ESTUDO DOS FATORES QUE INTERFEREM NA FAVORABILIDADE HIDROGEOLÓGICA DE AQUIFEROS EM REGIÕES DE CLIMA SEMIÁRIDO BRASILEIRO

Raíssa Lóren de Oliveira Fernandes[1], Otávio Enzo Teixeira Dutra[1], Gustavo Barbosa Soares[1], Paulo Henrique Santana França[1], Luana Alves de Lima[1]

[1]Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM), Janaúba, Brasil (soares.gustavo@ufvjm.edu.br)

Resumo: A gestão das águas subterrâneas é de suma importância nas regiões semiáridas, levando o presente trabalho a investigar os impulsionadores da favorabilidade hidrogeológica, a fim de se identificar locais com potencial sustentável para aquíferos. Através da análise de parâmetros SIG, os resultados revelaram os fatores condicionantes dos aquíferos das regiões. Ademais, devido à escassez deste tema na literatura, estudos futuros são essenciais para uma visão mais ampla nestes contextos regionais.

Palavras-chave: **Favorabilidade hidrogeológica; Clima semiárido; SIG; Fatores condicionantes; Água subterrânea**.

INTRODUÇÃO

No contexto histórico da civilização, sabe-se que a urbanização se desenvolveu onde a água foi presente, como exemplo, as primeiras grandes civilizações às margens dos rios Nilo (Egito), Tigre-Eufrates (Mesopotâmia), Amarelo (China) e diversos outros. Ademais, em uma vertente econômica, faz-se jus ao valor único desse recurso hídrico natural para a população, visto que as indústrias utilizam dessa substância para sua perpetuação, seja ela como matéria prima para fabricação de produtos, como o aço, ou para lavagem de alimentos, como acontece nas indústrias alimentícias (BRUNI, 1993).

A água , presente nos estados físicos como sólido, na sua forma de gelo, líquido, na forma de água líquida e vapor d'água em sua forma gasosa (EARTHHOW, 2018) é um recurso natural crucial para a vida na Terra, atuando na manutenção do ciclo hidrogeológico e dos diversos ciclos biogeoquímicos (DE ALMEIDA, 2010). Sua estrutura química se dá pela presença de um átomo de oxigênio e dois átomos de hidrogênio, ligados por ligações intramoleculares covalentes e ligações dipolo-dipolo denominadas por ligações de hidrogênio, compondo as ligações intermoleculares desta com outras moléculas de água, que acontecem em todo momento e de forma extremamente rápida (“1.11”, 2014).. Ademais, a água é considerada um solvente, sendo capaz de dissolver uma vasta gama de moléculas polares e compostos iônicos, além de ser uma molécula polar, devido à diferença de eletronegatividade entre seus átomos, favorecendo as propriedades atrativas da água (RYE *et al*., 2016).

Biologicamente, a água compõe cerca de 70% do corpo humano, podendo chegar a níveis superiores em outros seres vivos, como a água-viva, que possui 95% de seu corpo composto por essa substância (ENEM, 2018). Em parâmetros matemáticos, a água constitui 71% da superfície terrestre, sendo 97,5% dessa composição presente nos mares e oceanos, enquanto que 2,5% está presente como água doce (“Água no mundo”, [21--]). Dentro dessa porcentagem de água doce, 69,9% se encontra em geleiras , 29% em águas subterrâneas, 0,3% em rios e lagos e 0,3% compondo a porção de outros, sendo vapor de água ou diversos outros (“Distribuição da água no mundo”, 2024).

As águas subterrâneas se configuram como a parcela de água que permanece no subsolo, meio pelo qual esta flui até sua descarga em águas superficiais, ser captada por raízes de plantas ou mesmo ficar retida em poços de água subterrâneos, os quais podem servir de uso para a população (MANZIONE, 2015). Dentre as formações geológicas que controlam as águas subterrâneas, tem-se como principais: os aquíferos, sendo caracterizados como sendo formações geológicas porosas e permeáveis que gerenciam grandes quantidades de água e se encontram em diversas profundidades abaixo do solo (MAT, 2023); aquitardos ou hodiernamente denominados por unidades de confinamento com vazamento, armazenam água e retardam sua transmissão devido à baixa permeabilidade, possibilitando o vazamento entre aquíferos adjacentes, mas não produzindo quantidades úteis de água (WOESSNER; POETER, 2020); aquicludes, consistindo em formações geológicas com material

impermeável (como argilas), permitindo armazenar água mas não de transmitir-la (DE ALMEIDA, 2016) e aquifugos, sendo formações geológicas incapazes de armazenar ou transmitir água, como rochas ígneas não fissuradas ou fraturadas (“Types of Aquifers”, 2023).

