



Alerta: Os artigos publicados nesta seção não são avaliados por pares e não são indexados. A intenção da seção ECNT é prover um espaço para divulgação de dados e estudos de interesse local, sem caráter científico. Sendo assim, a Revista Águas Subterrâneas não se responsabiliza pelo conteúdo publicado.

Disclaimer: Articles published in this section are not peer-reviewed and are not indexed. The intention of the ECNT section is to provide a space for the dissemination of data and studies of local interest, with no scientific character. Therefore, Revista Águas Subterrâneas is not responsible for this content.

Vulnerabilidade dos Aquíferos do Município de Salvador, Bahia, Brasil, utilizando o Método GOD

Vulnerability of Aquifers in the Municipality of Salvador, Bahia, Brazil, using the GOD Method

Jorge Haroldo de Souza Marques¹; Iara Brandão de Oliveira² ✉

¹ Universidade Federal da Bahia, Salvador, Bahia.

² Universidade Federal da Bahia, Salvador, Bahia.

✉ jmarques@ufba.br, oliveira@ufba.br,

Resumo

Este trabalho investigou a vulnerabilidade dos aquíferos do município de Salvador, Bahia, Brasil, um sistema aquífero fissural nos domínios do Complexo Cristalino, e, granular, no domínio das rochas sedimentares. Esse sistema aquífero apresenta-se, em geral, livre e pouco profundo, com superfície piezométrica em torno de 6m, e zona não saturada dominada por materiais argilo-arenos-siltosos e, eventualmente, arenosos finos. Utilizou-se a metodologia GOD para cálculo da vulnerabilidade intrínseca do aquífero, através da avaliação numérica dos parâmetros hidrogeológicos do sítio: G (tipo de aquífero), O (tipo de solo), D (profundidade até o aquífero), todos obtidos com base em interpretação das fichas de perfuração de poços tubulares dos bancos de dados da CERB e da CPRM/SIAGAS, e de alguns poços de pesquisa, perfurados até o ano de 2006. A metodologia GOD revelou que a vulnerabilidade natural dos aquíferos da cidade de Salvador é baixa à insignificante nos trechos mais argilosos e elevados; e, alta à extrema, nos trechos mais arenosos que ocorrem nos vales e baixadas. O mapa das classes de vulnerabilidade revelaram os trechos com potencial de água subterrânea não potável, devido a risco de contaminação por atividades antrópicas nelas instaladas.

Abstract

This work investigated the vulnerability of aquifers in the municipality of Salvador (Bahia, Brazil), a fissural aquifer system on the crystalline complex domains, as well as granular, on sedimentary rocks. This aquifer system is generally free and shallow, with a piezometric surface around 6m, and unsaturated zone dominated by clay-sandy-silty and eventually fine sandy materials. The GOD methodology was used to calculate the intrinsic vulnerability of the aquifer establishing numerical values for the site hydrogeological parameters: G (aquifer type), O (soil type), D (depth to aquifer), obtained from the field sheet for the tubular wells drilled until 2006, from CERB and CPRM / SIAGAS databases, and some research wells. The GOD methodology revealed that the natural vulnerability of the city of Salvador aquifers is low to insignificant in the more clayey and higher areas; and high to extreme in the sandy areas that occur in the valleys and lowlands. The map of the vulnerability classes revealed the areas with potential for non-potable groundwater, due to the risk of contamination by anthropogenic activities installed upon them.

DOI: <https://doi.org/10.14295/ras.v34i1.29767>

Palavras-chave:

Vulnerabilidade de aquíferos.
Método GOD.
Município de Salvador.
Estado da Bahia, Brasil

Keywords

Aquifer Vulnerability.
GOD Method.
Salvador City.
State of Bahia, Brazil.

1. INTRODUÇÃO

O município de Salvador já foi conhecido como a “cidade das mil fontes”, pela sua riqueza na produção de água potável de origem subterrânea, entretanto, muitas das fontes originais da cidade desapareceram e as que ainda restam estão em total processo de abandono (Araújo, 2012).

Segundo Nascimento (2002), como uma parcela das águas subterrâneas do município de Salvador é acessível através de poços rasos ou cacimbas escavadas manualmente, famílias de baixa renda que habitam os vales e baixadas costumam utilizá-las em estado bruto para suas necessidades básicas. Também os mananciais subterrâneos representam fonte alternativa de abastecimento nas olericulturas dos vales e em chácaras e casas de veraneio, devido ao fornecimento irregular da água.

Nascimento (2008) estima que cerca de 5% do total da demanda de água potável do município de Salvador vem de fontes subterrâneas. Poços tubulares integram o sistema Solução Alternativa Coletiva - SAC, nos 14 Distritos Sanitários do município de Salvador, cujas águas têm qualidade monitorada pela Vigilância Sanitária de Salvador – VISAMB, (Gois et al. 2012).

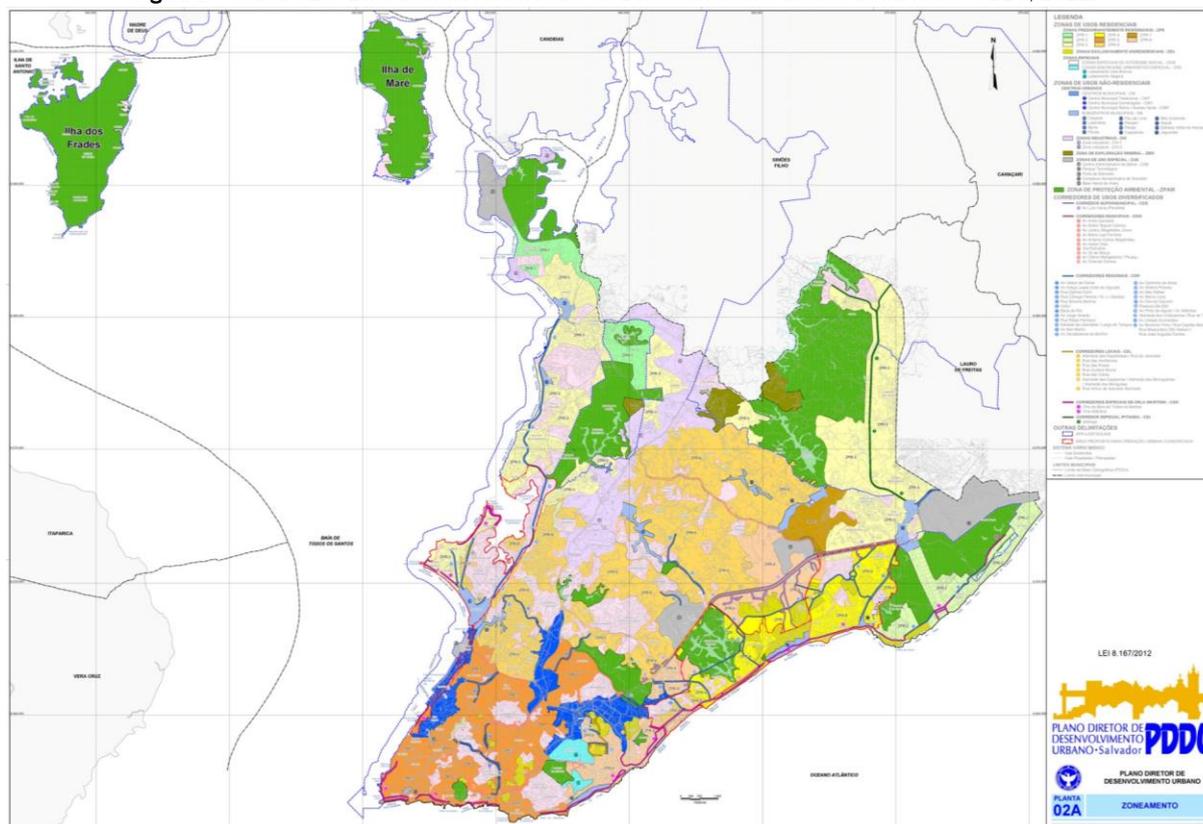
Tendo em vista o significativo uso da água subterrânea do município de Salvador, este estudo mapeou a vulnerabilidade de seus aquíferos, utilizando a metodologia GOD, visando identificar os trechos com risco de contaminação e de fornecimento de água contaminada aos usuários.

