

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE INTRÍNSECA À CONTAMINAÇÃO EM AQUÍFERO POROSO: UM ESTUDO DE CASO NA FAZENDA ÁGUA LIMPA (FAL/UNB), DISTRITO FEDERAL

Daiane Ferreira Maciel¹; Carlos Tadeu Carvalho do Nascimento²; Sergio Koide³ & Andréia de Almeida⁴

Abstract: Despite the importance and growing demand for the use and exploitation of groundwater resources, there is still a lack of hydrogeological studies regarding the protection of groundwater reserves, which is essential for establishing alternatives for the management of water resources. This study aimed to compare methods for assessing the intrinsic vulnerability to contamination in a porous aquifer at Fazenda Água Limpa (FAL/UnB). A possible alternative for monitoring groundwater resources is the application of the direct current electrical geophysical method, with the Vertical Electrical Sounding (SEV) technique, which allows identifying the soil layer where the aquifer is possibly located and estimating the natural vulnerability of the aquifer to contamination. Natural vulnerability classes were estimated using traditional methods (DRASTIC and GOD) and methods derived from applied geophysics (GLSI and S). In general, the FAL aquifer was classified as highly vulnerable by the DRASTIC, GOD, GLSI and S methods, which correlate with high resistivity values and low S values. Based on the estimate of vulnerability indices, groundwater protection or remediation measures can be guided precisely and with economic viability.

Resumo: Apesar da importância e da crescente demanda de uso e exploração dos recursos hídricos subterrâneos, ainda há um déficit de estudos hidrogeológicos em relação a proteção das reservas subterrâneas, essencial para que se estabeleça alternativas de gestão e manejo dos recursos hídricos. O presente estudo se propôs a comparar métodos de avaliação da vulnerabilidade intrínseca à contaminação em aquífero poroso na Fazenda Água Limpa (FAL/UnB). Uma possível alternativa para o monitoramento dos recursos hídricos subterrâneos é a aplicação do método geofísico elétrico de corrente contínua, com a técnica de Sondagem Elétrica Vertical (SEV) que permite identificar a camada do solo, onde possivelmente se localiza o aquífero e estimar a vulnerabilidade natural do aquífero à contaminação. Foram estimadas classes de vulnerabilidade natural a partir de métodos tradicionais (DRASTIC e GOD) e métodos derivados de geofísica aplicada (GLSI e S). De modo geral, o aquífero da FAL foi classificado com a vulnerabilidade alta pelos métodos DRASTIC, GOD, GLSI e S que se correlacionam a altos valores de resistividade e aos baixos valores de S. A partir da estimativa de índices de vulnerabilidade, medidas de proteção ou remediação das águas subterrâneas poderão ser orientadas de forma precisa e com viabilidade econômica.

Palavras-Chave – Água subterrânea; Sondagem elétrica vertical; Vulnerabilidade natural.

1. INTRODUÇÃO

Cerca de 30% do montante de água doce do planeta encontra-se na forma de água subterrânea, um percentual representativo em comparação com aquele contido em rios e lagos (0.3%) (Feitosa et al., 2008). Aproximadamente 30% da população mundial depende da água subterrânea, com mais de 70% dos recursos hídricos subterrâneos destinados ao setor agrícola (Khalilidermani et al., 2021). De

1) Faculdade UnB Planaltina, Universidade de Brasília, 73345-010 Planaltina, Brasil; daianefemaciel@gmail.com

2) Faculdade UnB Planaltina, Universidade de Brasília, 73345-010 Planaltina, Brasil; carlostadeu@unb.br

3) Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, 70910-900 Brasília, Brasil; skoide@unb.br

4) Faculdade UnB Planaltina, Universidade de Brasília, 73345-010 Planaltina, Brasil; andreia.almeida@unb.br

acordo com dados do atlas de abastecimento urbano da Agência Nacional de Água e Saneamento Básico (ANA, 2021), 40% das cidades brasileiras são abastecidas exclusivamente por água subterrânea. Aquíferos abastecem mais de 70% dos municípios em Mato Grosso do Sul (80%), Piauí (78%), Maranhão (74%), Pará (74%) e Amazonas (71%).

No Distrito Federal (DF), 16% do abastecimento público é mantido por água subterrânea (ADASA, 2021; ANA, 2021). Segundo a Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal (ADASA), a partir do ano de 2019 houve um aumento na vazão captada em relação aos anos de 2017 e 2018, devido à escassez hídrica registrada nesses dois últimos anos. Dentre as regiões administrativas do DF, em um levantamento realizado pela ADASA, o sistema Sobradinho/Planaltina possui a maior quantidade de captações subterrâneas registradas (40), seguido de São Sebastião (38), Torto/Santa Maria (25), Descoberto (24), Brazlândia (5) e Lago Norte (1) (ADASA, 2021).