Dentro desse contexto, surge um importante conceito conhecido como favorabilidade hidrogeológica, sendo caracterizado como uma adequação das condições geológicas e hidrológicas de uma área, para a ocorrência de água subterrânea. Ademais, entende-se como favorabilidade hidrogeológica, o mapeamento que possa contribuir com a indicação de áreas mais ou menos propensas à ocorrência de água subterrânea, tornando-se uma ferramenta importante para prospecção desse manancial. Visto que as águas superficiais frequentemente não suprem todas as necessidades de consumo, há uma certa preocupação na preservação, gestão e utilização adequada das águas subterrâneas, tornando-se fundamental a realização de estudos acerca da favorabilidade hidrogeológica de aquíferos para avaliação de seus potenciais, auxiliando no gerenciamento desse recurso e assegurando sua sustentabilidade (LIMA, 2009).

Nas regiões climáticas semiáridas, onde as águas superficiais não estão prontamente disponíveis devido à elevada evaporação, as águas subterrâneas tornam-se muito importantes. Portanto, o abastecimento humano e a agricultura, incluindo outras atividades económicas locais, dependem delas (Tuinhof & Heederik, 2003; Scanlon *et al*., 2017). A exploração sustentável destes recursos hídricos é uma informação vital para a favorabilidade da hidrogeologia nessas áreas porque ajuda na identificação de fontes de água subterrânea que podem ser geridas com garantia de disponibilidade contínua e água de qualidade (Foster & Loucks, 2006). Os efeitos da seca também podem ser mitigados pela gestão adequada das águas subterrâneas, aumentando simultaneamente a resiliência das comunidades locais face à variabilidade climática (Custodio, 2002; Llamas & Martínez-Santos, 2005).

Diante do exposto, o objetivo do presente trabalho foi realizar um estudo dos fatores que influenciam no mapeamento da favorabilidade hidrogeológica, sobretudo em aquíferos de clima semiárido, além de fornecer uma contribuição para o tema.

MATERIAL E MÉTODOS

A abordagem adotada neste estudo consistiu em uma exploração profunda em bases de dados científicas, notadamente o Google Acadêmico e o Portal de Periódicos da CAPES. A busca foi realizada por meio de palavras-chave específicas como “favorabilidade hidrogeológica”, “semiárido”, “gestão de recursos hídricos”, “águas subterrâneas” e “sustentabilidade”, para revelar artigos, teses, dissertações, trabalhos apresentados em eventos de interesse e relatórios técnicos das últimas duas décadas. Os critérios de inclusão e exclusão foram estabelecidos com base na disponibilidade do texto completo por meio de publicação com revisão por pares neste período. Portanto, estudos duplicados foram excluídos juntamente com resumos que não continham artigo completo. Após a identificação dos estudos nas bases de dados Google Scholar, Portal de Periódicos CAPES, Scopus, Web of Science e ScienceDirect que estivessem relacionados às aplicações de favorabilidade hidrogeológica, foi realizada uma revisão detalhada dos trabalhos selecionados. Foram extraídos dados sobre o uso da aplicação de favorabilidade hidrogeológica em regiões semiáridas e diferentes métodos utilizados para classificar os fatores que a influenciam, além dos resultados obtidos nessas regiões. Os fatores que o influenciam, como características geológicas, hidrológicas, climáticas e de uso do solo, foram classificados com base em sua relevância e impacto identificados nos estudos analisados. A natureza sistemática desta metodologia permitiu uma elucidação extensa e detalhada da favorabilidade hidrogeológica, principalmente em regiões semiáridas, estabelecendo assim uma base sólida para recomendações e estratégias pragmáticas para a gestão sustentável dos recursos hídricos subterrâneos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como produto principal da presente pesquisa, fpi apresentada a Tabela 1, mostrando os resultados encontrados de trabalhos sobre favorabilidade hidrogeológica em clima semiárido, por meio da pesquisa bibliográfica que se delimitou a apenas o Brasil.

Os resultados obtidos neste trabalho mostraram que a metodologia de mapeamento da favorabilidade hidrogeológica, baseada na análise de parâmetros relevantes em ambiente SIG (Sistema de Informações Geográficas), se mostrou eficaz para a área de estudo.

