mediana
1	14	6000	4.40	476.77	7.92
2	13	3.91	2.48	3.32	3.52
3	17	1.97	1.04	1.42	1.35
4	22	0.95	0.40	0.64	0.65
5	24	0.40	0.05	0.16	0.10
6	3	0.03	0.02	0.02	0.03

Transmissividade (m²/s)					
Classe	Núm. De Poços	Máximo	Mínimo	Média	Mediana
1	-	-	-	-	-
2	-	5.6E-03	1.0E-03	3.3E-03	3.3E-03
3	2	4.8E-04	1.2E-04	2.9E-04	3.1E-04
4	7	6.8E-05	1.3E-05	3.8E-05	4.7E-05
5	7	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-

5. CONCLUSÕES

Há uma correlação da produtividade dos poços na área com quatro fatores, considerados os mais importantes na investigação de potencialidade hidrogeológica cárstica: 1) densidade de lineamentos (morfoestruturais e geofísicos) e feições cársticas, principalmente as direções NE-SW e NNE-SSW; 2) condições de produtividade representadas pelos tipos aquíferos; 3) zonas com menores declividades e próximas a drenagens; e 4) taxa de recarga. As zonas de maiores potenciais hídricos indicam que, quanto maior a associação dos quatro fatores com maiores valores em uma mesma região, maior a probabilidade de água subterrânea e, conseqüentemente, mais produtivos serão os poços.

A significativa distribuição de poços pouco produtivos ao longo de várias porções da bacia indica a anisotropia e heterogeneidade do aquífero cárstico. Embora o mapa de potencialidade hidrogeológica, em escala de bacia, indique regiões mais favoráveis para exploração de água a partir da calibração e validação de dados de Q/s e T, é necessário utilizar outras técnicas investigativas, principalmente em escala local (dezenas e centenas de metros), como mapa de superfície potenciométrica detalhado, mapeamento geológico-estrutural e de feições cársticas, e caminhamento geofísico terrestre (eletrorresistividade). Outro fator é a distribuição irregular dos dados na área de estudo. É sabido que distribuições irregulares podem resultar em viés de interpretação; porém, como o estudo tem como proposta a estimativa regional da potencialidade hidrogeológica com base em apenas dados públicos, e em uma região com dados escassos, os autores estão cientes das possíveis variabilidades de escala.

Os resultados não dependem apenas do potencial do aquífero nos quais os poços são instalados, mas também da qualidade construtiva e da eficiência desses poços. Assim, este estudo, e outros semelhantes, indicam que é possível gerar bons resultados a partir de dados disponíveis na literatura, órgãos públicos ou de livre acesso na internet. Ressalta-se a importância da organização e compartilhamento de bancos de dados coesos para que sejam incentivadas pesquisas desse tipo. Ademais, é preciso assegurar que a perfuração de poços seja acompanhada de processos de regularização e obtenção de outorga de uso, de acordo com a legislação vigente, o que, além de contribuir para a eficiência da gestão, permite aperfeiçoar bancos de dados com informações construtivas e hidráulicas de poços, bem como (hidro)geológicas.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos ao Serviço Geológico do Brasil (CPRM), Superintendência Regional de Belo Horizonte, à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) e ao Departamento de Geologia da Universidade Federal de Ouro Preto.

REFERÊNCIAS

AFONSO, P. C. S. Os conflitos do/no hidroterritório norte-mineiro. **Sociedade e Território**, v. 27, p. 229-250, 2015.

ANDREO, B.; VÍAS, J. M.; MEJÍAS, M.; BALLESTEROS, B. J.; MARÍN, A. I. Estimación de la recarga mediante el método APLIS en el acuífero jurásico de El Maestrazgo (Castellón, NE España). **Los acuíferos costeros: retos y soluciones. Publicaciones del**

Instituto Geológico y Minero de España. Serie Hidrogeología y aguas subterráneas, n. 23, p. 893-902, 2007.

ALKMIM, F. F.; MARTINS-NETO, M. A. A bacia intracratônica do São Francisco: Arcabouço estrutural e cenários evolutivos. In: Pinto, C.P. & Martins-Neto, M.A. **Bacia do São Francisco: Geologia e Recursos Naturais – SBG/MG**, Belo Horizonte, v.1, p. 9-30, 2001.