Além de questões relacionadas ao aumento na demanda, aquíferos são susceptíveis à contaminação (Abdulrazzaq et al., 2020). Conforme o Zoneamento Ecológico-Econômico do Distrito Federal (2017), cerca de 58% da área do DF apresenta aquíferos com elevada vulnerabilidade natural à contaminação, especialmente nas bacias hidrográficas do Lago Paranoá, do Rio Preto e do Alto Rio São Bartolomeu (ZEE-DF, 2017). Diferentemente da vulnerabilidade integrada, que considera a existência de uma fonte de contaminação, a análise da vulnerabilidade intrínseca avalia o potencial de contaminação natural dos aquíferos em função da combinação de diferentes características fisiográficas de cada área (Zanetti, 2015; Caniani, 2015; Foster e Hirata, 1988).

Nesse sentido, mudanças na cobertura do solo podem potencializar a vulnerabilidade natural dos aquíferos por meio de alterações na estrutura do solo (Seraphim, 2018) e geração de cargas de contaminação a exemplo de efluentes domésticos dispostos em sumidouros ou fossas negras, chorume oriundo da decomposição de resíduos sólidos em lixões e cemitérios, vazamento de combustíveis, dentre outros resíduos químicos provenientes de atividades industriais e agrícolas (Campos et al., 2007). Além disso, no caso do DF, a população não abastecida pela Caesb utiliza poços individuais, construídos de modo inadequado e sem o controle de qualidade da água, e por serem rasos, muitas vezes, estão sujeitos à contaminação (ADASA, 2017).

Considerando os exemplos acima descritos, a vulnerabilidade intrínseca ou natural dos aquíferos à contaminação deve ser considerada como fator de importância no ordenamento e no manejo do uso do solo. Diferentes métodos de avaliação da vulnerabilidade natural possibilitam a delimitação de zonas com diferentes graus de vulnerabilidade à contaminação. A vulnerabilidade intrínseca que compõe o mapa de riscos à contaminação das águas subterrâneas no ZEE-DF (2017) foi estimada com base na combinação de dados de declividade, classe de solo e uso e cobertura do solo (Campos et al., 2007).

Tradicionalmente, o estudo de vulnerabilidade natural à contaminação das águas subterrâneas pode ser realizado por meio da aplicação dos métodos DRASTIC e GOD (Zanetti, 2015; Moura et. al., 2016; Giacomazzo e Almeida, 2020; Oni et al., 2017; George, 2021). Em geral, tais métodos consistem em uma análise multicritério, isto é, que consideram diferentes informações do aquífero, tais como o grau de confinamento, litologia e profundidade não saturadas, recarga e textura, topografia e condutividade hidráulica na determinação das classes de vulnerabilidade.

Apesar da importância, da crescente demanda e do potencial de impacto das atividades antrópicas na qualidade dos recursos hídricos subterrâneos, é necessário o constante estudo hidrogeológico para avaliação do potencial hídrico dos aquíferos e da necessidade de proteção das reservas subterrâneas no DF (Zoby e Duarte, 2001; Campos et al., 2007; ADASA, 2016). Contudo, há dificuldades de monitoramento direto dos recursos hídricos subterrâneos, devido ao elevado requerimento de recursos financeiros e de tempo, principalmente em locais com limitações de acesso, por exemplo, para perfuração de poços de observação.

Nesse sentido, o método geofísico elétrico de corrente contínua pode auxiliar na investigação da subsuperfície, em diferentes profundidades, a partir de medições realizadas na superfície do solo, o que permite a caracterização hidrogeológica de forma não invasiva (Braga, 2016). Mgbolu et al., (2019) utilizaram Sondagem Elétrica Vertical (SEV), técnica empregada nos levantamentos geofísicos com método elétrico de corrente contínua, para identificar aquíferos na Nigéria. Virupaksha e Lokesh (2019) estimaram parâmetros hidráulicos e a reserva de água em aquíferos a partir de dados de resistividade elétrica do solo na bacia hidrográfica de Gurpur.

Além disso, dados de resistividade elétrica do solo podem auxiliar na avaliação da vulnerabilidade intrínseca de aquíferos, a exemplo de Ikpe et al. (2022), George (2021) e Barros et al. (2021). A partir dos valores de espessura e resistividade elétrica das camadas do solo é possível estimar os parâmetros de Dar Zarrouk (Condutância longitudinal, S , e Resistência transversa, R), que também são empregados para avaliação da vulnerabilidade intrínseca dos aquíferos (Maillet, 1947; Francisco et al., 2019; Barros et al., 2021). Além disso, há métodos de determinação da vulnerabilidade natural, a exemplo do DRASTIC e GOD, que utilizam exclusivamente parâmetros geoelétricos. O índice GLSI (geoelectric layer susceptibility indexing) é um exemplo notório dessa categoria de métodos (Oni et al., 2017; George, 2020).