A partir da integração de mapas temáticos como densidade de lineamentos (morfoestruturais, magnetométricos e radiométricos), feições cársticas, recarga, declividade e sistemas aquíferos, esses que, segundo o CPRM/IGAM (2019), são comumente aquíferos granulares associados à rochas sedimentares e fissurais relacionados a falhas.

Através da análise dos mapas utilizadas, as áreas de maior potencial para exploração de água subterrânea estão associadas à maior densidade de lineamentos,

maior densidade de feições cársticas, menores declividades, maiores taxas de recarga e aos sistemas aquíferos mais produtivos (cárstico e granular). A distribuição espacial dos poços com diferentes níveis de produtividade em toda a área de estudo, inclusive em zonas de alta favorabilidade, demonstra a complexidade e heterogeneidade dos aquíferos cársticos.

Dada a eficiência no uso das técnicas para indicar zonas com maior favorabilidade hidrogeológica, é possível aplicá-las em outras regiões com contexto geológico semelhante visto que a identificação das áreas de maior favorabilidade hidrogeológica pode auxiliar na tomada de decisões estratégicas, como o planejamento da expansão urbana, a realocação de poços e a implementação de medidas para evitar a superexploração dos aquíferos.

Tabela 1. Revisão acerca de estudos sobre favorabilidade hidrogeológica no Brasil.

Região de Aplicação do Método de Favorabilidade	**Fatores Condicionantes**	**Referência**
Bacia Hidrográfica do Rio Verde Grande/MG	Dados geológicos e morfoestruturais com testes de bombeamento de poços profundos	(GURITA. *et al*., 2022).
Circuito das Águas Paulista/SP	Mapeamento da favorabilidade hidrogeológica em aquíferos fraturados através de mapas geológicos, fisiográficos, estrutural, de uso e cobertura do solo	(AYER; GAROFALO; PEREIRA, 2017)
Chapada Diamantina / BA	Delimitação geográfica dos domínios visando agrupar as áreas afins constituídas pelos principais atributos hidrogeoclimáticos e delimitar ou agrupar aquíferos com características similares	(APARECIDO AUGUSTO; GUIMARÃES CAMPOS, 2021)
Região Urbana de Sete Lagoas	Dados geológicos em superfície e subsuperfície para modelagem hidrogeológica, vazão específica e transmissividade de poços	(MAGNABOSCO; GALVÃO; MACIEL, 2019)
Estado do Rio de Janeiro	Mapa de solos com declividade do terreno, densidade das fraturas, tipo de solo, uso e cobertura do solo, densidade, drenagem e litologia	(DA CUNHA BARRETO; MONSORES; PIMENTEL, 2001)
Montes Claros, MG	Mapeamento hidrogeológico, geofísica, testes de bombeamento e sensoriamento; densidade de lineamentos e feições cársticas	(GURITA, 2020)
Nossa Senhora do Socorro, SE	Análise de parâmetros hidrogeológicos e geofísicos; áreas mais favoráveis para exploração de água subterrânea	(MARTINS; GONÇALVES, 2024)

Região sudoeste da Bacia de Taubaté, SP	Métodos de análise hidrogeológica e geoprocessamento; áreas com diferentes níveis de favorabilidade relacionadas à geologia local	(NIEDZIELSKI MACHADO ANDREA, 2013)

CONCLUSÃO

Diante dos fatos mencionados, pôde-se compreender a importância da favorabilidade hidrogeológica, principalmente em regiões de clima semiárido, devido a água superficial ser limitada. Por meio dessa ferramenta, foi possível mapear áreas propícias de água subterrânea, as quais podem ser adequadas para uso.

A metodologia utilizada para a realização deste trabalho foi eficaz, devido à seleção dos arquivos que eram pertinentes ao tema. Entretanto, na literatura há uma escassez deste tema nesta região específica, mostrando que é um tema promissor e que deve ser pesquisado futuramente.

Predominantemente são utilizadas as ferramentas de sensoriamento remoto e SIG, para mapeamento da favorabilidade hidrogeológica.