2. ÁREA DE ESTUDO

O Município de Salvador está localizado no Recôncavo Baiano; entre o Trópico de Capricórnio e a Linha do Equador e entre as coordenadas 08° 30' a 18° 30' de Latitude Sul e 37° 30' a 46° 30' de Longitude Oeste. O clima é Tropical Chuvoso de Floresta, do tipo Af, segundo a classificação de Köppen, e úmido (B2rÁá), segundo a classificação de Thornthwaite e Matther (SEI, 1999).

A Figura 1 mostra o ordenamento do uso e da ocupação do solo no Município de Salvador, sancionado pela Lei Nº 8.167/2012.

Figura 1 – Planta 02A - Zoneamento. Fonte: Plano de Desenvolvimento Urbano de Salvador - PDDU, 2011.



A geometria territorial do município de Salvador, em formato aproximadamente triangular, forçou o estabelecimento de uma ocupação urbana expandindo-se nas direções norte e nordeste até o limite municipal norte. A ocupação se deu de forma desestruturada, com os bairros expandindo-se sobre os espigões topográficos (LIMA, 1995). Em geral, as cumeadas apresentam edificações da classe média a alta, e as encostas e fundos de vales a ocupação desordenada pela população de baixa renda. Nessa última ocupação, técnicas construtivas precárias, redução da cobertura vegetal e impermeabilização das encostas íngremes, levam à concentração e aceleração do escoamento superficial das descargas pluviais, com reflexos nos processos erosivos, e desequilíbrio ambiental.

Segundo o Censo (IBGE 2010) referente ao saneamento básico da cidade do Salvador, 99% da população tem acesso à distribuição de água potável, mas apenas 85% dos domicílios participam da rede de esgotamento sanitário. O restante da população utiliza fossas sépticas ou não possuem instalações sanitárias. Considerando a localização predominante das edificações de baixa renda nas encostas e fundos de vales, o não atendimento pela rede geral de esgotamento sanitário facilita o lançamento de águas servidas, in natura, no solo e subsolo das encostas, contribuindo para desestabilizá-las e/ou contaminar os aquíferos.

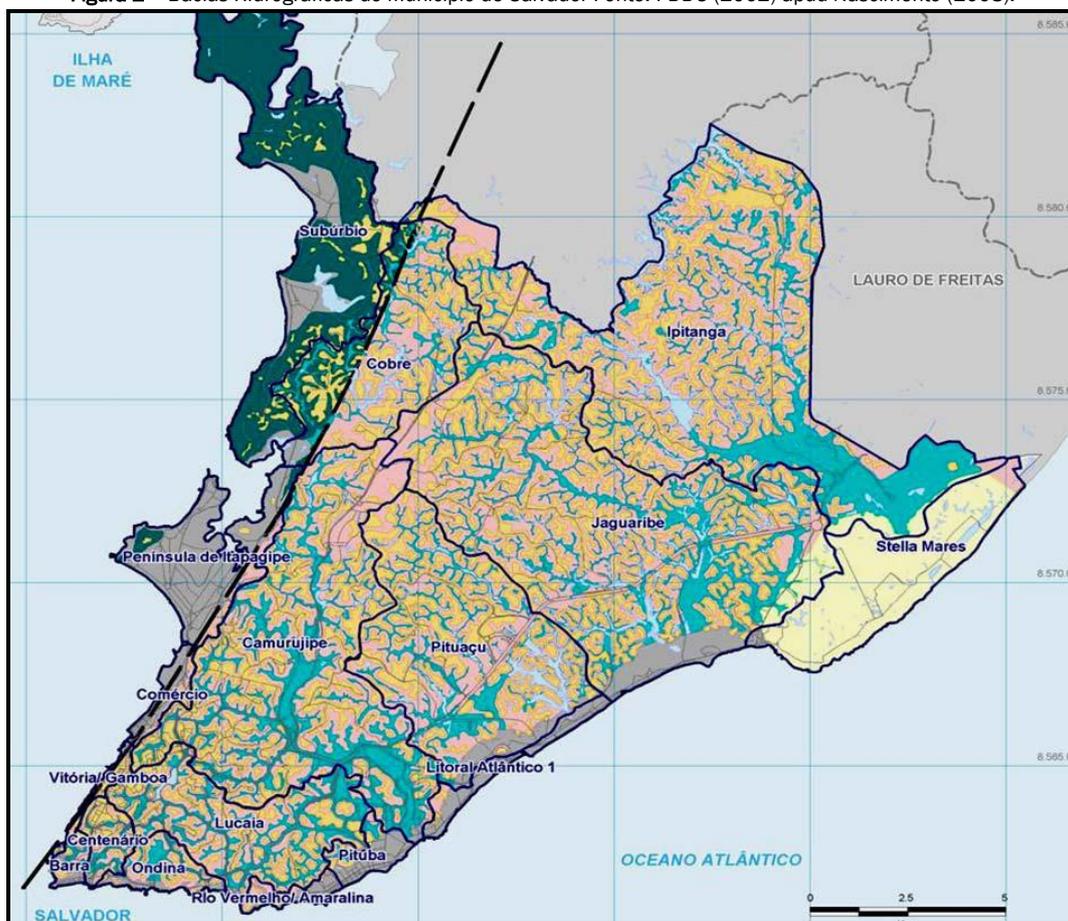
Com relação à disposição dos resíduos sólidos urbanos, embora Salvador conte com o Aterro Metropolitano Centro - AMC, em operação desde 1997, é frequente encontrar-se lixo disposto nas ruas, acessível à pessoas, roedores e insetos, enquanto aguardam recolhimento pelo sistema de coleta. Assim, em períodos chuvosos, existe risco real de contaminação das águas pluviais que fluem para os mananciais superficiais posicionados nos vales, se infiltrando no subsolo e alcançando os aquíferos da cidade.

3. HIDROLOGIA SUPERFICIAL DO MUNICÍPIO DE SALVADOR

As maiores e principais bacias hidrográficas da porção continental do município de Salvador são: Camarujipe (52km²), Cobre (17km²), Ipitanga (59km²), Jaguaribe (58km²), Lucaia (18km²) e rio das Pedras/Pituaçu, com 28km². O sistema de drenagem é dendrítico, tendo as suas nascentes situadas no planalto costeiro dissecado, com fluxo no sentido do Oceano Atlântico, exceto as águas da bacia do Cobre, orientadas para a Baía de Todos os Santos (Nascimento, 2008).

As bacias hidrográficas do município estão dispostas aproximadamente perpendiculares ao sentido da expansão urbana, agravando e ampliando o contato dos corpos d'água com os esgotos. A Figura 2 apresenta as bacias hidrográficas do Município de Salvador, demarcadas no PDDU (2002).

Figura 2 – Bacias Hidrográficas do Município de Salvador Fonte: PDDU (2002) apud Nascimento (2008).



4. GEOLOGIA DO MUNICÍPIO DE SALVADOR

O Município de Salvador apresenta dois domínios geomorfológicos distintos separados pela falha geológica de Salvador. A cidade alta situa-se sobre o Alto Cristalino, formado por rochas metamórficas do Pré-Cambriano que integram o domínio geotectônico Salvador-Esplanada (DNPM, 1992). É constituído por granulitos, anfíbolitos, granodioritos e granitos. Em Salvador, o domínio pÉ corresponde a 80% da área total do município (NASCIMENTO, 2008) e, em geral, apresenta-se em superfície profundamente alterado, com a decomposição favorecida pelas águas pluviais, formando um manto regolítico predominantemente argilo-arenoso, com espessuras relativamente elevadas, com profundidades superiores a 30m, segundo Ribeiro (1991). O sistema de fraturas desenvolvido no pÉ serve como canal de percolação das águas, facilitando os processos erosivos que dão origem aos vales, depressões e a rede natural de drenagem fluvial da cidade. A cidade baixa ergue-se sobre rochas da Bacia Sedimentar do Recôncavo, pertencentes ao Grupo Ilhas, do Cretáceo Inferior. Os terrenos do Grupo Ilhas aparecem, tanto bordejando a Baía de Todos os Santos, como nos afloramentos das ilhas situadas nesta Baía, e também na região da cidade baixa. São sedimentos pouco litificados, variando granulometricamente entre argila, silte e areias.