Diante desse contexto, considerando a importância e a dificuldade de monitoramento direto da água subterrânea, o presente estudo se popôs a comparar métodos de avaliação da vulnerabilidade intrínseca de aquífero poroso por meio de abordagens tradicionais e alternativas derivadas de geofísica aplicada, tendo como estudo de caso a Fazenda Água Limpa (FAL), no Distrito Federal.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 ÁREA DE ESTUDO

A Fazenda Água Limpa (FAL) foi definida como área de estudo (Figura 1). A FAL é uma Fazenda Experimental da UnB, com área de aproximadamente 43 km², localizada no Distrito Federal (UnB, 2009).

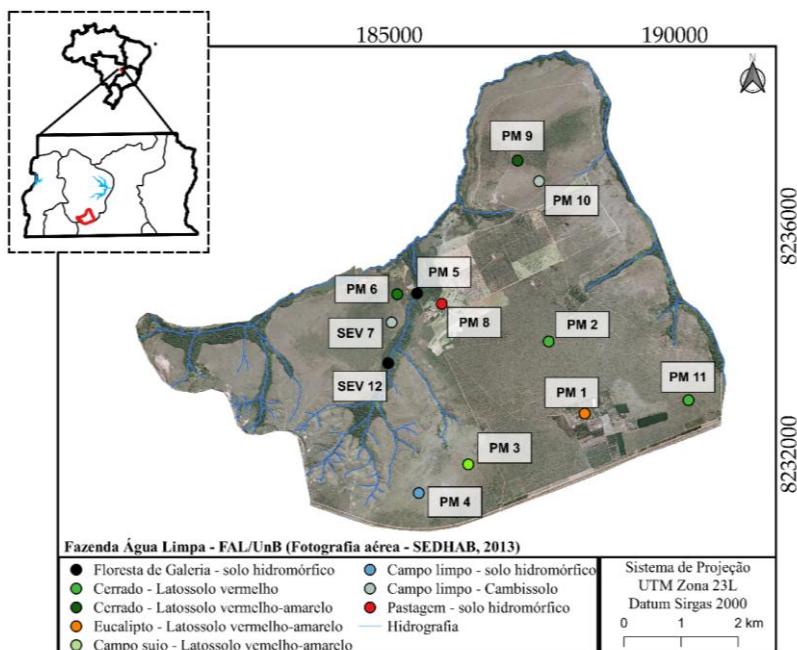


Figura 1 – Área de estudo, com indicação dos pontos de monitoramento (PM) e suas condições pedológicas (LV = Latossolo vermelho, LVA = Latossolo vermelho-amarelo, CX = Cambissolo e Hi = Gleissolo) e de uso e cobertura do solo (cerrado, campo limpo, campo sujo, pasto e eucalipto).

2.2 METODOLOGIA

Aplicou-se a técnica geofísica de Sondagem Elétrica Vertical (SEV) para a obtenção dos valores de resistividade elétrica (ρ) e espessura (h) das camadas em subsuperfície nas imediações de doze poços de monitoramento (PM) de água subterrânea no domínio aquífero poroso (Figura 1). Concomitantemente, realizou-se o monitoramento do nível da água subterrânea (NA) nos PMs. Detalhes a respeito do levantamento de dados em campo constam em Almeida et al. (2021). Dados secundários foram selecionados e convertidos em camadas raster para a análise da vulnerabilidade intrínseca do aquífero por meio da calculadora raster, com o QGIS (Tabela 1).

Tabela 1 - Dados utilizados na avaliação da vulnerabilidade intrínseca do aquífero.

