

Sensoriamento remoto aplicado ao mapeamento regional das zonas de recarga dos aquíferos da Região Metropolitana de Belo Horizonte/MG

Remote sensing applied to regional mapping of aquifer recharge zones in the Metropolitan Region of Belo Horizonte/MG

Teledetección aplicada al mapeo regional de zonas de recarga de aquíferos en la Región Metropolitana de Belo Horizonte/MG

Carolina Cramer

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais – PUC-MG
carolinacramer@gmail.com

Marcelo Antonio Nero

Universidade Federal de Minas Gerais
marcelo-nero@ufmg.br

João Henrique Rettore Totaro

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais – PUC-MG
joaoretore@gmail.com

Sandro Laudares

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais – PUC-MG
sandrolaudares@gmail.com

Resumo

A conurbação majoritariamente desordenada acarreta uma exploração das águas subterrâneas ofensivas ao meio ambiente, interferindo diretamente na sinergia cíclica da água. Essa exploração hídrica sugere o estudo da natureza geológica dos aquíferos, que necessitam constantemente da recarga. Neste estudo, as caracterizações do meio físico foram empregadas para realizar o mapeamento regional dos lineamentos e, sugerir por meio da integração das análises aerogeofísicas as zonas preferenciais de recarga dos aquíferos em uma área de Minas Gerais no sudeste brasileiro. A área de estudo situa-se na Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH), capital de Minas Gerais, apresentando as unidades hidrogeológicas classificadas em Embasamento Cristalino, Quadrilátero Ferrífero e Grupo Bambuí/Carste, com a predominância de aquíferos fraturados das rochas dos Complexos Granítico-Gnássico-Migmatítico. Diante das abordagens metodológicas foi possível alcançar resultados pertinentes às extrações dos lineamentos por meio dos dados de sensoriamento remoto através do tratamento das imagens de satélite concomitante ao uso de alguns *softwares* e, de realizar a elaboração dos mapas de lineamento, perfilagem e densidade de lineamentos, permitindo análise das informações hidrogeológicas da região. Os resultados apontaram importantes considerações sobre as zonas preferenciais de recarga dos aquíferos. Nessa perspectiva é possível afirmar que os aquíferos compõem essencialmente o ciclo hidrológico da água e exibem um aspecto ambiental preocupante frente ao crescimento urbano.

Palavras-chave: Aquífero. Perfilagem. Aerogeofísicas. Poços. Água subterrânea.

Abstract

A mostly disorganized conurbation leads to the harmful exploitation of groundwater, directly interfering with the cyclical synergy of water. This water exploitation demands the study of the geological nature of aquifers, which constantly need recharge. In this study, the physical environment was characterized to carry out regional mapping of the lineaments and, by integrating aerogeophysical analyses, to suggest the preferred aquifer recharge zones in an area of Minas Gerais in southeastern Brazil. The study area is located in the Metropolitan Region of Belo Horizonte (RMBH), the capital of Minas Gerais, with hydrogeological units classified as the Embasamento Cristalino, Quadrilátero Ferrífero and the Bambuí/Carste Group, with the predominance of fractured aquifers in the Granitic-Gnassic-Migmatitic Complex rocks. Given the methodological approaches, it was possible to achieve results pertinent to the extraction of lineaments by remote sensing through the software treatment of satellite images and the preparation of lineament, profiling and lineament density maps, allowing for the analysis of hydrogeological information in the region. The results point to important considerations about the aquifers preferential recharge zones. From this perspective, it is possible to state that aquifers essentially make up the hydrological cycle of water and exhibit a worrying environmental aspect in the face of urban growth.

Keywords: Aquifer. Profiling. Aerogeophysics. Wells. Groundwater.

Resumen

La aglomeración urbana, en su mayor parte desorganizada, conduce a una explotación de las aguas subterráneas que atenta contra el medio ambiente, interfiriendo directamente en la sinergia cíclica del agua. Esta explotación del agua aconseja estudiar la naturaleza geológica de los acuíferos, que necesitan una recarga constante. En este estudio, se utilizaron caracterizaciones del medio físico para realizar una cartografía regional de lineamientos y sugerir, mediante la integración de análisis aerogeofísicos, las zonas preferidas para la recarga de acuíferos en un área de Minas Gerais, en el sudeste de Brasil. El área de estudio se localiza en la Región Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH), capital de Minas Gerais, con unidades hidrogeológicas clasificadas como el Embalse Cristalino, el Cuadrángulo de Hierro y el Grupo Bambuí/Carste, con predominio de acuíferos fracturados en las rocas del Complejo Granítico-Gnásico-Migmatítico. En vista de los abordajes metodológicos, fue posible alcanzar resultados pertinentes a la extracción de lineamientos por medio de datos de teledetección, a través del tratamiento de imágenes de satélite concomitante con el uso de algunos softwares, y elaborar mapas de lineamientos, perfiles y densidad de lineamientos, permitiendo el análisis de la información hidrogeológica de la región. Los resultados apuntaron importantes consideraciones sobre las zonas de recarga preferente de los acuíferos. Desde esta perspectiva, es posible afirmar que los acuíferos componen esencialmente el ciclo hidrológico del agua y presentan un aspecto ambiental preocupante frente al crecimiento urbano.

Palabras clave: Acuífero. Perfilado. Aerogeofísica. Pozos. Aguas subterráneas.

Introdução

As águas subterrâneas têm assumido um papel relevante para o abastecimento público. Comumente, os mananciais subterrâneos são vultosos, sua captação se isenta de estruturas dispendiosas e de tratamento e, devido à zona insaturada, os acuíferos funcionam como autodepuradores de possíveis contaminantes infiltrados (COSTA, 2002). As zonas de recarga de acuíferos ocorrem por toda a extensão que apresente elevada energia potencial, e são chamadas de

zonas preferenciais as áreas com maior eficiência de recarga hidráulica. Geomorfologicamente, as zonas preferenciais de recarga de aquíferos são os topos (FELIPPE *et al.*, 2008).

Antes de dar continuidade a presente pesquisa vale a pena ressaltar alguns trabalhos de referência, a saber: Wankler *et al.* (2012), tratam do estado da arte do conhecimento e perspectivas do Aquífero de Boa Vista, levando-se em conta vários aspectos, dentre os quais o ambiental; Martins Júnior *et al.* (2013), os quais desenvolveram uma metodologia de caracterização de assinaturas hidrogeoquímicas de partilha de aquífero entre bacias e de trajetos de água comuns em zonas de recarga de interflúvios por meio da coleta e da análise de características químicas de águas subterrâneas a partir de fontes; Hamed *et al.* (2023), onde os autores desenvolveram uma pesquisa hidrogeológica de aquíferos cársticos com o emprego de técnicas integradas de geomorfologia, geoquímica, sistema de informação geográfico e sensoriamento remoto em uma bacia hidrográfica na Região Sul da Tunísia, país Mediterrâneo da África; Ouarani *et al.* (2023) desenvolveram um estudo do processo de sinalização e de recarga de aquífero em Marrocos com emprego de Sensoriamento Remoto.

A região específica para o estudo de zonas preferenciais de recarga de aquíferos no presente trabalho é a Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH) – Minas Gerais, por meio de mapeamentos aerogeofísicos.