Esses dois domínios geológicos eventualmente encontram-se sotopostos a sedimentos continentais pouco consolidados da Formação Barreiras, de idade Plio-Pleistocênica, e sedimentos não consolidados, continentais e marinhos da margem costeira atlântica, datados do Quaternário. A Formação Barreiras pode ser observada em inúmeras cascalheiras, em áreas de lavra e nos cortes de entrada, apresentando-se com pouca espessura (5 - 10m), podendo alcançar, eventualmente, mais de 30m. Os solos nesta formação são areno-argilosos, avermelhados ou amarelados, com características geotécnicas equivalentes as do solo do embasamento cristalino (Menezes 1978). Os sedimentos quaternários se apresentam em ocorrências contínuas ou descontínuas dispostos sobre os domínios do Complexo Cristalino, do Grupo Ilhas, e, eventualmente, na costa da Baía de Todos os Santos e em suas ilhas. São sedimentos fluviais e costeiros, representados por dunas, depósitos flúvio-lagunares, terraços arenosos, pântanos em mangues atuais, recifes de corais e de algas coralinas, terraços arenosos deixados acima do nível atual do mar, e depósitos de leques aluviais coalescentes (DNPM, 1983).

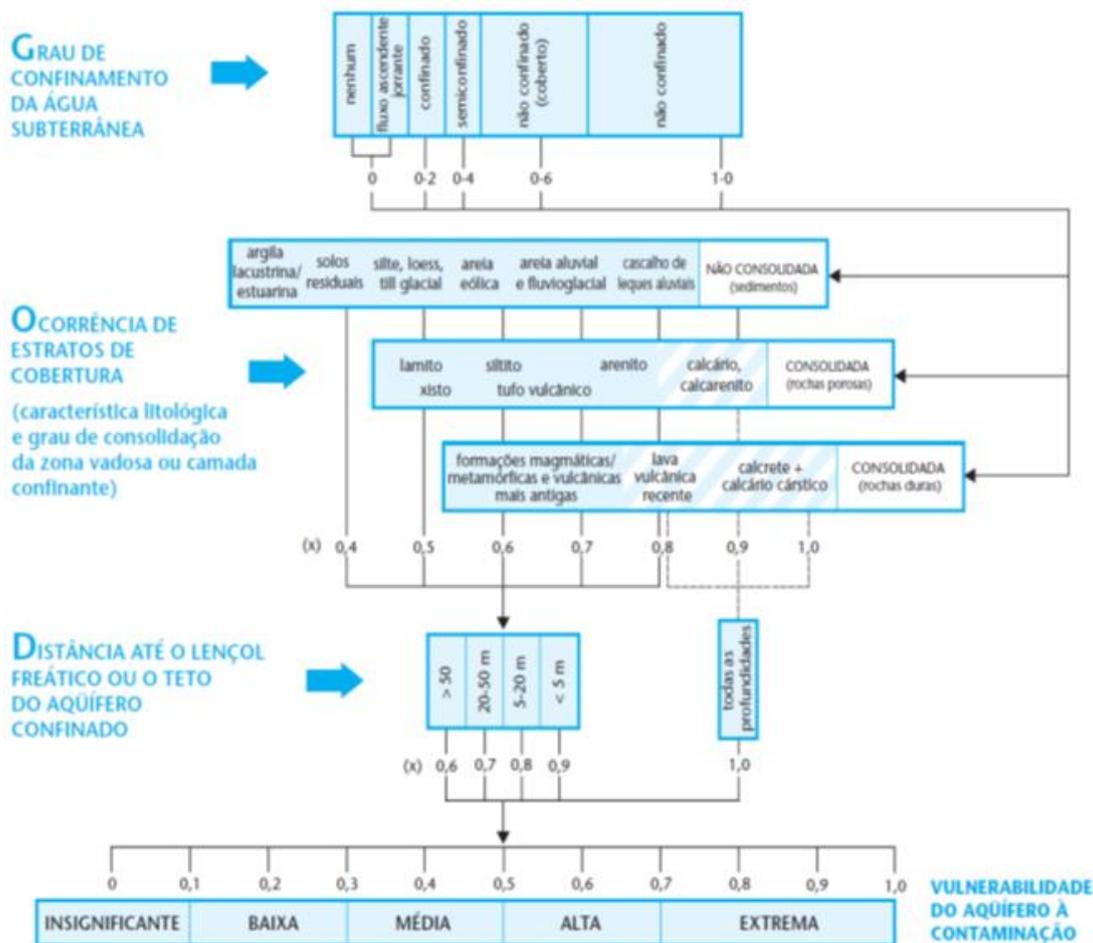
5. HIDROGEOLOGIA DO MUNICÍPIO DE SALVADOR

Os sistemas aquíferos de Salvador são hidrogeologicamente distintos, a saber: aquífero fissural (rochas cristalinas) e aquífero granular (rochas sedimentares). O aquífero fissural ou fraturado ocorre em litotipos do embasamento cristalino, onde as águas encontram-se armazenadas em fraturas ou fissuras (Lima, 1999). Os aquíferos granulares ocorrem nos sedimentos cretáceos do Grupo Ilhas; nos sedimentos terciários e nos quaternários, comumente depositados sobre planícies e vales. Encontram-se também agrupados nesta unidade, os aquíferos porosos formados pelo manto de decomposição das rochas cristalinas e pela zona-interface entre a rocha sã e o regolito. Este último aparece em vários relatórios de poços, constituindo uma via permeável para o fluxo freático (Lima, 1995). O motivo de agrupá-los nesta unidade decorre da dificuldade em recolher informações hidrogeológicas específicas destes aquíferos, ou seja, apesar deles aparecerem distinguidos nos referidos relatórios (de perfuração dos poços tubulares analisados), os dados hidrogeológicos anotados correspondem ao conjunto das zonas produtoras do perfil. Ressalva-se que, para o manto de decomposição, devido a sua natureza argilosa, há dúvidas quanto ao seu comportamento como aquífero livre. Estes aquíferos estão sendo recarregados continuamente por águas meteóricas.

6. VULNERABILIDADE DE AQUÍFEROS

Existem vários métodos para avaliação da vulnerabilidade das águas subterrâneas à poluição. Por simplicidade, este trabalho utilizou a metodologia GOD (Foster e Hirata 1988). O método exige três parâmetros: G (grau de confinamento do aquífero); O (grau de consolidação da zona vadosa) e D (profundidade do nível d'água de um aquífero freático, ou profundidade do topo de um aquífero confinado); todos os três relacionados com a capacidade intrínseca do ambiente de atenuar a passagem de poluentes pela zona vadosa. A Figura 3 apresenta os parâmetros e a escala de valores adotados para avaliação do índice GOD de vulnerabilidade do aquífero, segundo Foster et al. (2006).

Figura 3 – Sistema Para Avaliação do Índice de Vulnerabilidade do Aquífero. Fonte: Foster et al. (2006)



Segundo Hirata (2001) o conceito de vulnerabilidade de aquíferos foi inicialmente utilizado por Le Grand, nos EUA, e Albinet & Margat, na França, nos anos 1960 e 1970. Em 1987, a conferência internacional realizada nos Países Baixos propôs a definição de vulnerabilidade de aquíferos como a sensibilidade das águas subterrâneas a uma carga poluente, função apenas das características intrínsecas do aquífero (Duijvenbooden & Waegeningh, 1987). Essa proposição foi adotada por vários autores (Foster e Hirata 1988; Foster 1993; Monteiro 2006; Bovolato 2005; Leite 2006; e Feitosa et al. 2008).