Camada de entrada	Fonte de dados	Tipo de processamento
Pedologia	Vetor de solos do DF (Embrapa, 1978)	Conversão de vetor para matriz
Litologia	Vetor de hidrogeologia DF (Campos e Freitas-Silva, 1998)	Conversão de vetor para matriz
Hidrogeologia	Vetor de hidrogeologia DF (Campos e Freitas-Silva, 1998)	Conversão de vetor para matriz
Topografia	Vetor com curvas de nível do DF (Codeplan, 2013)	Elaboração do MDT e cálculo de declividade (%)
Profundidade do nível da água subterrânea	Monitoramento em campo (medição no NA)	Interpolação dos dados de campo
Resistividade elétrica do solo	Monitoramento em campo (SEV)	Interpolação dos dados de campo
Espessura das camadas do solo	Monitoramento em campo (SEV)	Interpolação dos dados de campo
Condutividade hidráulica	Monitoramento em campo (slug teste)	Interpolação dos dados de campo
Condutância longitudinal (S)	Estimativa de S a partir dos valores de resistividade elétrica e espessura das camadas da SEV	Interpolação dos dados de campo
Recarga	Estimativa da recarga com base nas medições de NA	Interpolação dos dados de campo

Na avaliação da vulnerabilidade natural dos aquíferos, adotaram-se os métodos tradicionais, DRASTIC (Aller *et al.*, 1987; Eq. 1; Tabela 3) e GOD (Foster e Hirata, 1988; Eq. 2; Tabela 2), e métodos derivados de dados geofísicos, GLSI (Oni *et al.*, 2017; Eq. 3) e condutância longitudinal (S; Maillet, 1947; Eq. 4). Para a estimativa do índice GOD, o valor da categoria foi aplicado conforme a Tabela 2. No caso do índice DRASTIC foram consideradas as camadas ponderadas (Tabela 2). Para os métodos GLSI e S, calcularam-se as Eqs. 3 e 4 considerando os valores de resistividade elétrica e espessura da camada acima do aquífero em cada PM. Os mapas de vulnerabilidade derivados dos quatro métodos foram reclassificados conforme a Tabela 4.

$$\text{DRASTIC} = \text{DrDw} + \text{RrRw} + \text{ArAw} + \text{SrSw} + \text{TrTw} + \text{IrIw} + \text{CrCw}$$

(1)

$$\text{GOD} = G \times O \times D$$

(2)

$$S = \frac{h_1}{\rho_1} + \frac{h_2}{\rho_2} + \frac{h_3}{\rho_3} + \dots + \frac{h_n}{\rho_n} \quad (3)$$

$$GLSI = \frac{((\rho_1 + h_1)/2 + (\rho_2 + h_2)/2 + (\rho_3 + h_3)/2 + \dots + (\rho_n + h_n)/2)}{N} \quad (4)$$

Tabela 2 - Valores de reclassificação do GOD.

Classe	Categoria
Grau de confinamento (G)	
Livre	1
Litologia (O)	
P1	1
P3	0.7
P4	0.4
Profundidade (D)	
0 - 1.5	1
1.5 - 4.5	0.9
4.5 - 9	0.8
9-15	0.7
15 - 20	0.6
>20	0.5

Tabela 3 - Valores de reclassificação do DRASTIC.

Classe	Categoria	Categoria ponderada
Profundidade do nível da água (D) (m): Peso = 5		
0 - 1.5	10	50
1.5 - 4.5	9	45
4.5 - 9	7	35
9 - 15	5	25
15 - 20	3	15
> 20	2	10
Recarga (R) (mm/ano): Peso = 4		
0 - 50	1	4
50 - 100	3	12
100 - 150	6	24
150 - 250	7	28
>250	9	36
Litologia (A): Peso = 3		
P1	3	9
P3	2	6
P4	1	3

Tabela 3 cont - Valores de reclassificação do DRASTIC.

Classe	Categoria	Categoria ponderada
Solo (S): Peso = 2		
1: Cambissolo	2	4
2: Solo hidromórfico	4	8
3: Latossolo vermelho	7	20
4: Latossolo vermelho-amarelo	7	20
Topografia (T) (%): Peso = 1		
0-3: plano	10	10
3-8: suave ondulado	8	8
8-20: ondulado	6	6
20-45: forte ondulado	4	4
Impacto (textura) da zona vadosa (I): Peso = 5		
1: argilosa com cascalho	1	5
2: argilosa	5	25
3: argila média (15- 35%)	10	50
Condutividade hidráulica (C) (m/dia): Peso = 3		
1.00E+00	10	30
1.00E-01	5	15
1.00E-02	3	9
1.00E-03	1	3

Tabela 4 - Valor/classe de vulnerabilidade de cada método de vulnerabilidade.