O Embasamento Cristalino é a unidade hidrogeológica predominante na região, possuindo uma espessura média não determinada, formada por aquíferos fraturados das rochas do Complexo Granítico-Gnáissico-Migmatítico (COPASA, 2016).

Os aquíferos do município de Belo Horizonte são classificados como livres ou freáticos, no qual não estão confinados por camadas impermeáveis, sendo o seu topo a própria superfície freática, sujeito às forças gravitacionais e de percolação. A recarga do aquífero ocorre devido à infiltração pluvial. No entanto, devido às diferenças litológicas nessa área estudada os aquíferos livres são intercomunicáveis. Não obstante, essa estrutura litológica não impede o fluxo das águas subterrâneas, o qual é heterogêneo e dependente das fraturas. A unidade litoestratigráfica mais extensa do município é composta por rochas gnáissicas e migmatíticas relativamente milonitizadas. Essa estruturação litológica apresenta a característica de conter fraturas, que possuem aberturas (ou fissuras) e são penetráveis, mas distanciadas entre si (COSTA, 2002).

Na abordagem metodológica o levantamento de dados e de poços da região permitiu a compreensão das informações hidrogeológicas concernentes à área de estudo. As perfurações estão diretamente relacionadas com os padrões de fraturas desenvolvidas e os lineamentos, indicando uma relação espacial existente entre os rendimentos dos poços e as estruturas geológicas. Como a RMBH está sobre um terreno cristalino que apresenta permeabilidade e porosidade primária, ou

seja, um forte indicativo de potencial hídrico, as águas subterrâneas exploráveis nas falhas e fraturas contidas nas rochas podem ocorrer a partir da permeabilidade e da porosidade secundária. Assim, através das análises espaciais foi possível definir os padrões de lineamento para identificar os alvos das águas subterrâneas e sugerir as respostas espectrométricas às condições hidrogeológicas (RANGANAI *et al.*, 2008).

O objetivo deste estudo é identificar as zonas preferenciais de recarga do aquífero da RMBH, através da análise e tratamento do sensoriamento remoto, analisando algumas interações geológico-geofísicas. Os objetivos específicos são realizar o mapeamento regional dos lineamentos da RMBH e, sugerir por meio da integração das análises aerogeofísicas as zonas preferenciais de recarga dos aquíferos.

Área de Estudo

A área de estudo é a Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH) localizada geograficamente na Região Sudeste do Brasil e Central do Estado de Minas Gerais (Figura 1).

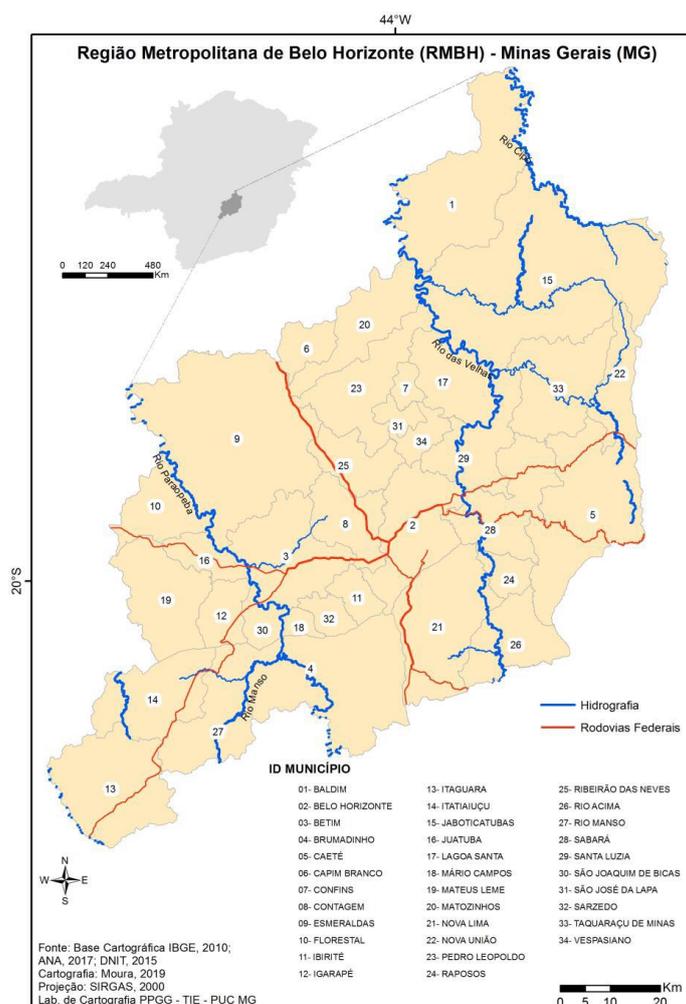


Figura 1 – Mapa dos municípios da Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH)/MG.
Fonte: Autora (2019)

Costa (2002) descreve a geomorfologia do município de Belo Horizonte como associada, basicamente a duas unidades, a saber, o Quadrilátero Ferrífero e a Depressão Sanfranciscana. Esta última é maior em extensão e percorre a drenagem da Bacia do Rio São Francisco por meio do Rio das Velhas. A geologia contrasta com os elementos fundamentais da análise hidrogeológica local, como a gênese dos solos, a relação entre a permeabilidade de solos e rochas, bem como com a ocorrência de falhas e fraturas que influenciam a hidrodinâmica das águas subterrâneas.

Predominam as unidades estratigráficas do Complexo Belo Horizonte (principalmente gnaisses e migmatitos) e do Supergrupo Minas (Grupo Itabira, Grupo Piracicaba e Grupo Sabará) (COSTA, 2002). A unidade hidrogeológica predominante é o Embasamento Cristalino (Figura 2), associado à aquíferos fraturados constituídos pelas rochas do Complexo Granítico-Gnássico-Migmatítico que apresenta potencialidade hidrogeológica fraca a mediana, considerando apenas as demandas localizadas, em razão de certa complexidade e imprecisão em estimar as reservas (COPASA, 2016).