ALVARENGA, C. J. S. **Geologia e prospecção geoquímica dos grupos Bambuí e Paranoá na Serra de São Domingos, MG**. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Brasília, Brasília, 1978.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. **Relatório do Diagnóstico da Bacia Hidrográfica do Rio Verde Grande**. ECOPLAN Engenharia, Brasília, p. 11-33, 2009.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. **Atlas Brasil: abastecimento público**. 2010. Disponível em: <http://portal1.snirh.gov.br/arquivos/atlasrh2013/4-III-TEXTO.pdf>. Acesso em: 11 nov. 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Hidrogeologia dos ambientes cársticos da Bacia do São Francisco para a gestão de recursos hídricos**. Relatório Final – Volume IV – Gestão Integrada de Recursos Hídricos / Tomo 1 – Balanço Hídrico / Agência Nacional de Águas; Elaboração e Execução: Consórcio TPF - Techne. - Brasília: ANA, 2018. 204p.

AYER, J. E. B.; GAROFALO, D. F. T.; PEREIRA, S. Y. Uso de geotecnologias na avaliação da favorabilidade hidrogeológica em aquíferos fraturados. **Águas Subterráneas**, v. 31, n. 3, p. 154-167, 2017. <https://doi.org/10.14295/ras.v31i3.28773>

BORGES, L. **Qualidade da água do Rio Vieira sob a influência da área urbana de Montes Claros MG**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Uberlândia., Uberlândia, 2007. 104 p.

BRANDÃO, S. S. S.; SILVA, W. T. Configuração do espaço urbano da cidade de Montes Claros-MG após 1970: novas centralidades. **Revista Humanidades**, v. 5, n. 2. 12 p, 2016.

BUI, E. N.; MERMUR, A. R.; SANTOS, M.C.D. Microscopic and Ultramicroscopic Porosity of an Oxisol as Determined by Image Analysis and Water Retention. **Soil Science Society of America Journal**, v. 53, n. 3, p. 661-665, 1989. <https://doi.org/10.2136/sssaj1989.03615995005300030002x>

CENTRO NACIONAL DE PESQUISA E CONSERVAÇÃO DE CAVERNAS – CECAV. **Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas (CANIE)**. 2021. Disponível em: <https://www.icmbio.gov.br/cecav/canie.html>. Acesso em: 11 nov. 2021.

CPRM – IGAM Projeto Águas do Norte De Minas – PANM. **Estudo da disponibilidade hídrica subterrânea do norte de Minas Gerais**. Relatório de Integração. Belo Horizonte, 2019.

DA CUNHA BARRETO, Ana Beatriz; MONSORES, André Luiz Muscel; PIMENTEL, Jorge. Modelo de favorabilidade hidrogeológica em aquíferos fissurais-a utilização de técnicas de