Classes DRASTIC (Cutrim e Campos, 2010)	Classes GLSI (George, 2021)	Classes S (Siemens) (Braga, 2016)	Classes GOD (George, 2021)	Classes de vulnerabilidade
< 120	< 1.0	> 3.0	< 0.1	Muito baixa
120 - 140	1.0 - 2.0	1.0 - 3.0	0.1 - 0.3	Baixa
140 - 180	2.0 - 3.0	0.3 - 1.0	0.3 - 0.5	Moderada
180 - 200	3.0 - 4.0	0.1 - 0.3	0.5 - 0.7	Alta
> 200	> 4	< 0.1	> 0.7	Muito Alta

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Por meio dos mapas resultantes dos métodos GOD, DRASTIC, S e GLSI, pode-se classificar a vulnerabilidade natural à contaminação do aquífero na FAL (Figura 2, Tabela 5). Houve prevalência de áreas com vulnerabilidade de moderada a muito alta conforme os métodos avaliados (Tabela 5). Essas classes de vulnerabilidade foram associadas principalmente ao Latossolo, predominante no sistema aquífero P1 do domínio poroso, que apresenta elevada condutividade hidráulica ($2,8 \times 10^{-4}$ a $1,7 \times 10^{-5}$ m/s), conforme Freitas-Silva e Campos (1998). Áreas indicadas com baixa vulnerabilidade ocorreram majoritariamente em cambissolo e solo hidromórfico, como parte do sistema P3 e P4 do domínio poroso, que são caracterizados pelos valores reduzidos de condutividade hidráulica.

Em áreas planas, características na área de estudo, e com solos permeáveis, a recarga é um fator importante para contaminação do aquífero (Yakoub e Azzedine, 2019). Neste caso, áreas com vulnerabilidade de moderada a alta apresentaram estimativas de recarga acima de 500 mm/ano. Pelo método GOD a maioria da área (45,546%) apresentou alta vulnerabilidade natural à contaminação, nos mesmos locais que no DRASTIC (contida em latossolo e no sistema P1 do domínio poroso). O método GOD dá maior importância às propriedades inerentes ao material litológico de acordo com a distribuição granulométrica, grau de compactação e consolidação (Oni *et al.*, 2017; George, 2021). O efeito da litologia e da espessura da camada na avaliação da vulnerabilidade do aquífero é de grande importância, pois camadas menos espessas acima do aquífero podem influenciar, facilitando o tempo de deslocamento dos contaminantes até o aquífero (Oni *et al.*, 2017).

O mapa S (condutância longitudinal) indicou que a FAL se enquadra por completo na classe de vulnerabilidade alta ($S < 0.03$), conforme valores de S descritos por Braga (2016). Desse modo, a FAL apresenta vulnerabilidade alta quando se consideram os valores de S e os padrões definidos na literatura. Assim, os valores extremamente reduzidos de S (entre 0.0002 e 0.007 Siemens) foram reclassificados para demonstrar variações de áreas que são ainda mais vulneráveis na área a partir das estimativas de S. Silva (2019), em sua análise do grau de vulnerabilidade do aquífero Barreiras no Rio Grande do Norte, atribuiu valores de S entre 0,0091 e 0,0140 Siemens para áreas com elevada vulnerabilidade à contaminação de aquíferos.

Em comparação com Silva (2019), a FAL encontra-se em área com vulnerabilidade baixa a partir da análise de S. Os menores valores de condutância longitudinal foram estimados nos PMs com menor espessura e maior resistividade elétrica das camadas não saturadas, como no PM4, que apresentou h equivalente a 3,00 m. Assim, a FAL apresenta camada não saturada pouco espessa, o que pode diminuir a capacidade de proteção do aquífero. O mapa GLSI (Figura 2, Tabela 5), estimado para cada PM e posteriormente interpolado, indicou que 27,98% da FAL enquadra-se como área de alta vulnerabilidade, condizente com os demais métodos.

De modo geral, a análise visual indicou correspondência entre as classes de vulnerabilidade DRASTIC e GOD. A exemplo disso, Oliveira (2019) realizou a avaliação de vulnerabilidade natural de aquíferos e de análises espaciais sobre os postos de abastecimento de combustíveis e os poços de captação de água subterrânea no Conjunto Urbanístico de Brasília (CUB), por meio do DRASTIC e GOD. E constatou-se que mesmo com o GOD considerando menos parâmetros é possível de determinar a vulnerabilidade à contaminação de maneira significativa. Na comparação entre os métodos tradicionais e o método derivado do levantamento geofísico, verificou-se aproximação com o mapeamento resultante do GLSI. George (2021) aponta em seu estudo na Nigéria, a eficácia do GLSI como sendo uma técnica significativa para representação de áreas suscetíveis à contaminação, com o foco na espessura da camada sobrejacente ao aquífero.

Tabela 5 - Valor/classe de vulnerabilidade de cada método de vulnerabilidade.