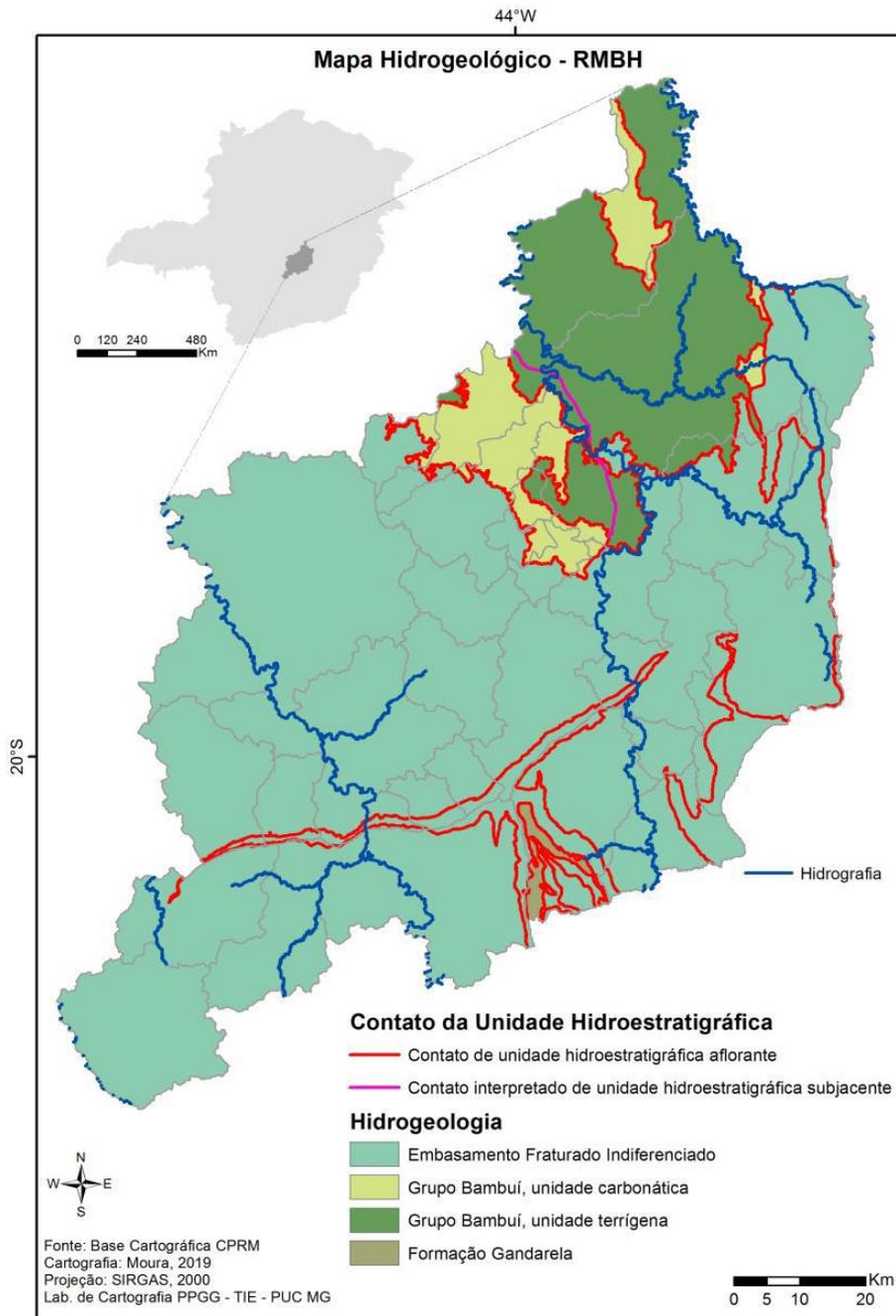


Figura 2 – Mapa de hidrogeologia da RMBH.
 Fonte: Autora (2019)

O uso atual das águas subterrâneas está intrinsecamente associado à exploração por meio de poços tubulares na RMBH. A Figura 3 mostra a quantidade de poços tubulares na área de interesse dessa pesquisa, com distribuição heterogênea, mas com maiores concentrações nos municípios do eixo NO/SE.

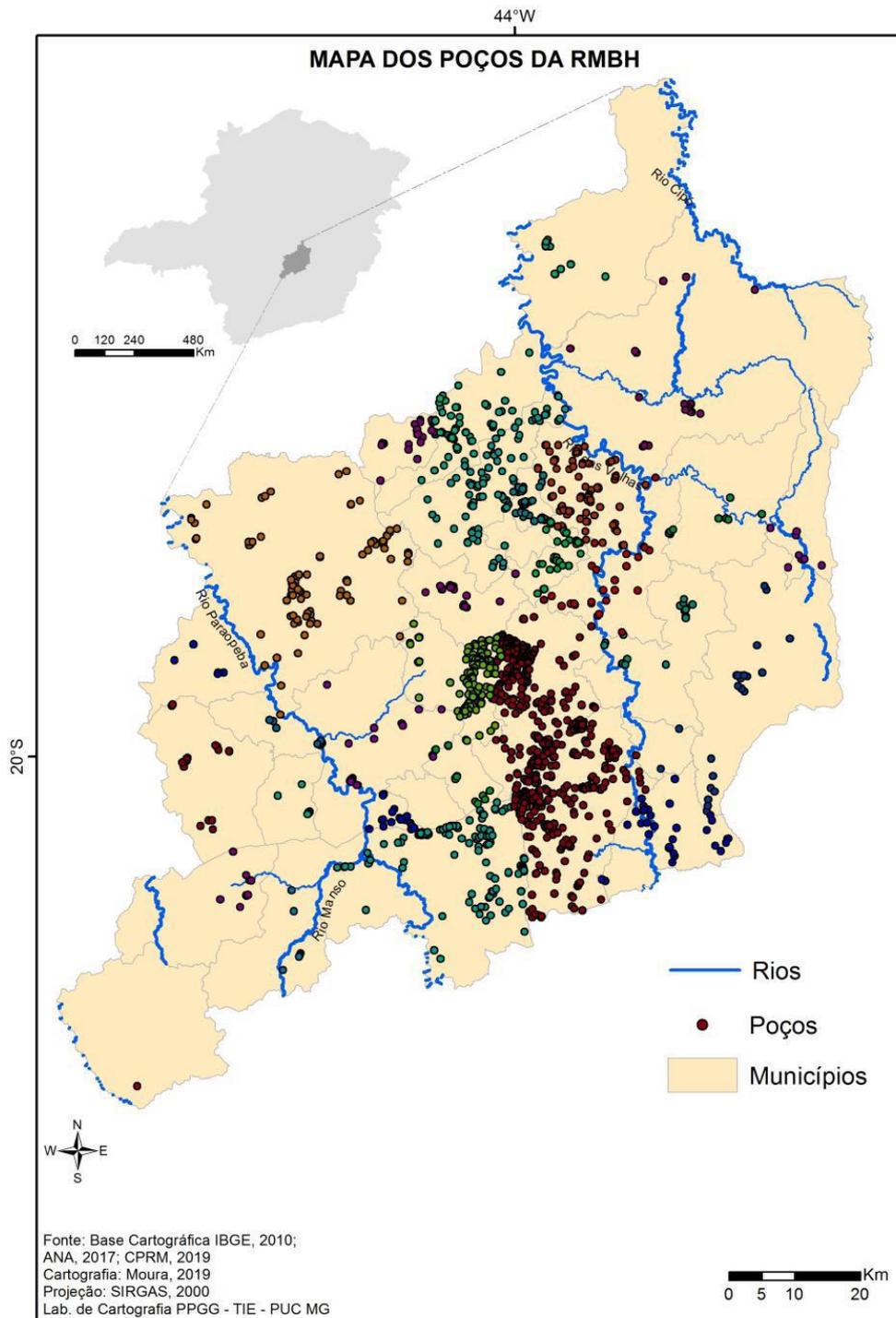


Figura 3 – Mapa dos poços da RMBH.
 Fonte: Autora (2019)

A Figura 4 é o mapa das vazões médias dos poços tubulares cadastrados, indicando a potencialidade hidrológica local. Os poços são importantes parâmetros na tentativa de estabelecer correlações entre a hidroquímica, a litologia e a geomorfologia.