- geoprocessamento no cristalino do Estado do Rio de Janeiro. **Águas Subterrâneas**, 2001.
- DARDENNE, M. A. Síntese sobre a estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil Central. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 30, SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOLOGIA (SBG). [Anais...]. Recife, v. 2, p.507-610, 1978.
- DE BRITO, T.P. et al. Favorabilidade hidrogeológica do complexo bação, quadrilátero ferrífero-MG. **Águas Subterrâneas**, 2018.
- DINIZ, J. A. O.; MONTEIRO, A. B.; SILVA, R.C.; DE PAULA, T. L. F. **Manual de Cartografia Hidrogeológica**. CPRM, 2014. 219 p.
- FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; DEMÉTRIO, J. G. A. **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. 3. ed. Rio de Janeiro: Serviço Geológico do Brasil - CPRM. v.1, 2008. 812 p.
- GALVÃO, P., HALIHAN, T., HIRATA, R. Evaluating karst geotechnical risk in the urbanized area of Sete Lagoas, Minas Gerais, Brazil. **Hydrogeol. J.** 2015. <http://dx.doi.org/10.1007/s10040-015-1266-x>.
- GOLDSCHIEDER, N.; DREW, D. Methods in Karst Hydrogeology. Taylor & Francis. **International Contributions to Hydrogeology**, 2007. 264p.
- INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS - IGAM. **Base hidrográfica ottocodificada de Minas Gerais**. Belo Horizonte, 72p, 2012. Disponível em: http://www.igam.mg.gov.br/index.php?option=com_content&task=view&id=90&Itemid=147. Acesso em: 10 de out. 2021.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Caracterização climática nacional**, 2002. Disponível em <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/climatologia/15817-clima.html?=&t=o-que-e>. Acesso em: 13 jun. 2019.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Informações do município de Montes Claros, Minas Gerais**, 2022. Disponível em <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/montes-claros/panorama>. Acesso em: 08 ago. 2022.
- KEAREY P.; BROOKS, M.; HILL I. **An Introduction to Geophysical Exploration**: Blackwell Publishing, 2002. 249 p.
- KUCHENBECKER, M; BATISTA, G. A. P.; PEREIRA, A. S.; PACHECO, F. E. R. C.; MAGALHÃES, M. G.; COSTA, R. D. **Folha Brasília de Minas SE.23-X-A-II. Escala 1:100.000**. Minas Gerais, Belo Horizonte: UFMG; CPRM. Projeto Norte de Minas, 2014. 35 p.
- LEITE, M. E.; PEREIRA, A. M. **Metamorfose do espaço intrabano de Montes Claros/MG**. Montes Claros: Unimontes, 2008. 209 p.
- LIMA, Luana Alves de et al. Favorabilidade de Aquíferos Fraturados-Bacia Hidrográfica do Rio São Domingos-Estado do Rio de Janeiro. **Anuário de Instituto de Geociências**, v. 32, n. 2, p. 51, 2009. https://doi.org/10.11137/2009_2_51-61
- MAGNABOSCO, R.; GALVÃO, P.; CARVALHO, A. M. An approach to map karst groundwater potentiality in an urban area, Sete Lagoas, Brazil. **Hydrological Sciences Journal**, v. 65, n. 14, p. 2482-2498, 2020. <https://doi.org/10.1080/02626667.2020.1802031>
- MOURÃO, M. A. A.; CRUZ, W. B.; GONÇALVES, R. L. F. Caracterização hidrogeológica da porção mineira da Bacia Hidrográfica do São Francisco. *In*: BACIA DO SÃO FRANCISCO: GEOLOGIA E RECURSOS NATURAIS. [Anais...]. Belo Horizonte, SBG-MG, p. 327-350, 2001.
- NIEDZIELSKI ANDREA, F. A. **Análise da favorabilidade hidrogeológica do aquífero multicamada Taubaté na região sudoeste da Bacia Homônima** (Analysis of groundwater potentiality of the Taubaté multilayer aquifer in the Southwest Region of the homonymous basin). Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/Civil Engineering Program, Rio de Janeiro, 2013.
- PARDO-IGÚZQUIZA, E.; DURÁN, J. J.; DOWD, P. A. Automatic detection and delineation of karst terrain depressions and its application in geomorphological mapping and morphometric analysis. **Acta Carsologica**, 42/1, 17-24, Postojna, 2013. <https://doi.org/10.3986/ac.v42i1.637>
- QUEIROZ, G. L.; SALAMUNI, E.; NASCIMENTO, E. R. AzimuthFinder: ferramenta para a extração de dados e apoio na análise estrutural. **Geologia USP. Série Científica**, v. 14, n. 1, p. 69-80, 2014. <https://doi.org/10.5327/Z1519-874X201400010005>
- REIS, H. L. S; ALKMIM, F. F; FONSECA, R. C. S; NASCIMENTO, T. C.; SUSS, J. F.; PREVEATTI, L. D. The São Francisco Basin. *In*: HEILBRON, M.; CORDANI, U.; ALKMIM, F. (eds). São Francisco Craton, Eastern Brazil. **Regional Geology Reviews**, p. 117-143, 2017. https://doi.org/10.1007/978-3-319-01715-0_7
- RIBEIRO, C. G.; MEIRELES, C. G.; LOPES, N. H. B.; ARCOS, R. E. **Levantamento geológico estrutural aplicado aos fluxos dos aquíferos cárstico-fissurais da região da APA Carste de Lagoa Santa, Minas Gerais**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.
- SCHÖLL, W. U. Sedimentologia e geoquímica do Grupo Bambuí na parte sudeste da Bacia do São Francisco. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 29., 1976. v. 2, Ouro Preto, 1976. [Anais...]. Ouro Preto: Sociedade Brasileira de Geologia, p. 207-231, 1976.
- SUPERINTENDÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO DO NORDESTE - SUDENE. **Polígono das secas**, 1989. Disponível em http://www.sudene.gov.br/site/extra.php?id_oma=&cod=111#. Acesso em: Abril 2019.