Área (%) atribuída à cada classe de vulnerabilidade com relação à área total da FAL (44,31 Km ²)				
Classes	DRASTIC	GOD	S	GLSI
Muito baixa	19,934	0,000	0,425	0,017
Baixa	20,902	12,639	73,380	24,018
Moderada	33,465	30,592	10,348	22,708
Alta	25,551	45,546	6,056	27,984
Muito Alta	0,001	11,129	2,350	25,291

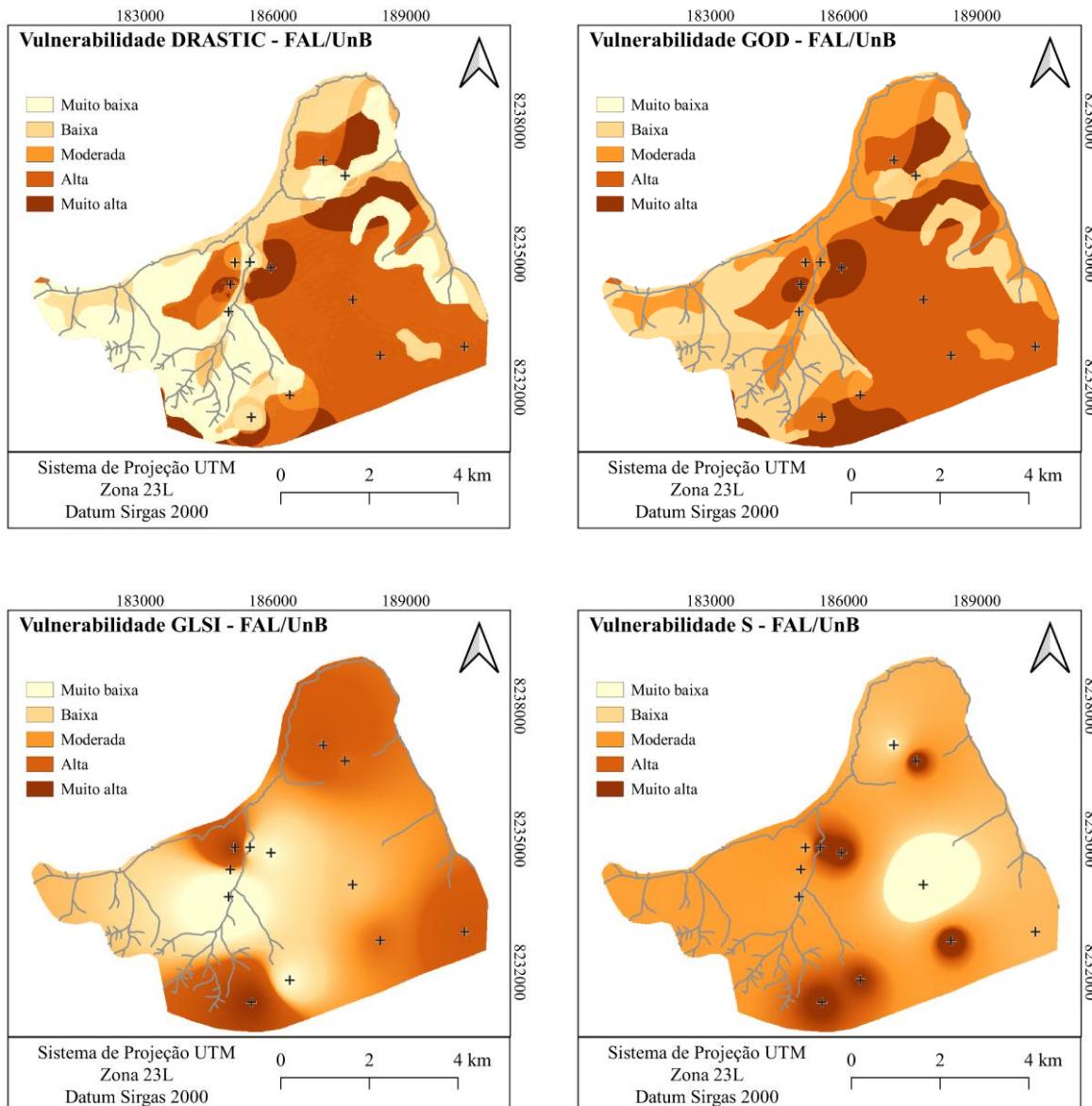


Figura 2 – Classificação da vulnerabilidade intrínseca do aquífero na FAL por meio métodos avaliados.

4. CONCLUSÃO

O estudo possibilitou a comparação entre métodos tradicionalmente utilizados para avaliação da vulnerabilidade intrínseca (DRASTIC e GOD) com métodos derivados de geofísica aplicada, mas especificamente derivados de medidas de resistividade elétrica e espessura das camadas do solo (GLSI e S). Pode-se avaliar a vulnerabilidade intrínseca de aquíferos livres granulares, a partir da ponderação e integração de parâmetros geofísicos, sendo um fator interessante considerando o possível cenário de escassez de dados de campo. Mesmo sem perfuração de poços e levantamento de solos, foi possível estabelecer uma possível classificação de vulnerabilidade para a FAL com resultados visualmente condizentes com os métodos que não utilizaram a geofísica (DRASTIC e GOD).