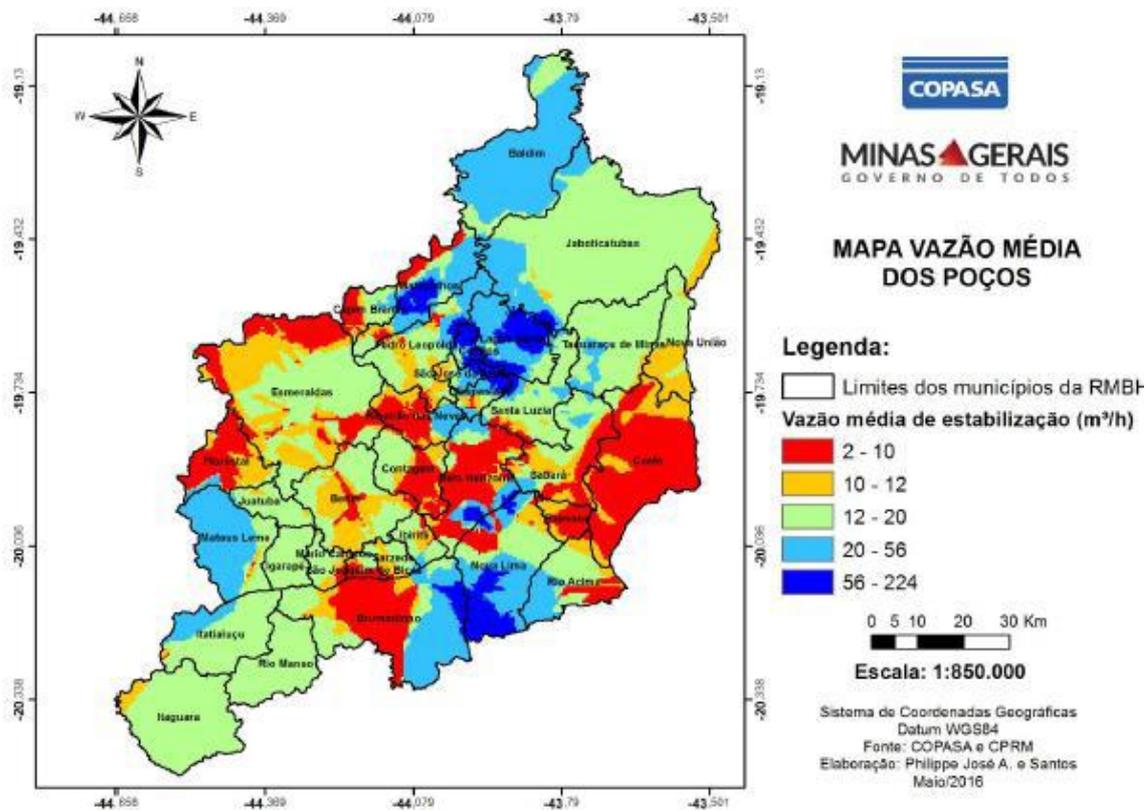


Figura 4 – Mapa da vazão média dos poços da RMBH.
Fonte: CPRM (2016)

Metodologia

Para a determinação do perfil de perfilagem da RMBH, os poços tubulares de água subterrânea foram consultados em relatórios do órgão governamental Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) através do domínio do SIAGAS (Sistema de Informações de Águas Subterrâneas), no qual ocorre um contínuo incremento do total de poços cadastrados, sendo observados durante o período dos meses de junho a agosto de 2019.

A base de dados do SIAGAS foi manipulada utilizando-se a bacia hidrográfica do Rio São Francisco, na região sudeste, no estado de Minas Gerais e nos 34 municípios que compõem a RMBH. Foram registrados 1.779 poços com algumas de suas características gerais, construtivas, hidrogológicas, testes de bombeamento e análises químicas.

Nas análises espaciais, a extração dos lineamentos foi realizada por meio dos programas ENVI (ENVI, 2023) e *PCI Geomatics* (GEOMATICA), utilizando o tratamento da imagem *LANDSAT 8 OLI/TIRS* da área em estudo pelo *software* ARCGIS 10.2 (ESRI, 2014), disponibilizada pelo Serviço Geológico Norte-Americano (USGS).

Os pontos dos poços tubulares com coordenadas precisas foram utilizados para a comparação do mapa de vazões médias da CPRM em relação ao potencial hídrico. Por meio da extração dos lineamentos foi elaborado o mapa de densidade dos lineamentos através do *software* ARCGIS 10.2 (ESRI, 2014), demonstrando a concentração da densidade de lineamentos nos compartimentos geológicos (BRICALLI *et al.*, 2013).

As perfurações dos poços estão diretamente relacionadas com os padrões de fraturas desenvolvidas e os lineamentos, indicando uma relação espacial existente entre os rendimentos dos poços e as estruturas geológicas.

Para o reconhecimento geológico da região estudada foi realizado o mapeamento geológico associado com o traçado dos lineamentos estruturais, bem como um mapa da geomorfologia do relevo caracterizado pela formação pedológica da RMBH.

A análise de dados de interpretação de fotos aéreas foi realizada em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG). Na interpretação dos lineamentos utilizou-se o diagrama de rosetas executado pelo *software* ROCKWORKS16 (RockWare). Os dados das coordenadas UTM lançados no ARCGIS 10.2 (ESRI, 2014) foram exportados para o ROCKWORKS16 (RockWare) em metros. Os parâmetros do diagrama foram definidos pela frequência do percentual total e bi-direcional, representando os valores e comprimento dos lineamentos.

Para o entendimento e racionalização das implicações, do processamento e tratamento dos dados estatísticos, foi utilizado o *software* ENVI (ENVI, 2023) para a análise do componente principal (ACP) anteriormente a etapa de extração dos lineamentos. E após o tratamento no ARCGIS 10.2 (ESRI, 2014), os dados foram exportados para o *software* ROCKWORKS16 (RockWare) a fim de se obter o diagrama de rosetas com informações estatísticas dos lineamentos extraídos. Obtiveram-se as análises com o intuito de identificar padrões e correlações entre a produtividade dos poços e os outros aspectos anteriormente citados.

Resultados e Discussão

A identificação e análise dos pontos de cadastro de águas subterrâneas apresentados anteriormente na Figura 3 auxiliaram na assimilação de áreas potenciais de uma caracterização hidrodinâmica do sistema. Assim, justifica-se a importância dos dados de controle dos poços para a calibração do modelo geofísico, utilizando os dados de capacidade específica para aferir o potencial produtivo do poço e, conseqüentemente, do aquífero (MADRUCCI *et al.*, 2005). No banco de dados do SIAGAS existem poços com os valores de vazão após estabilização (m³/h), mas não há informações suficientes na maioria dos poços dos municípios selecionados. Contudo, o uso atual da

água subterrânea foi compreendido na RMBH com a vazão média de estabilização dos poços consoante ao mapa de poços tubulares (CPRM, 2016).

A interpretação visual do mapa de distribuição de poços atual do SIAGAS (Figura 3) e do mapa de vazão média dos poços da CPRM (Figura 4) permite analisar as localizações dos poços perante as vazões registradas. Levando em consideração que a natureza do ponto se difere em poço tubular, nascente, poço escavado (cacimba/cisterna) e piezômetro, os municípios de Belo Horizonte (278), Brumadinho (116), Contagem (136), Esmeraldas (129) e Nova Lima (394) apresentam mais de 100 poços cadastrados.

Tendo em vista o município central da RMBH, Belo Horizonte, foram registrados dados de vazão após a estabilização para a maioria dos poços cadastrados. O potencial hídrico dos poços de Belo Horizonte é majoritariamente marcado por baixas vazões após estabilização, indicando um perfil potenciométrico baixo apesar da concentração de lineamentos no município.