Hirata (2001) ressalta que devido à complexidade de um meio hidrogeológico, os métodos de vulnerabilidade dificilmente classificam os aquíferos de forma absoluta. À despeito dessa limitação, vários países utilizam para a proteção das águas subterrâneas, basicamente, a delimitação de perímetros de proteção ao redor de poços e fontes, e os mapas de vulnerabilidade à poluição de aquíferos (Hirata et al. 1991; Barboza et al. 2007; Afonso et al. 2008; Almarsi 2008; Awawdeh e Nawafleh 2008; Cutrim e Campos, 2010; Muradás et al. 2010). A literatura reporta muitas experiências de aplicação da metodologia GOD. Seguem alguns registros dos últimos 25 anos, da avaliação da vulnerabilidade dos seguintes aquíferos: Aquíferos da Região Metropolitana do Recife - PE (CPRM 2001). Região aquífera de Soledade-RS (Camponogara et al. 2004). Aquíferos na região de Araguaína - TO (Bovolato 2005). Águas subterrâneas da Bacia Sedimentar do Araripe - CE (Tavares et al 2009). Aquíferos no Alto Aguapeí e Alto Peixe, SP (Monteiro e Peixoto 2013). Águas subterrâneas em Humaitá - AM (Duarte et al. 2016). Aquíferos do quadrilátero ferrífero - MG (Sabadini et al. 2017). Águas subterrâneas na região semiárida da Bahia, município de Tucano (Nascimento et al. 2019).

O trabalho desses autores conduziram às seguintes conclusões à respeito do método GOD: a) permite visualizar as diferentes classes de vulnerabilidade dos aquíferos; b) o mapa de vulnerabilidade é importante para diagnosticar as diferentes suscetibilidades das áreas à poluição; e c) o método é uma ferramenta útil para o planejamento do uso e ocupação do solo.

7. APLICAÇÃO DO MÉTODO GOD AOS AQUÍFEROS DE SALVADOR E RESULTADOS

Os dados necessários foram coletados nas fichas de perfuração dos poços tubulares da cidade de Salvador, até o ano de 2006, constantes nos bancos de dados da Companhia de Engenharia Ambiental e Recursos Hídricos da Bahia - CERB e da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais/Sistema de Informações Sobre Águas Subterrâneas - CPRM/SIAGAS, e em relatórios de poços de pesquisa de Cerqueira Neto (1983).

Feita a análise de consistência dos dados e a seleção dos poços, vários destes poços tiveram de ser georreferenciados in loco com a utilização de GPS. Outros foram georreferenciados utilizando mapas digitais da Conder (2007), Earth (2007) e Wikimapia (2007).

O Quadro 1 apresenta a valoração do parâmetro G (grau de confinamento) adotada neste trabalho, adaptado da primeira escala da Figura 3 de Foster et al. (2006). Foram feitas alterações na valoração da vulnerabilidade dos aquíferos, com valores mais restritivos, por se tratar de zona urbana.

Quadro 1 – Valoração do Grau de Confinamento. Fonte: Autor, adaptado de Foster et al. (2006).

| GRAU DE CONFINAMENTO HIDRÁULICO | Nenhum (não há água subterrânea) | Surgente | Confinado | Semi-Confinado | Livre, com cobertura | Livre (Superficial ou subsuperficial) |
|---------------------------------|----------------------------------|----------|-----------|----------------|----------------------|---------------------------------------|
| Valoração | 0 | | 0,2 | 0,5 | 0,8 | 1,0 |

Segundo o Quadro 1, observa-se que o valor 0 (zero) corresponde aos locais sem água subterrânea ou aquífero surgente (não verificado em Salvador); e o valor 0,8 corresponde a aquífero livre, com zona vadosa igual ou superior a 3m de espessura. Esta situação é frequente nos relatórios de perfuração, predominando nas regiões medianamente elevadas ou elevadas do relevo, correspondentes as meia-encostas, morros e altiplanos. O valor 1,0 corresponde a aquífero livre, com zona vadosa inferior a 3m de espessura, considerado neste trabalho como superficial ou aquíferos sem cobertura. Esta situação é também comum em trechos com relevo mais baixo, correspondentes aos vales e baixadas da costa oriental da cidade, em trechos da costa ocidental e algumas regiões deprimidas, disseminadas na área de estudo.

O Quadro 2 apresenta a valoração do parâmetro O (tipo litológico) adotada neste trabalho, adaptado da segunda escala da Figura 3, para adequar-se aos litotipos que ocorrem no Município de Salvador.

Quadro 2 – Valoração do Grau de Cobertura. Fonte: Autor, adaptado de Foster et al. (2006).

| ROCHA NÃO CONSOLIDADA | Argilas | Solos residuais, argilas siltosa e/ou arenosa | Silte e/ou areias argilosas | Areias de granulometria fina a média, incluindo dunas | Ausência de cobertura |
|-----------------------|---------|---|-----------------------------|---|-----------------------|
| Valoração | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,8 | 1,0 |

Segundo o Quadro 2, observa-se que o valor 0,5 corresponde à silte e/ou areias com conteúdo argiloso, material que geralmente compõe os solos transportados, depositados nos vales e regiões deprimidas do relevo; o valor 0,8 foi atribuído às areias, descritas nos relatórios de perfuração com granulometria fina a média, incluindo os depósitos arenosos eólicos que formam as dunas; e o valor 1,0 foi atribuído aos locais desprovidos de estratos geológicos de cobertura, ou estratos com pequena espessura, equivalentes aos locais onde a zona vadosa (ZV) aparece com espessura inferior a 3m. Repisa-se que a valoração da vulnerabilidade foi mais restritiva em relação ao proposto por Foster et al. (2006) por tratar-se de zona urbana.

O Quadro 3 apresenta a valoração do parâmetro D (espessura da zona vadosa) adotada neste trabalho, adaptado da terceira escala da Figura 3.

Quadro 3 – Valoração da Espessura da Zona Vadosa. Fonte: Autor, adaptado de Foster et al. (2006).

| PROFUNDIDADE DO LENÇOL FREÁTICO OU TOPO DO AQUIFERO CONFINADO | > 50m | 20 a 50m | 10 a 20m | 3 a 10m | < 3m |
|---|-------|----------|----------|---------|------|
| Valoração | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 0,9 | 1,0 |

Segundo o Quadro 3, observa-se que o valor 0,4 foi atribuído à profundidades > 50m, e o valor 0,6 foi atribuído às profundidades (20m - 50m), valores menos restritivos do que o proposto por Foster et al. (2006), porque em Salvador a ZV é predominantemente composta por conteúdo argiloso que amplia a atenuação. O valor 1,0 atribuído às profundidades < 3m, similarmente ao parâmetro G, ou seja, o referencial de 3m está atribuído à espessura da zona vadosa para diferenciar os aquíferos livres cobertos, dos livres desprovidos de cobertura que são mais expostos à contaminação superficial. Também os locais de descarga dos aquíferos foram tomados neste trabalho com valoração igual a 1,0.

A valoração da vulnerabilidade GOD proposta por Foster et al. (2006), que resulta da multiplicação dos três parâmetros descritos, corresponde à quarta escala da Figura 3, e foi adotada neste trabalho sem qualquer adaptação.

O cálculo da vulnerabilidade GOD desenvolvido para os aquíferos do Município de Salvador corresponde à vulnerabilidade intrínseca, ou "natural", desconsiderando-se as alterações antrópicas (de relevo por cortes e/ou aterros em obras de construção civil) ocorridas posteriores à elaboração do mapa topográfico e mapa geológico utilizados para a construção do presente trabalho.

Também foram consideradas na pesquisa as condições recomendadas por Foster (1993): a) quando a zona vadosa apresentou-se com mais de uma camada litológica, com propriedades hidráulicas distintas entre si, foram utilizados os parâmetros da litologia predominante; b) quando os diferentes estratos geológicos se apresentaram com dimensões semelhantes em um determinado perfil, foram empregados os parâmetros do estrato mais permeável, que resulta em maior vulnerabilidade e tem o fim de melhor proteger o aquífero; c) nos casos de dúvidas quanto ao grau de confinamento dos aquíferos, estes foram considerados não-confinados, como são os casos de alguns trechos onde os poços foram construídos no regolito. Embora haja indícios de que os mananciais subterrâneos se encontram confinados pelas camadas argilosas sobrepostas dos solos residuais, não existe certeza sobre este confinamento. As informações hidrogeológicas extraídas dos relatórios dos poços, sempre que possível, foram complementadas com informações coletadas em campo (pesquisas diretas), em mapas geológicos e relatórios de pesquisa, para melhor avaliação da vulnerabilidade

O Quadro 4 apresenta os resultados da aplicação do índice GOD nos diversos cenários hidrogeológicos do Município de Salvador e as respectivas classes de vulnerabilidade natural determinadas.