A estimativa da vulnerabilidade natural da área seguindo uma classificação é essencial para o gerenciamento dos recursos hídricos subterrâneos. Entretanto, os dados necessários para a realização dos métodos de análise da vulnerabilidade podem não estar disponíveis. Diante disso, a utilização do método elétrico de corrente contínua, resultou em uma possível para essa avaliação. Para os métodos de vulnerabilidade que utilizaram os dados da SEV (Condutância longitudinal e GLSI) foi possível identificar, na área de ocorrência do aquífero livre, zonas com diferentes índices de vulnerabilidade, mas devido os poços de monitoramento estarem mais concentrados, o nível de precisão dos dados possa ser menor. Para uma avaliação acurada seria necessário aprimorar a representativa espacial do levantamento geofísico

Os dados organizados no SIG e os modelos resultantes desse processo são capazes de gerar de forma contínua e aprimorada simulações de possíveis cenários e aperfeiçoamento das ações de gestão ambiental. Visto que a capacidade de proteção da FAL foi estabelecida como muito baixa e com classe alta de vulnerabilidade. Por isso, o exercício de atividades na FAL deve ser planejado e gerenciado com muita cautela pelos gestores públicos, visto que a alta vulnerabilidade do aquífero impõe muitas restrições quanto ao uso e ocupação do solo. E com a avaliação ambiental preliminar da área é possível que este método possa auxiliar no planejamento e gerenciamento do uso e exploração das águas subterrâneas por meio da análise da vulnerabilidade relativa de áreas de contaminação e da potencialidade de geração de água.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDULRAZZAQ, Z.T.; OKECHUKWU, E.A.; NADIA, A.A.; SUNDAY, E. E. Identification of potential groundwater locations using geophysical data and fuzzy gamma operator model in Imo, Southeastern Nigeria. *Applied Water Science*, 2020. 10:188 <https://doi.org/10.1007/s13201-020-01264-6>.
- ADASA (Agência Reguladora de Águas e Saneamento do Distrito Federal). **Avaliação de aquíferos favoráveis para complementação do abastecimento de água no Distrito Federal e locação de regiões de poços tubulares profundos: regiões atendidas e não atendidas pelo sistema integrado Descoberto – Santa Maria/ Torto.** Consultoria Técnica. Relatório final integrado, 2018. Brasília: ADASA, 105 p.
- ADASA (Agência Reguladora de Águas e Saneamento do Distrito Federal). **Diagnóstico e Proposta de Gestão das Reservas e Disponibilidades das Águas Subterrâneas no Distrito Federal, Considerando as Diferentes Regiões Administrativas e a Situação Atual de Uso e Ocupação do Solo**, 2016. Brasília: ADASA, 99 p.
- ADASA (Agência Reguladora de Águas e Saneamento do Distrito Federal). **Plano Distrital de Saneamento Básico - relatório síntese.** 2017. Disponível em: http://www.adasa.df.gov.br/images/Produtos-PDSB/Produto_7/1_PDSB_DF_subproduto_7.2_1017_VF_Sintese.pdf. Acesso em: mar. 2020.
- ADASA (Agência Reguladora de Águas e Saneamento do Distrito Federal). Relatório de Fiscalização - RVF/COFA/013/2021. **Relatório de Monitoramento Regular das Vazões Captadas de Água Para Abastecimento.** Brasília: ADASA, 2 -3 p. 2021.
- BRAGA, A.C.O. Estimativa da vulnerabilidade natural de aquíferos: uma contribuição a partir da resistividade e condutância longitudinal. *Rev. Bras. Geof.* 26 (1). Mar, 2008. DOI_ <https://doi.org/10.1590/S0102-261X2008000100005>.
- BRAGA, A.C.O. **Geofísica aplicada: Métodos geoelétricos em hidrogeologia.** São Paulo: Oficina de textos. 159 p, 2016.
- CAMPOS, J.E.G.; GASPAR, M. T. P.; GONÇALVES, T. D. Relatório de Consultoria Técnica. **Gestão de recursos hídricos subterrâneos no Distrito Federal: diretrizes, legislação, critérios técnicos, sistema de informação geográfica e operacionalização.** Brasília: BNWPP/ IBRD/ ADASA, 2007.
- CANIANI, D.; LIOI, D.S.; IGNATZIO M.; MANCINI, I.M.; MAIS, S. Hierarchical classification of groundwater pollution risk of contaminated sites using Fuzzy Logic: A Case study in the Basilicata Region (Italy). *Water*, v. 7, p. 2013-2036, 2015.
- DE ALMEIDA, A.; MACIEL, D.F; SOUSA, K.F.; NASCIMENTO, C.T.C.; KOIDE, S. Vertical Electrical Sounding (VES) for Estimation of Hydraulic Parameters in the Porous Aquifer. *Water* 2021, 13, 170. <https://doi.org/10.3390/w13020170>.
- FEITOSA, F.A.C.; FILHO, J.M.; FEITOSA, E.C.; DEMETRIO, J.G.A. **Hidrogeologia: conceitos e aplicações.** 3. Ed. Ver. E ampl. – Rio de Janeiro: CPRM: LABHID, 2008. 812 p.