Em relação à análise a partir do uso de técnicas sensoriamento remoto, foi utilizada a imagem de satélite *LANDSAT 8 OLI/TIRS* do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS) na data de aquisição de 22-05-2019, *Path 218, Row 74*, com resolução espacial de 30 metros das 7 bandas espectrais do sensor OLI, disponibilizada gratuitamente pelo domínio <<https://earthexplorer.usgs.gov/>> no formato GEOTIFF (USGS, 2019).

Após o tratamento da imagem nos programas, foi possível extrair os lineamentos da RMBH utilizando-se a banda 3 como referência para à sobreposição dos lineamentos e poços da área de estudo (Figura 5).

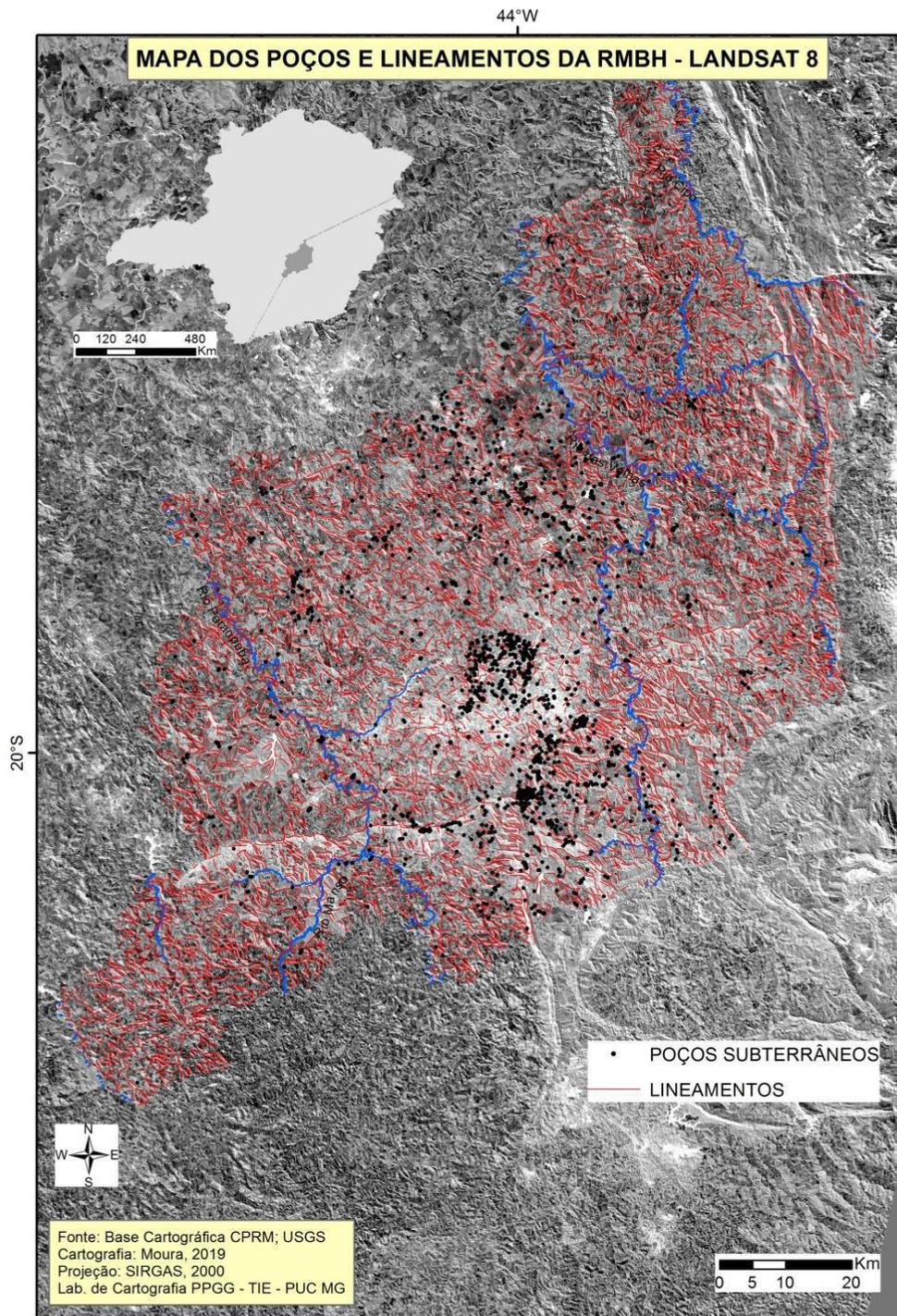


Figura 5 – Mapa dos poços e lineamentos da RMBH sob a imagem LANDSAT8.
Fonte: Autora (2019)

No mapa de lineamentos elaborado foram identificados 18.908 lineamentos e 1.778 poços subterrâneos. Observa-se uma maior concentração de lineamentos na faixa N-E (NNE a ENE) e N-S (SSE a SSW). Os poços encontram-se majoritariamente na direção NNO a SSE. O mapa de

densidade de lineamentos (Figura 6) destaca as maiores concentrações na porção nordeste (NE), sul-sudeste (SSE) e sul-sudoeste (SSW) (1,22 a 1,85 km/km²).