Quadro 4 – Classes de Vulnerabilidade para os Aquíferos de Salvador utilizando o método GOD

| Tipo de aquífero | Características da zona vadosa | | Classes de Vulnerabilidade | | | | |
|------------------|--------------------------------|-------------------------|----------------------------|-----------|--------------|-------------|----------------|
| | Espessura (m) | Litologia dominante | Grau de confinamento | Litologia | Profundidade | Índices GOD | Classificação |
| Ausência | 0,0 | - | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,000 | Insignificante |
| Surgente | 0,0 | - | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,000 | Insignificante |
| Confinado | > 3 | Argila | 0,2 | 0,3 | 0,9 | 0,054 | Insignificante |
| | < 3* | - | - | - | - | - | Extrema |
| Semi-confinado | > 50 | Areia | 0,5 | 0,8 | 0,4 | 0,160 | Baixa |
| | >50 | Silte/areia argilosa | 0,5 | 0,5 | 0,4 | 0,100 | Insignificante |
| | 20 a 50 | Areia | 0,5 | 0,8 | 0,6 | 0,240 | Baixa |
| | 20 a 50 | Silte/areia argilosa | 0,5 | 0,5 | 0,6 | 0,150 | Baixa |
| | 20 a 50 | Argila silto-sa/arenosa | 0,5 | 0,4 | 0,6 | 0,120 | Baixa |
| | 20 a 50 | Argila | 0,5 | 0,3 | 0,6 | 0,090 | Insignificante |
| | 10 a 20 | Areia | 0,5 | 0,8 | 0,8 | 0,320 | Média |
| | 10 a 20 | Silte/areia argilosa | 0,5 | 0,5 | 0,8 | 0,200 | Baixa |
| | 10 a 20 | Argila silto-sa/arenosa | 0,5 | 0,4 | 0,8 | 0,160 | Baixa |
| | 10 a 20 | Argila | 0,5 | 0,3 | 0,8 | 0,120 | Baixa |
| | 3 a 10 | Areia | 0,5 | 0,8 | 0,9 | 0,360 | Média |
| | 3 a 10 | Silte/areia argilosa | 0,5 | 0,5 | 0,9 | 0,225 | Baixa |
| | 3 a 10 | Argila silto-sa/arenosa | 0,5 | 0,4 | 0,9 | 0,180 | Baixa |
| | 3 a 10 | Argila | 0,5 | 0,3 | 0,9 | 0,135 | Baixa |
| < 3* | - | - | - | - | - | Extrema | |
| Livre coberto | > 50 | Areia | 0,8 | 0,8 | 0,4 | 0,256 | Baixa |
| | > 50 | Silte/areia argilosa | 0,8 | 0,5 | 0,4 | 0,160 | Baixa |
| | > 50 | Argila silto-sa/arenosa | 0,8 | 0,4 | 0,4 | 0,128 | Baixa |
| | > 50 | Argila | 0,8 | 0,3 | 0,4 | 0,096 | Insignificante |
| | 20 a 50 | Areia | 0,8 | 0,8 | 0,6 | 0,384 | Média |
| | 20 a 50 | Silte/areia argilosa | 0,8 | 0,5 | 0,6 | 0,240 | Baixa |
| | 20 a 50 | Argila silto-sa/arenosa | 0,8 | 0,4 | 0,6 | 0,192 | Baixa |
| | 20 a 50 | Argila | 0,8 | 0,3 | 0,6 | 0,144 | Baixa |
| | 10 a 20 | Areia | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,512 | Alta |
| | 10 a 20 | Silte/areia argilosa | 0,8 | 0,5 | 0,8 | 0,320 | Média |
| | 10 a 20 | Argila silto-sa/arenosa | 0,8 | 0,4 | 0,8 | 0,256 | Baixa |
| | 10 a 20 | Argila | 0,8 | 0,3 | 0,8 | 0,192 | Baixa |

| Tipo de aquífero | Características da zona vadosa | | Classes de Vulnerabilidade | | | | |
|---------------------|--------------------------------|-------------------------|----------------------------|-----------|--------------|-------------|---------------|
| | Espessura (m) | Litologia dominante | Grau de confinamento | Litologia | Profundidade | Índices GOD | Classificação |
| | 3 a 10 | Areia | 0,8 | 0,8 | 0,9 | 0,576 | Alta |
| | 3 a 10 | Silte/areia argilosa | 0,8 | 0,5 | 0,9 | 0,360 | Média |
| | 3 a 10 | Argila silto-sa/arenosa | 0,8 | 0,4 | 0,9 | 0,288 | Baixa |
| | 3 a 10 | Argila | 0,8 | 0,3 | 0,9 | 0,216 | Baixa |
| | < 3 | - | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,000 | Extrema |
| Livre sem cobertura | < 3 | - | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,000 | Extrema |

8. CONSTRUÇÃO DAS CARTAS DE VULNERABILIDADE E DO MAPA DE VULNERABILIDADE GOD DOS AQUÍFEROS DE SALVADOR

Para elaboração do mapa de vulnerabilidade GOD dos aquíferos do Município de Salvador, foram gerados nove (9) mapas distintos, relativos aos parâmetros de vulnerabilidade do método. Para gerar o Mapa de Topografia do Terreno (Figura 4), utilizou-se 253 cartas topográficas do Sistema Cartográfico SICAR-RMS (CONDER, 1992); o PERH (2005) para o limite intermunicipal; o Google Earth (para informações de localidades) e o ArcGis (para gerar as curvas de nível). O Mapa do Modelo Digital do Terreno – MDT (Figura 5) foi baseado no mapa topográfico e nas ferramentas do ArcGis. O Mapa de Hidrografia (Figura 6) e o Mapa de Espelhos d'Água (Figura 7) foram construídos retirando-se das cartas topográficas os corpos hídricos; sendo os perenes (espelhos d'água) considerados os locais de exsudação dos aquíferos. Quanto ao Mapa do Modelo Digital de Elevação da Superfície Saturada do Aquífero – MDSA (Figura 8), foi baseado nos contornos dos espelhos; nas cotas do terreno e nas cotas do nível estático (NE) dos poços tubulares. O Mapa de Profundidade da Superfície Saturada do Aquífero (Figura 9), foi construído à partir dos modelos digitais - MDT e MDSA dos quais obteve-se a profundidade da superfície saturada do aquífero. O Mapa do Grau de Confinamento dos Aquíferos (Figura 10) utilizou três Shapefiles: o de localização dos poços, o do grau de confinamento dos poços, e o dos pontos de profundidade do topo do aquífero. O Mapa Geológico do Município de Salvador (Figura 11) foi compilado do PERH (2005). O Mapa de Características Litológicas da Zona Vadosa (Figura 12) foi construído inserindo-se as características da unidade litológica da Zona Vadosa (ZV) no mapa geológico. Finalmente o Mapa da Vulnerabilidade GOD (Figura 13) foi elaborado utilizando-se a ferramenta *Raster Calculator* do ArcGis, efetuando-se a multiplicação das imagens dos mapas de Grau de Confinamento do Aquífero; Característica Litológica da Zona Vadosa; e Profundidade da Superfície Saturada dos Aquíferos. Esse mapa mostra a vulnerabilidade dos aquíferos variando de 0,0 até 1,0, correspondente aos dois extremos da escala: vulnerabilidade insignificante e extrema, respectivamente. No intervalo entre ambos aparecem: vulnerabilidade baixa (0,1 a 0,3); média (0,3 a 0,5); alta (0,5 a 0,7); e, finalmente, extrema, a partir de 0,7 até 1,0.