Baseando-se nos estudos, foi possível obter resultados sobre a favorabilidade hidrogeológica no semiárido e em regiões predominantemente com aquíferos cársticos e fraturados. Os autores recomendam que para avançar nos estudos de favorabilidade hidrogeológica é necessário delinear locais específicos com alto potencial e descrição detalhada das características geológicas e hidrológicas dessas áreas. Igualmente importante é a adopção da metodologia utilizada noutras regiões com contextos geológicos semelhantes, de modo a garantir mapas de favorabilidade precisos – isto facilitaria decisões estratégicas racionais que poderiam incluir a expansão urbana e a relocalização de poços. Também importante é o investimento na investigação e desenvolvimento de novas ferramentas eficazes de detecção remota e GIS para identificar áreas com elevado potencial de exploração de águas subterrâneas em termos de recursos. Mais água seria uma fonte mais fiável, promovendo uma gestão mais eficaz dos recursos hídricos, o que garante a sustentabilidade — especialmente nas regiões semiáridas onde os efeitos da seca são graves e não haveria outra escolha senão ter uma fonte melhor do que a água do rio devido à falta de fiabilidade. Além disso, é essencial desenvolver a resiliência das comunidades locais frente à variabilidade climática.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a toda comunidade acadêmica da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM) por todo apoio durante o desenvolvimento do artigo.

REFERÊNCIAS

Água no mundo. [21--]. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/cooperacao-internacional/agua-no-mundo/agua-no-mundo>. Acesso em: 5 jul. 2024.

APARECIDO AUGUSTO, Vagney; GUIMARÃES CAMPOS, José Elói. Domínios Hidrogeoclimáticos no Semiárido Brasileiro, Estado da Bahia: Unidades-Base para Gestão Sustentável das Águas Subterrâneas. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 44, 2021.

AYER, Joaquim Ernesto Bernardes; GAROFALO, Danilo Francisco Trovo; PEREIRA, Sueli Yoshinaga. Uso de geotecnologias na avaliação da favorabilidade hidrogeológica em aquíferos fraturados. **Águas Subterrâneas**, v. 31, n. 3, p. 154-167, 2017.

DA CUNHA BARRETO, Ana Beatriz; MONSORES, André Luiz Mussel; 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.

BRUNI, J. C. A água e a vida. **Tempo Social**, v. 5, n. 1/2, p. 53–65, 6 jul. 1993.

CUSTODIO, Emilio. Aquifer overexploitation: what does it mean?. **Hydrogeology journal**, v. 10, p. 254-277, 2002.

DE ALMEIDA, L. **Hidrogeologia Conceitos Básicos**. 2016. Disponível em: <https://progestao.ana.gov.br/destaque-superior/eventos/oficinas-de-intercambio-1/aguas-subterraneas-1/oficina-aguas-subterraneas-brasilia-2016/apresentacoes-ana/ana-1-hidrogeologia-leonardo-de-almeida.pdf>.

DE ALMEIDA, O. A. **Qualidade da água de irrigação**. Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura, 2010., 2010.

Distribuição da água no mundo. Disponível em: <https://brasilescola.uol.com.br/geografia/distribuicao-agua-no-mundo.htm>. Acesso em: 5 jul. 2024.

EARTHHOW. **States of Water: Gas, Liquid and Solid. Earth How**, 16 jun. 2018. Disponível em: <https://earthhow.com/states-of-water/>. Acesso em: 5 jul. 2024.

ENEM, B. DO. **Água biologia: Componente inorgânico das células dos seres vivos**. Disponível em: <https://blogdoenem.com.br/agua-biologia-enem/>. Acesso em: 5 jul. 2024.

FOSTER, Stephen; LOUCKS, Daniel P. **Non-renewable groundwater resources: a guidebook on socially-sustainable management for water-policy makers**. Paris: UNESCO, 2006. Disponível em: http://unesdoc.unesco.org/images/0014/001469/146997e.pdf. Acesso em: 7 jul. 2024.

GURITA, Rafaela Assunção. Avaliação dos fatores condicionantes da favorabilidade hidrogeológica do sistema aquífero cárstico-fissural, região de Montes Claros, MG. 2020.

GURITA, R. A. *et al*. Estimando a Potencialidade Hidrogeológica da Bacia Cárstica do Rio Vieira, Região Hidrográfica do Verde Grande, MG. **Águas Subterrâneas**, v. 36, n. 2, p. e-30156, 13 out. 2022.

LIMA, Luana Alves de et al. Favorabilidade de Aquíferos Fraturados-Bacia Hidrográfica do Rio São Domingos-Estado do Rio de Janeiro. **Anuario de Instituto de Geociencias**, v. 32, n. 2, p. 51, 2009. Acesso em: 6 jul. 2024.