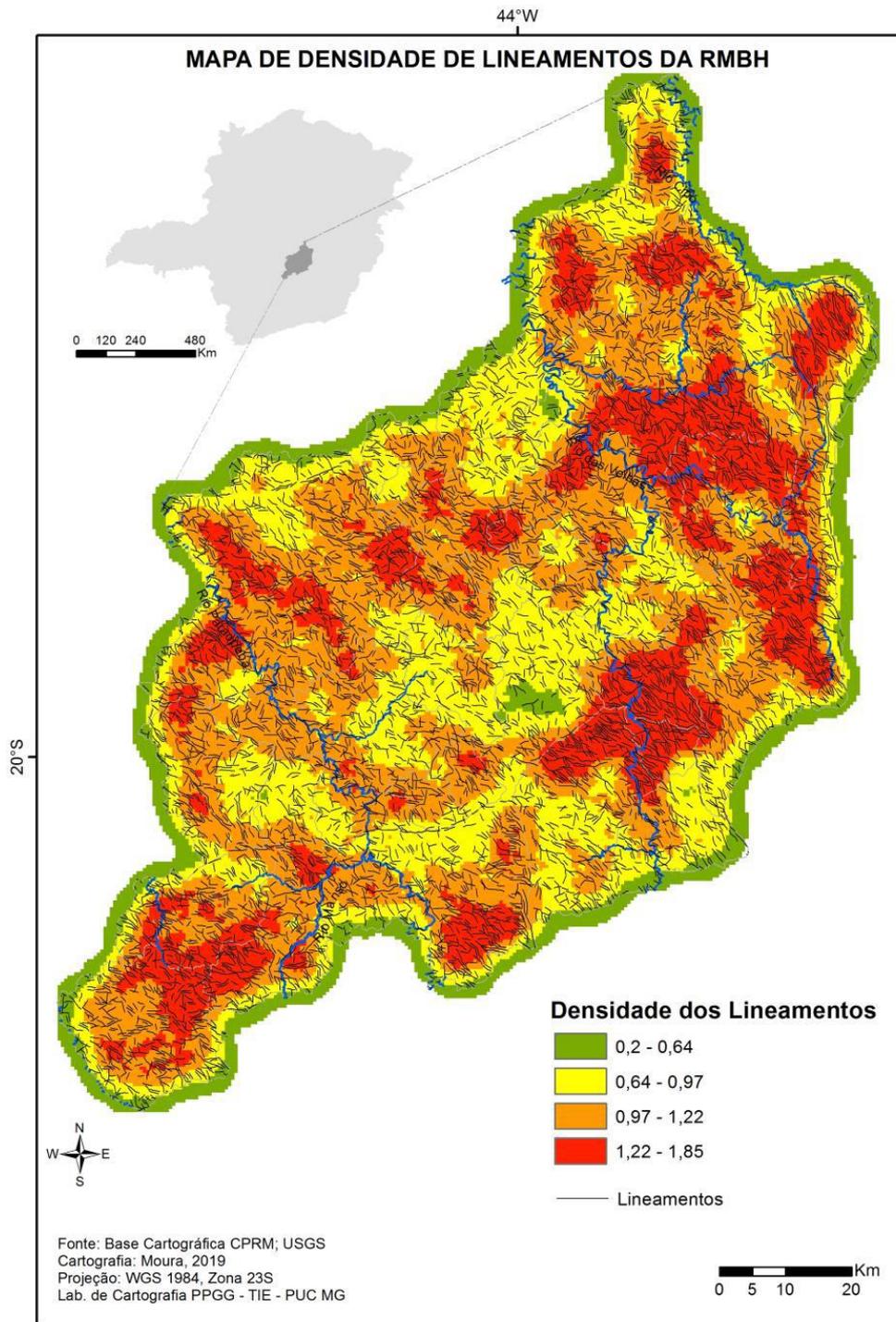


Figura 6 – Mapa de densidade de lineamentos da RMBH.
Fonte: Autora (2019)

Na porção oeste, também há uma importante concentração de lineamentos, principalmente no eixo noroeste (NW) a oeste-sudoeste (WSW) com uma densidade predominantemente alta entre 0,97 a 1,22 km/km².

Na análise geoestatística, a imagem *LANDSAT 8 OLI/TIRS* (USGS, 2019) foi utilizada para o processamento inicial estatístico, sendo aplicado a ferramenta de rotação de Análise do Componente Principal (ACP) do *software* ENVI (ENVI, 2023). O uso da técnica estatística de análise por meio da ACP foi empregado para estimar a convergência das variáveis e formar no primeiro componente uma base de informações compreendida nas demais variáveis (Prichoa *et al.*, 2013). Analogicamente, o programa, através da rotação do componente principal (CP), executa o cálculo estatístico do CP das sete bandas da imagem.

A imagem tratada estatisticamente foi empregada no *software* PCI *GEOMATICS* (GEOMATICA) mediante o algoritmo de extração de lineamentos por meio dos parâmetros de detecção de bordas, limiares e extração de curvas. Quando exportada em formato *shapefile* para o ArcGis 10.2 (ESRI, 2014), procede-se o manuseio dos lineamentos extraídos, dividindo as linhas compostas em linhas simples (ferramenta '*split line at vertices*'), editando os atributos dos lineamentos (adicionando coordenadas de pontos finais de cada linha na tabela de atributos) e exporta-se como arquivo CAD.

O desígnio das '*Trend Analysis*' foi explorado no *software* ROCKWORKS16 (RockWare) com a importação dos dados *dxf* gerados na etapa anterior, orientando os parâmetros de unidades de configuração, projeção e dimensão de dados. Produzindo o diagrama de rosetas por meio dos pontos de extremidades e escolha dos parâmetros a serem analisados, com os valores de direção e comprimento dos lineamentos determinados. Mediante esse procedimento é gerado um sumário com os dados estatísticos do diagrama segundo as variações da orientação espacial.

A análise dos lineamentos permite a obtenção da quantidade de estruturas lineares, a orientação espacial e o padrão de distribuição (REGINATO *et al.*, 2002). Por conseguinte, foram elaborados diagramas de rosetas, para tratamento de estruturas frágeis, de modo a representar as direções e frequências das medidas de fraturas, juntas, diacrases e falhas da área de estudo.

Foi realizado o processamento da análise dos lineamentos a partir do cálculo da direção, comprimento e densidade dos lineamentos, posteriormente sua representação no diagrama de rosetas e a compreensão dos domínios dos lineamentos (BRICALLI *et al.*, 2013). Assim, o diagrama de rosetas (Figura 7) apresenta-se como uma forma de apresentar a estatística de um conjunto de dados. Levando em consideração apenas a direção das estruturas, foi estabelecida a interação geológica em função dos dados submetidos no programa, coordenadas UTM em metros.

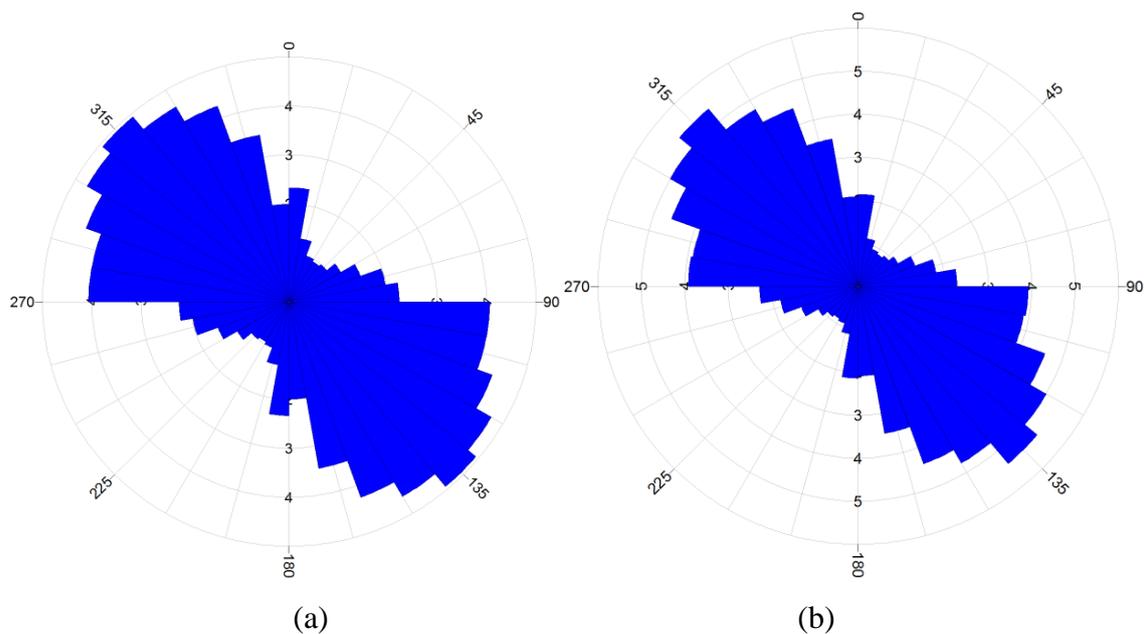


Figura 7 – Diagramas de rosetas de frequência por orientação e comprimento dos lineamentos da RMBH: (a) Frequência total da população (%); (b) Comprimento total dos lineamentos (%).
Fonte: Autora (2019)

Na roseta de estatísticas da frequência em porcentagem do total da população, os lineamentos estão majoritariamente concentrados nos quadrantes segundo (SE) e quarto (NW), bem como na roseta do comprimento total dos lineamentos. Os lineamentos mais compridos se encontram no rumo SE45, mas estão entre 60SE e 30SE, e no rumo NW45, entre NW30 e NW60.