Figura 4 – Mapa da Topografia do Terreno do Município de Salvador. Fonte: Autor

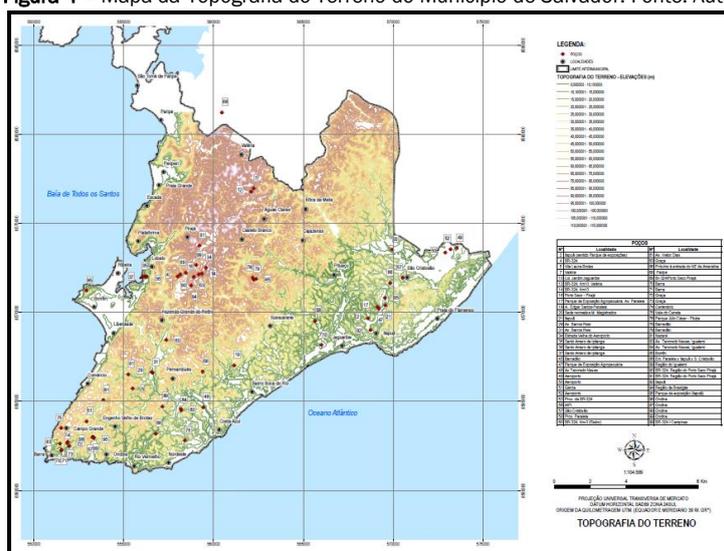


Figura 5 – Mapa do Modelo Digital do Terreno. Fonte: Autor

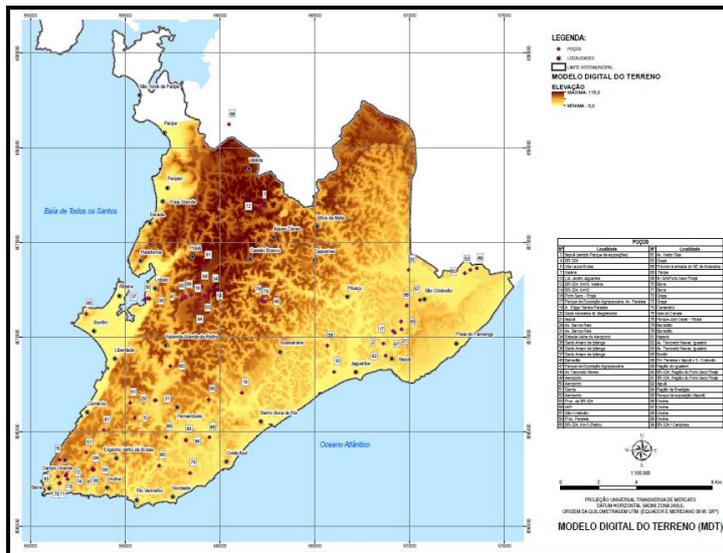


Figura 6 – Mapa da Hidrografia do Município de Salvador. Fonte: Autor

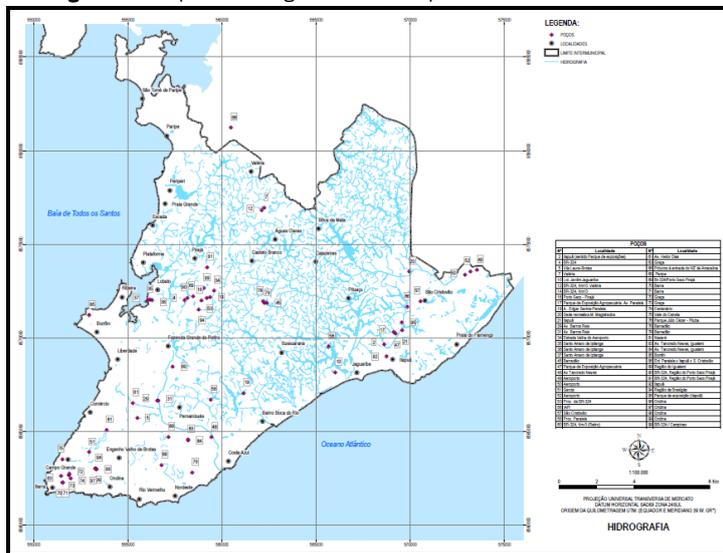


Figura 7 – Mapa dos Espelhos D'Água Selecionados. Fonte: Autor

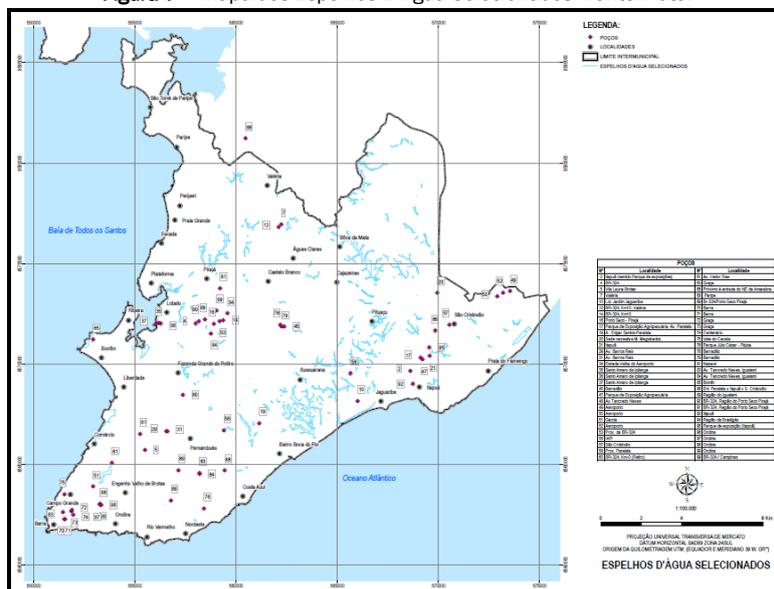


Figura 11 – Mapa da Geologia do Município de Salvador adaptado de PERH (2005). Fonte: Autor