LLAMAS, M. R.; CUSTODIO, E. Intensive use of groundwater: a new situation which demands proactive action. **Intensive use of groundwater: challenges and opportunities**, p. 13-31, 2003.

MAGNABOSCO, Rafael; GALVÃO, Paulo; MACIEL, Ana. MAPEAMENTO DA FAVORABILIDADE HIDROGEOLÓGICA DO AQUÍFERO CÁRSTICO DA REGIÃO URBANA DE SETE LAGOAS (MG), BRASIL. **Águas Subterrâneas**, 2019.

MANZIONE, Rodrigo Lilla. **Águas Subterrâneas**. Paco Editorial, 2015.

MARTINS, Cássio Filipe Vieira; GONÇALVES, Roger Dias. **Favorabilidade hidrogeológica em aquíferos no estado de Sergipe – Estudo de caso em Nossa Senhora do Socorro**. In: ENCONTRO DE RECURSOS HÍDRICOS EM SERGIPE, XVI, 2024, São Cristóvão. Anais [...]. São Cristóvão: Even3, 2024. p. 1. Disponível em: https://www.even3.com.br/anais/encontro-de-recursos-hidricos-em-sergipe-enrehse-420483/800725-favorabilidade-hidrogeologica-em-aquiferos-no-estado-de-sergipe--estudo-de-caso-em-nossa-senhora-do-socorro. Acesso em: 08 jul. 2024.

MAT, M. **Aquifers and Aquitards » Geology Science**. Disponível em: <https://geologyscience.com/geology-branches/hydrogeology/aquifers-and-aquitards/>. Acesso em: 7 jul. 2024.

NIEDZIELSKI MACHADO ANDREA, Francisco Augusto de Souza. **Análise da favorabilidade hidrogeológica do aquífero multicamada Taubaté na região sudoeste da bacia homônima**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: https://www.bing.com/ck/a?!&&p=a390d5ac3f751a67JmltdHM9MTcyMDM5NjgwMCZpZ3VpZD0xYjViMTQ4MC05ODRmLTZmYzYtMWNkNi0wMDM2OTk1YjZlNWMmaW5zaWQ9NTE4Mg&ptn=3&ver=2&hsh=3&fclid=1b5b1480-984f-6fc6-1cd6-0036995b6e5c&psq=AN%c3%81LISE+DA+FAVORABILIDADE+HIDROGEOL%c3%93GICA+DO+AQU%c3%8dFERO+MULTICAMADA+TAUBAT%c3%89+NA+REGI%c3%83O+SUDOESTE+DA+BACIA+HOM%c3%94NIMA&u=a1aHR0cDovL3d3dy5jb2MudWZyai5ici9wdC9kb2N1bWVudHMyL21lc3RyYWRvLzIwMTMvMjQ5Mi1mcmFuY2lzY28tYXVndXN0by1kZS1zb3V6YS1uaWVkemxlbHNraS1tYWNoYWRvLWFuZHJlYS1tZXN0cmFkby9maWxl&ntb=1. Acesso em: 8 jul. 2024.

RYE, C. et al. **2.2 Water - Biology | OpenStax**. Disponível em: <https://openstax.org/books/biology-2e/pages/2-2-water>. Acesso em: 5 jul. 2024.

SCANLON, Bridget R. et al. The food‐energy‐water nexus: Transforming science for society. **Water Resources Research**, v. 53, n. 5, p. 3550-3556, 2017.

TUINHOF, Albert; HEEDERIK, Jan Piet; TUINHOF, A. **Management of aquifer recharge and subsurface storage: making better use of our largest reservoir: seminar, Wageningen, 18-19 December 2002**. Netherlands National Committee, 2003.

Types of Aquifers. 2023. Disponível em: <https://www.thedailyeco.com/types-of-aquifers-examples-with-diagrams-423.html>. Acesso em: 7 jul. 2024.

WOESSNER, W. W.; POETER, E. P. 6 Aquifers and Aquifer Properties. 21 ago. 2020.

1.11: The Bonds in Water. Disponível em: <https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Organic_C

hemistry/Map%3A_Essential_Organic_Chemistry_(Bruice)/01%3A_Electronic_Structure_and_Covalent_Bonding/1.11%3A_The_Bonds_in_Water>. Acesso em: 5 jul. 2024.