A frequência (%) demonstra o número de lineamentos no percentual total (18.908 lineamentos) nas direções distintas. As maiores quantidades de lineamentos estão no rumo SE45, abrangendo cerca das direções 60SE a 30SE, e no rumo NW45, entre NW30 e NW60, mas em um raio maior no círculo se comparado a outra roseta.

Na análise da interação geológica-geofísica diante dos parâmetros abordados como densidade e comprimento dos lineamentos e os poços subterrâneos, levando em consideração os aspectos fisiográficos da RMBH, é conclusivo a ocorrência da delimitação das zonas preferenciais de recarga dos aquíferos. Essa delimitação não está compactada apenas as áreas de topos de morro e reservas naturais, mas em toda e qualquer região, seja por meio de pequenas ou grandes fraturas, mas que apresente permeabilidade no solo.

Os poços subterrâneos outorgados é um dos fatores mais importantes para parametrizar o comportamento hídrico dos aquíferos, que aliados com as ferramentas de sensoriamento remoto, tratamentos de imagens que realçam a geologia almejada e *softwares* específicos, permitiram compreender um pouco mais a dinâmica hídrica dos aquíferos da RMBH.

A concentração dos poços no eixo noroeste-sudeste, principalmente nos municípios de Nova Lima, Belo Horizonte, Contagem, Brumadinho, Esmeraldas e Lagoa Santa, destacam-se os aquíferos fraturados Centro-Sul, a noroeste o Bambuí-Cárstico, e uma menor parcela a sudeste nos aquíferos Gandarela e Cauê. A hidrogeologia predominante neste eixo é o embasamento fraturado indiferenciado, a noroeste Grupo Bambuí e uma pequena porção da Formação Gandarela a sudeste.

Na análise geológica do eixo noroeste-sudeste com a maior densidade de poços, há uma divisão mais homogênea nas unidades estratigráficas entre o Complexo Belo Horizonte, com os municípios de Belo Horizonte e Contagem, o Supergrupo São Francisco a noroeste, e os Supergrupo Minas, Rio das Velhas e Espinhaço em Nova Lima e Brumadinho, a sudeste.

Na geomorfologia os Patamares de Belo Horizonte ocupam as áreas centrais da RMBH, os municípios de Belo Horizonte e Contagem onde há maiores concentrações dos poços outorgados, com altimetrias em torno de 800 a 900 metros. Na porção sudeste, em Nova Lima, predomina-se altitudes em torno de 1000 metros nas Serras do Quadrilátero Ferrífero, bem como nas bordas de Brumadinho. E a noroeste, na Depressão do Alto Rio São Francisco, as altimetrias são mais baixas, com cerca de 700 metros.

A distribuição de poços é especialmente condicionada pela implantação de estruturas urbanas e extrativas, próximo das quais são abertos poços tubulares e cisternas para diversos fins (abastecimento público, rebaixamento do lençol freático em áreas de mineração, agricultura, dentre outros).

Na porção norte do município de Belo Horizonte, uma abundância de pontos assinala, nas porções mais rebaixadas do Complexo homônimo, intensa atividade exploratória - mas, não necessariamente, vazões mais elevadas. Por fim, dispersos ao longo de área considerável que compreende as formações do Grupo Bambuí, cujo comportamento hidráulico é sensivelmente diferente dos aquíferos mais favoráveis da RMBH.

Além disso, as cacimbas e cisternas (também representadas de forma geral pelos poços tubulares) terão garantia de oferta de água apenas em condições associadas a fatores geológicos e antrópicos, pois são estruturas superficiais que se beneficiam quase exclusivamente do comportamento hidrológico de solos. Garantias mais efetivas correspondem, obviamente, a poços tubulares lançados em aquíferos fraturados, desde que a prospecção utilize informações como as consideradas neste estudo.

Já o mapa de densidade dos lineamentos permite a interpretação da concentração dos lineamentos a nordeste, sul-sudeste, sul-sudoeste e heterogeneamente a oeste da RMBH. Analogamente o diagrama de rosetas apontou estatisticamente uma frequência maior de

lineamentos a sudeste e a noroeste, mais especificamente com orientações entre as direções 60SE a 30SE e entre NW30 e NW60.

Concomitante à concentração dos lineamentos e seus principais direcionamentos, a correlação dos poços tubulares cadastrados e suas respectivas vazões corroboram informações do potencial hídrico das fraturas pertinentes aos aquíferos. A alta densidade de lineamentos a nordeste revelam vazões de baixas a moderadas e baixas incidências de poços cadastrados em cima ou próximos dos lineamentos.

A densidade de lineamentos concentrada a sudeste coincide com uma porção da concentração de poços principalmente do município de Nova Lima, que apresenta vazões médias discrepantes. E as altas densidades de lineamentos distribuídas de forma heterogênea na faixa noroeste, estão marcadas por vazões médias de moderadas a baixas, com poços cadastrados principalmente nos municípios de Esmeraldas, Pedro Leopoldo e Confins. Em Confins e Lagoa Santa as vazões dos poços apresentam alta densidade, com concentrações consideráveis de lineamentos sobrepostos a muitos poços cadastrados nas proximidades.

As maiores vazões médias estão localizadas, principalmente, no eixo noroeste-sudeste, com exceção de grande parte dos municípios de Belo Horizonte e Contagem, nos quais as densidades de lineamentos predominantes estão a nordeste e a sudeste, e os poços cadastrados também no eixo noroeste-sudeste.

Essas análises devem ser úteis para a gestão integrada dos recursos hídricos subterrâneos e superficiais.

Considerações Finais

Este trabalho forneceu uma série de descobertas interessantes e úteis para o dinamismo do ciclo hidrológico, sobretudo, das águas subterrâneas. A dinâmica de reabastecimento dos aquíferos indicam áreas susceptíveis, principalmente nas zonas de afloramentos de rochas sedimentares e altos topográficos. Bem como metodologias de recarga artificial destes. No entanto, o desenvolvimento deste trabalho justamente amplificou e agregou indicadores pertinentes para os possíveis potenciais de recarga acumulados em outras zonas.

As abordagens metodológicas empregadas permitiram o estudo da perfilagem da RMBH, a extração de lineamentos por meio dos dados de sensoriamento remoto, o entendimento do mapa de vazões médias dos poços através de seus potenciais produtivos e, o diagrama de rosetas pelo uso de geoestatística mediante o uso de alguns programas da área de Geoprocessamento, podendo também serem replicados e reproduzidos com o emprego de programas abertos de uso gratuito, como seria o caso do QGIS (QGIS.org., 2023) e GVSIG (GVSIG Association, 2017), por exemplo.

Considerando ainda esse tema e levando-se em conta a maior disponibilidade e variabilidade de acervo de imagens de satélite, vale ressaltar que a metodologia aqui poderia utilizar de outros acervos em trabalhos futuros, tais como os provenientes de imagens do novo satélite brasileiro Amazônia-1, lançado recentemente em 2021 (INPE, 2021), bem como da base de dados da Planet (PLANET TEAM, 2023).