- FOSTER, S.; HIRATA, R. **Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data.** Lima: WHO/PAHO/HPECEPIS, 1988. p. 81.
- GEORGE, N.J. Integrating hydrogeological and second-order geo-electric indices in groundwater vulnerability mapping: A case study of aluvial environments. *Applied Water Science* (2021) 11:123. <https://doi.org/10.1007/s13201-021-01437-x>.
- GIACOMAZZO, A.P.; ALMEIDA, W.S. Estudo do potencial de contaminação do Aterro Controlado do Jóquei Clube, Distrito Federal. Artigo Técnico. **Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental – ABES. Dezembro**, 2020. <https://doi.org/10.1590/S1413-4152202020180223>.
- KHALILIDERMANI, M.; KNEZ, D.; ZAMANI, M.A.M. Empirical Correlations between the Hydraulic Properties Obtained from the Geoelectrical Methods and Water Well Data of Arak Aquifer. *Energies* 2021, 14, 5415. <https://doi.org/10.3390/en14175415>.
- MAILLET, R. The fundamental equations of electrical prospecting, *Geophysics* I2, 529-556, 1947.
- MGBOLU, C.C.; OBIADI, I.I.; OBIADI, C.M.; OKOLO, C.M.; IRUMHE, P.E. Integrated groundwater potentials studies, aquifer hydraulic characterisation and vulnerability investigations of parts of Ndokwa, Niger Delta Basin, Nigeria. Department of Geological Sciences, Nnamdi Azikiwe University, Awka, Nigeria. *Solid Earth Sciences*, 2019. DOI <https://doi.org/10.1016/j.sesci.2019.06.002>.
- MOURA, P.; SABADIA, J.A.B.; CAVALCANTE, I.N. Mapeamento de vulnerabilidade dos aquíferos dunas, barreiras e fissural na porção norte do complexo industrial e portuário do Pecém, estado do Ceará. São Paulo, UNESP, **Geociências**, v. 35, n. 1, p.77-89, 2016.
- ONI T.E; OMOSUYI G.O; AKINLALU A.A. Groundwater vulnerability assessment using hydrogeologic and geoelectric layer susceptibility indexing at Igbara Oke, Southwestern Nigeria, 2017. *NRIAG J Astron Geophys* 6(2):452–458. DOI <https://doi.org/10.1016/j.nrjag.2017.04.009>.
- SERAPHIM, A.P.A.C.C. **Relações entre as áreas de recarga dos aquíferos e áreas destinadas à urbanização: estudo dos padrões de ocupação do solo da unidade hidrográfica do Lago Paranoá-DF.** TD - n. 55 (2018). Brasília: Companhia de Planejamento do Distrito Federal, 2018.
- ZANETTI, N. Estimativa da vulnerabilidade natural do aquífero livre no município de Rio Claro/SP. **Águas Subterrâneas**, 26, 2015.
- ZARROCA, M; LINARES, R.; RODELLAS, V.; GARCIA-ORELLANA, J.; ROQUÉ, C.; BACH, J.; MASQUÉ, P. Delineating coastal groundwater discharge processes in a wetland area by means of electrical resistivity imaging, 224Ra and 222Rn. *Hydrological Processes*, v. 28, p. 2382 – 2395, 2014.
- ZEE-DF (Zoneamento Ecológico-Econômico do Distrito Federal). Caderno Técnico. **Matriz Ecológica**. Brasília, 2017. Disponível: <https://www.zee.df.gov.br/>, acesso em 09 de março de 2022.
- ZOBY, J.L.G.; DUARTE, U. Caracterização hidrogeológica da bacia do Ribeirão Sobradinho – Brasília (DF). **Revista do Instituto de Geociências**, USP, v. 1, p. 79-99, 2001.