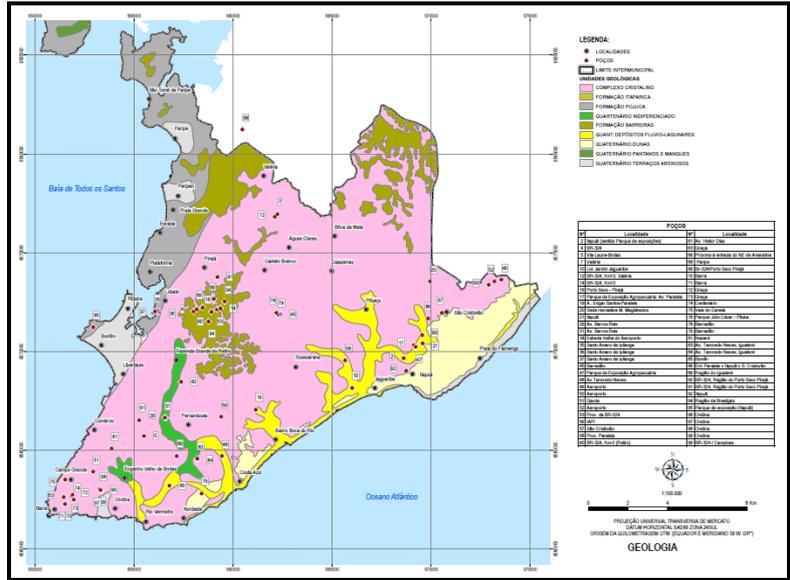


Figura 12 – Mapa das Características Litológicas da Zona Vadosa. Fonte: Autor

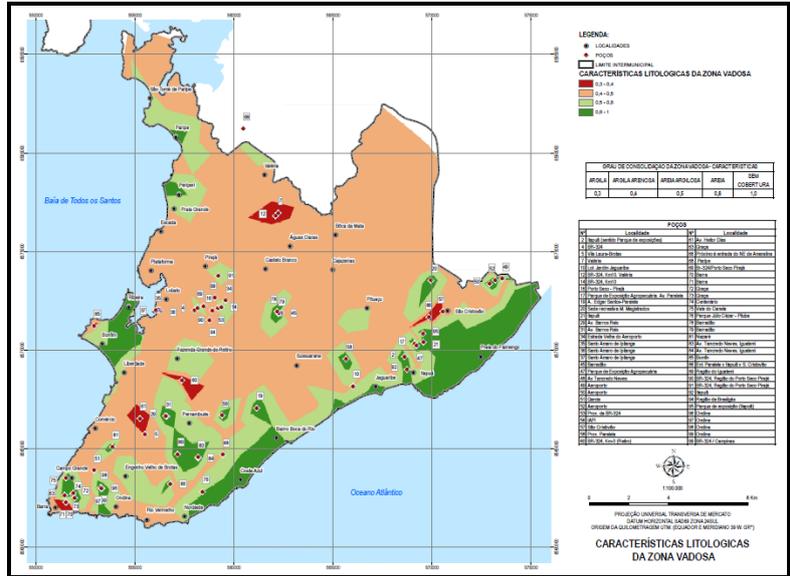
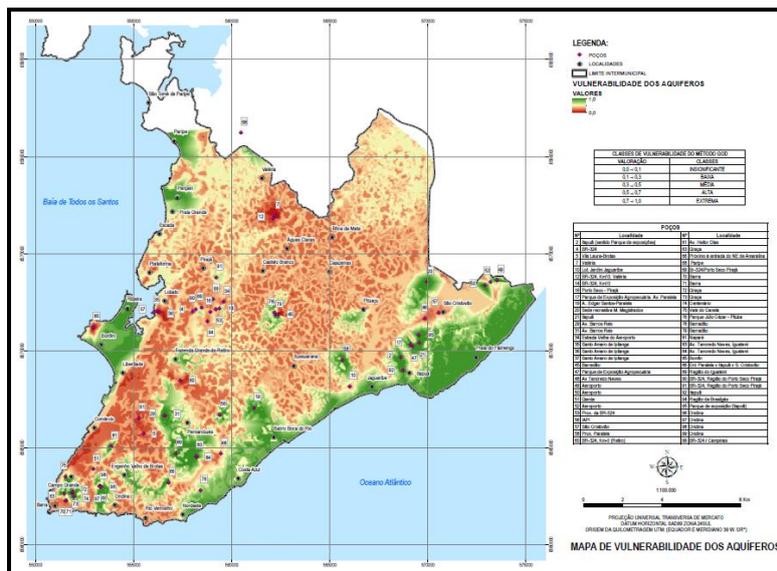


Figura 13 – Mapa da Vulnerabilidade GOD dos Aquíferos do Município de Salvador. Fonte: Autor



9. DISCUSSÃO: VULNERABILIDADE GOD DOS AQUIFEROS DE SALVADOR

Verifica-se a seguinte correlação entre a litologia do município de Salvador e os índices de vulnerabilidade GOD encontrados (Quadro 4): A vulnerabilidade extrema, com Índice de Vulnerabilidade GOD (0,7 - 1,0) ocorrem para aquífero livre e superfície freática com profundidade <3m, ou seja, aquífero superficial ou subsuperficial. O aquífero é considerado descoberto e deixam de existir aquíferos confinados ou semi-confinados. Essas condições estão associadas aos aquíferos granulares formados por rochas sedimentares, bem como cristalinas decompostas, nos trechos de relevo baixo.

A vulnerabilidade alta, com Índice de Vulnerabilidade GOD (0,5 - 0,7) correspondem aos aquíferos livre; superfície freática com profundidade entre 3-20m; e zona vadosa constituída por litologia inconsolidada e arenosa. Essas condições estão associadas aos aquíferos granulares, em relevo levemente a medianamente elevado, nas proximidades das regiões mapeadas como vulnerabilidade extrema, citadas na classe anterior.

A vulnerabilidade média, com Índice de Vulnerabilidade GOD (0,3 - 0,5) correspondem à três tipos de aquífero. Ao aquífero semi-confinado; com superfície freática situada entre 3-20m de profundidade; e zona vadosa constituída por litologias arenosas, em geral associadas ao aquífero sedimentares do Grupo Ilhas, situados em cotas medianamente elevadas ou elevadas. Ao aquífero livre-coberto; com superfície freática situada entre 20-50m de profundidade; e zona vadosa constituída por litologias arenosas e cotas medianamente elevadas ou elevadas. Ao aquífero livre-coberto; com superfície freática situada entre 3-20m de profundidade; e zona vadosa constituída por litologias silto-areno-argilosas, em geral associadas aos aquíferos sedimentares e/ou cristalino-decompostas, em relevo levemente a medianamente elevado.

A vulnerabilidade baixa, com Índice de Vulnerabilidade GOD (0,1 - 0,3) correspondem à sete tipos de aquífero. Ao aquífero semi-confinado com teto acima de 20m de profundidade e zona vadosa constituída por litologias arenosas, associados aos aquíferos sedimentares, arenosos, do Grupo Ilhas, em relevo levemente elevado a elevado. Ao aquífero semi-confinado com teto situado entre 3- 50m de profundidade e zona vadosa constituída por litologia areno-argilosa, associadas aos aquíferos sedimentares, silto/areno-argilosas, do Grupo Ilhas, em relevo levemente elevado a elevado. Ao aquífero semi-confinado com teto entre 3-20m de profundidade e zona vadosa constituída por litologia argilosa, associadas aos aquíferos sedimentares, argilosas, do Grupo Ilhas, em relevo levemente a medianamente elevado. Ao aquífero livre-coberto com superfície freática situada acima de 50m de profundidade e zona vadosa constituída por litologias arenosas, associadas aos aquíferos sedimentares, arenosos, em cotas elevadas. Ao aquífero livre-coberto com superfície freática situada acima de 20m de profundidade e zona vadosa constituída por litologia silto/areno-argiloso, associadas aos aquíferos sedimentares e/ou cristalinas-decomposta, em relevo medianamente elevado ou elevado. Ao aquífero livre-coberto com superfície freática situada acima de 3m de profundidade; e zona vadosa constituída por litologia argilo-arenosa/siltosa, associadas aos aquíferos sedimentares e/ou cristalinas-decomposta, argilosas, em relevo levemente elevado a elevado. Ao aquífero livre-coberto com superfície freática situada entre 3-50m de profundidade e zona vadosa constituída por litologia argilosa, associadas aos aquíferos sedimentares e/ou cristalinas-decomposta, argilosas, em relevo levemente elevado a elevado.

A vulnerabilidade insignificante, com Índice de Vulnerabilidade GOD (0,0 - 0,1) ocorrem em cinco situações. Na ausência de aquíferos, geralmente associado à região do Complexo Cristalino sem fraturas, ou trechos argilosos em sedimentos do Grupo Ilhas. Em aquífero confinado com teto acima de 3m de profundidade, sotoposta a uma zona vadosa constituída por litologia argilosa, associada aos aquíferos sedimentares, com conteúdo argiloso, do Grupo Ilhas, em relevo levemente elevado a elevado. Em aquífero semi-confinado com teto ou superfície semiconfinada situada acima de 50m de profundidade e zona vadosa constituída por litologias areno-argilosas, associadas aos aquíferos sedimentares, areno-argilosas, do Grupo Ilhas, em relevo elevado. Em aquífero semi-confinado com teto ou superfície semiconfinada situada entre 20-50m de profundidade e zona vadosa constituída por litologias argilosas, associadas aos aquíferos sedimentares, de composição argilosa, em relevo medianamente elevado a elevado. Em aquífero livre-coberto com superfície freática situada acima de 50m de profundidade e zona vadosa constituída por litologias argilosas, associadas aos aquíferos sedimentares e/ou cristalino-decompostas, argilosas, em relevo elevado.

Na Figura 13, o Mapa da Vulnerabilidade GOD dos aquíferos do Município de Salvador, mostra forte correlação com o relevo. Nas áreas mais elevadas, correspondentes aos morros e altiplanos verifica-se menor vulnerabilidade e nas áreas mais deprimidas, correspondentes aos vales e baixadas verifica-se maior vulnerabilidade. O mapa também mostra forte correlação da vulnerabilidade com as características litológicas da zona vadosa. Nos trechos onde predominam os solos residuais de composição argilosa, correspondentes aos morros e altiplanos (ocorre a menor vulnerabilidade) e onde predominam os solos transportados, de composição areno-argilosa, e os sedimentos arenosos, representados por dunas, terraços e outros, predominantes nos vales e baixadas (ocorre maior vulnerabilidade)

10. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos com o cálculo da vulnerabilidade GOD para os aquíferos do Município de Salvador, estão associados às características hidrogeológicas da região e as características do relevo. A vulnerabilidade das águas subterrâneas varia com a espessura do manto de cobertura e da característica litológica da zona vadosa, sendo mais protegida na região onde a cobertura é mais espessa e argilosa e menos protegida onde a cobertura se encontra mais delgada e arenosa.

No geral, o mapa de vulnerabilidade mostra que na faixa central da península, nos trechos onde o relevo aparece mais elevado e argiloso, predomina a vulnerabilidade baixa. Na faixa oriental do mapa, a vulnerabilidade predominante aumenta à medida que se aproxima do litoral. Na faixa ocidental, região da Bacia do Recôncavo, a vulnerabilidade aparece em correspondência com o relevo, sendo baixa nos trechos deprimidos e alta nos trechos mais elevados.