O levantamento de dados de poços cadastrados no SIAGAS apresentou uma deficiência de informações importantes para traçar com melhor precisão o potencial produtivo de uma área. Podendo concluir a análise apenas para Belo Horizonte, que indicou um perfil potenciométrico baixo apesar da concentração de lineamentos no município.

A interconexão de fraturas favorece melhores condições de porosidade e permeabilidade das rochas cristalinas visando à produtividade de poços, sendo que a presença de lineamentos, não necessariamente, testifica um considerável potencial hídrico, mas pode ser um forte indicativo se associado as características dos poços tubulares próximos. Comprovando as zonas preferenciais de recarga dos aquíferos por meio de adensamentos de perfilagem com um potencial hídrico satisfatório.

Todos os fatores supracitados integram a interação geológica-geofísica para se sugestionar a delimitação das zonas preferenciais de recarga dos aquíferos da RMBH. Essa delimitação não está compactada apenas as áreas permeáveis de topos de morro e reservas naturais, mas em toda e qualquer região, seja por meio de pequenas ou grandes fraturas, mas que apresente permeabilidade no solo.

Toda área permeável apresenta potencial hídrico para recarga dos aquíferos, com foco nas faixas permeáveis onde coexistem maiores densidades de lineamentos e orientações singulares ao potencial hídrico, conseqüentemente, apresentando poços com vazões elevadas.

Referências

BRICALLI, Luiza Leonardi; MELLO, Cláudio Limeira. Padrões de lineamentos relacionados a litoestrutura e ao fraturamento neotectônico. Espírito Santo: SE do Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, 14(3). 2013.

COPASA. DTE/SPMA/DVHD. Disponibilidades hídricas subterrâneas como subsídio ao plano diretor de abastecimento da região metropolitana de Belo Horizonte- RMBH. Diagnóstico e prognósticos do uso das águas subterrâneas para o sistema de abastecimento da RMBH. Julho de 2016.

COSTA, Walter Duarte. **Caracterização das condições de uso e preservação das águas subterrâneas do município de Belo Horizonte – MG**. Tese de doutoramento. Instituto de

Geociências. Universidade do Estado de São Paulo. Área de concentração: Recursos minerais e hidrogeologia. São Paulo. 2002.

CPRM, 2016. Disponibilidades hídricas subterrâneas como subsidio ao plano diretor de abastecimento da região metropolitana de Belo Horizonte – RMBH. DTE, SPMA, DVHD. Julho, 2016.

ENVI. Versão 5.7. ENVI. NV5 Geospatial, 2023. Disponível em: <https://www.envi.com.br/pages/envi>. Acesso em: 18/10/2023

ESRI, 2014. ArcGIS, 10.2. Disponível em: <https://appsforms.esri.com/products/download/>. Acesso em: 18/10/2023

FELIPPE, Miguel. F. ; MAGALHAES JR., A. P. Proposta de classificação de topos como zonas preferenciais de recarga de aquíferos: o caso de Belo Horizonte. MG. In: VII SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA e II ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE GEOMORFOLOGIA. Belo Horizonte, 2008.

GEOMATICA. Versão 103. PCI Geomatics. Disponível em: https://osbsoftware.com.br/fabricante/pci-geomatics?pht=83051652294591440&gad_source=5&gclid=EAIAIQobChMIlbG6kaO3gMVjF9IAB2twQsG. Acesso em: 18/10/2023.

GVSIG Association, 2017. Documentación de GVSIG ES. <http://downloads.gvsig.org/download/web/es/build/html/index.html>

HAMED, Younes et al. Hydrogeological investigation of karst aquifers using an integrated geomorphological, geochemical, GIS, and remote sensing techniques (Southern Mediterranean Basin—Tunisia). **Environment, Development and Sustainability**, p. 1-33, 2023. Disponível em: <https://idp.springer.com/authorize/casa?redirect_uri=https://link.springer.com/article/10.1007/s10668-023-02994-8&casa_token=V81NSXqIyNgAAAAA:vhjimPw0cKINfassyjddfzIFxle3a6SqefWuPO0kJ9ExnFqVaq1DAchr0ZUiXaG_jXsJXA807IhCc3Mw> Acesso em: 18/10/2023.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **AMAZONIA 1**: Descritivo da Missão e do Satélite. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2021.

MADRUCCI, Vanessa, ARAÚJO, Carlos César & TAIOLI, Fábio. Análise integrada de dados de sensoriamento remoto, geologia e geofísica no estudo de aquífero fraturado, Lindóia – SP. **Revista Brasileira de Geofísica**, 2005, 23(4): 437–451.

MARTINS JÚNIOR, P. P. M.; VASCONCELOS, V. V.; SCHERRER, L. R.; MORAIS, M. C., SANTA CECÍLIA, V. C.; GOMES, L. A. M.; NOVAES, L. A. D. Metodologia para caracterização de assinatura geoquímica de trajetos de água em zonas de recarga de interflúvios. **ACTA Geográfica, Boa Vista**, v. 7, n. 14, p. 193-197, 2013. Disponível em: <https://revista.ufr.br/actageo/article/view/834/1010>. Acesso em: 18/10/2023.

OUARANI, M.; BRAHIM, Y. A.; MULLA, D.; RAFIK, A.; AZENNOUD, K.; BOUCHAOU, L.; CHEHBOUNI, A. Comprehensive overview of groundwater salinization and recharge processes in a semi-arid coastal aquifer (Essaouira, Morocco). **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 49,

p. 101501, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221458182300188X>. Acesso em: 18/10/2023.

PLANET TEAM. **Planet application program interface**: In space for life on Earth. San Francisco, 2023. Disponível em <<https://www.planet.com/products/basemap/>>

PRICHOA, E. V; RIBEIRO, S. R. A. Aplicação da análise de componentes principais em dados extraídos automaticamente de imagens de satélite landsat 5 TM. In: SIMPÓSIO BASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16., Foz do Iguaçu. INPE, 2013.

QGIS.org. (2023). QGIS , 3.32.3. <https://qgis.org/en/site/forusers/download.html>

RANGANAI, R. T; EBINGER, C. J. Aeromagnetic and Landsat TM structural interpretation for identifying regional groundwater exploration targets, south-central Zimbabwe Craton. **Journal of Applied Geophysics**. 65 (2008) 73–83.

REGINATO, P. A. R.; STRIEDER, A. EXTRAÇÃO DE LINEAMENTOS VISANDO A PROSPECÇÃO DE AQUÍFEROS FRATURADOS NA FORMAÇÃO SERRA GERAL. **Águas Subterrâneas**, [S. l.], n. 1, 2002. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/22450>.

ROCKWARE. Versão 16. RockWare Inc. Disponível em: <https://www.rockware.com/support/rockworks-support/rockworks-downloads/rockworks-archived-versions/>. Acesso em: 18/10/2023

USGS, 2019. Arquivo USGS EROS - Arquivos Landsat - Landsat 8-9 Coleção OLI/TIRS 2 Produtos científicos de nível 2. Acessado em 9 de novembro de 2023 em URL <https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-landsat-archives-landsat-8-9-olitirs-collection-2-level-2>

WANKLER, F. L.; EVANGELISTA, R. A. O.; SANDER, C. Sistema aquífero Boa Vista: “estado de arte” do conhecimento e perspectivas. **ACTA Geográfica, Boa Vista**, v. 6, n. 12, p. 21-39, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.5654/acta.v6i12.731>. Acesso em: 18/10/2023.