A compartimentação do Município de Salvador em áreas de diferentes graus de vulnerabilidade permitiu inferir a fragilidade dos aquíferos ante o risco de contaminação das suas águas por atividades antrópicas desenvolvidas no solo e subsolo urbanos.

REFERÊNCIAS

- AFONSO, M.J.; PIRES, A.; CHAMINÉ, H.I.; MARQUES, J.M.; GUIMARÃES, L.; GUILHERMINO, L.; ROCHA, F.T. Aquífer vulnerability assessment of urban areas using a gis-based cartography: Paranhos groundwater pilot site, Porto, Portugal. 33rd International Geological Congress. p. 259-278, 2008.
- ALLER, L., BENNETT, T., LEHR, J.H., & PETTY, R.J. DRASTIC - A standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. U.S. Environmental Protection Agency report. EPA/600/2-85/018, Washington, D.C. 1985.
- ALMARSI, M.N. Assessment of intrinsic vulnerability to contamination for Gaza coastal aquifer, Palestine. *Journal of Environmental Management*, 88, p.577-593, 2008.
- ARAÚJO, S.S. As fontes de água em Salvador da Bahia, da função à memória. Faculdade de Arquitetura, UFBA Salvador, Bahia. Disponível em <http://www2.cm-evora.pt/AquedutosdePortugal>. Acesso: junho de 2012.
- AWAWDEH, M.; NAWAFLEH, A.A GIS-based EPIK Model for Assessing Aquifer Vulnerability in Irbid Governorate, North Jordan. *Jordan Journal of Civil Engineering*, v.2, n.3, p.267- 278, 2008.
- BARBOSA, J.S.F.; DOMINGUEZ, J.M.L. Geologia da Bahia: Mapa Geológico ao Milionésimo. Salvador: Secretaria da Indústria, Comércio e Mineração. Superintendência de Geologia e Recursos Minerais, 1996.
- BARBOZA, A.E.C.; ROCHA, S.F.; GUIMARÃES, W.D. Estudo preliminar da vulnerabilidade do aquífero livre localizado na região de Ponta da Fruta, Vila Velha - ES. Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Brasil, INPE, p. 3279-3286, 2007.
- BOVOLATO, L.E. Estudo de Vulnerabilidade à Contaminação de Águas Subterrâneas Utilizando a Metodologia GOD Para a Área Urbana de Araguaína, TO. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, João Pessoa. v.1. p.393-393, 2005.
- CAMPONOGARA, I. et al. Mapeamento da Vulnerabilidade Natural à Contaminação de Aquíferos e Risco de Poluição dos Recursos Hídricos Subterrâneos no Município de Soledade/RS. Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário. UFSC, Florianópolis, Outubro, 2004.
- CERB - Companhia de Engenharia Ambiental e Recursos Hídricos da Bahia. Cadastro de Poços tubulares do Município de Salvador/Ba, até Ano 2006.
- CERQUEIRA Neto, J.X. Propriedades Geotécnicas Medidas: Índices Físicos, Classificação dos Solos, Distribuição dos Tipos de Solos por Litologia. Relatório Interno. Instituto de Geociências, UFBA. Salvador-BA. 1983.
- CPRM. Atividades Impactantes Sobre o Meio Ambiente da Região Metropolitana de Recife. (Org.) Assis, H.M.B. e Pfaltzgraff, P.A.S. Recife, 2001.
- CUTRIM, A.O.; CAMPOS, J.E. Avaliação da vulnerabilidade e perigo à contaminação do Aquífero Furnas na cidade de Rondonópolis (MT) com aplicação dos métodos GOD e POSH. *Rev. Geociências*, v.29, n.3, p.401-411, 2010.
- DNPM - Mapa Geológico da Região Metropolitana de Salvador, escala 1:100.000. Convênio MME/CONDER, 1983.
- DNPM - Mapa geológico / Plano Diretor de Mineração Região Metropolitana de Salvador. Convênio DNPM/CONDER, Salvador, 1992.
- DUARTE, M. L.; ZANCHI, F.B.; NEVES, J.R.D.; COSTA, H.S.; JORDÃO, W.H.C. Vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas no município de Humaitá, Amazonas, Brasil. *Revista Ambiente & Água*, v.11, n.2, p.402-413, 2016.

- EARTH - Earth Sciences Division. NASA - National Aeronautics and Space Administration. Disponível em <http://baixaqi.ig.com.br>, acessado em abril de 2007.
- FEITOSA, F.A.C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E.C.; DEMETRIO, J.G.A. (org.). Hidrogeologia: conceitos e aplicações. 3ª ed., Rio de Janeiro: CPRM: LABHID, p.179- 207, 2008.
- FOSTER, S. Determinação do risco de contaminação das águas subterrâneas: um método baseado em dados existentes. São Paulo: Instituto Geológico, (Boletim 10), 1993.
- FOSTER, S.; HIRATA, R.; GOMES, D.; D'ELIA, M.; PARIS, M. Proteção da Qualidade da Água Subterrânea: um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências ambientais. SERVMAR, São Paulo/SP. 2006.
- FOSTER, S.; HIRATA, R. Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data. WHO-PAHO/HPE-CEPIS Technical Manual, Lima, Peru. 81p, 1988.
- GOIS, L.H.B.; Godoy, A.P.; OLIVEIRA, I.B.; BERETTA, M. Qualidade Microbiológica das Águas Subterrâneas Utilizadas Para Consumo Humano em Salvador-Bahia. Anais do II Congresso Internacional de Meio Ambiente Subterrâneo. São Paulo-SP, 2012.
- HIRATA, R. Oito Perguntas e Oito Tentativas de Respostas Sobre a Vulnerabilidade à Poluição de Aquíferos. I Seminário-Taller. Protección de Acuíferos Frente a La Contaminación: Metodología. Toluca, México, 2001.
- HIRATA, R.C.A.; BASTOS, C.R.A.; ROCHA, G.A.; GOMES, D.C.; IRATANI, M.A. Groundwater pollution risk and vulnerability map of the State of São Paulo, Brazil. Water Sci. Tech. v.24, n.11, p.159-169, 1991.
- IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censo Demográfico 2010. <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/>.
- LIMA, O.A.L. Caracterização do Aquífero Recôncavo na Região de Camaçari-Dias D'Ávila, Bahia. Tese Concurso Público Professor Titular, Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil. 1999.
- LIMA, O.A.L. Planejamento Ambiental para Salvador. Secretaria de Meio Ambiente, Prefeitura Municipal de Salvador. Salvador, Ba. Dezembro 1995.
- MONTEIRO, R.C.; PEIXOTO, A.S.P. Vulnerabilidade e perigo de contaminação dos aquíferos no Alto Aguapeí e Alto Peixe, SP. Ciência & Engenharia, v.22, n.1, p.115-124, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.14393/19834071.2013.22499>.
- MURADÁS, K.; WOJAHN, D.; COELHO, O.G.W. Levantamento de dados geomorfológicos e hidrogeológicos para mapeamento de vulnerabilidade de contaminação do Aquífero Guarani nos municípios de Portão e Estância Velha/RS utilizando o método DRASTIC. Ambi-Água, v.5, n.3, p.172-194, 2010.
- NASCIMENTO, Y.S, JESUS, J.B., GOMES, R.L. Vulnerabilidade das águas subterrâneas na região semiárida da Bahia, município de Tucano, pelo método GOD. Revista Agrogeoambiental, Pouso Alegre, v.11, n.1, p.123-132, 2019.
- NASCIMENTO, S.A.M. Estudo da Qualidade da Água do Aquífero Freático nas Bacias dos Rios Lucaia e Baixo Camarujipe. Relatório Final. Instituto de Geociências, UFBA. Convênio UFBA/EMBASA/FAPEX. Salvador-BA. Novembro, 2002.
- NASCIMENTO, S.A.M. Diagnóstico Hidrogeológico, Hidroquímico e da Qualidade da Água do Aquífero Freático do Alto Cristalino de Salvador - Bahia. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia. Salvador, BA. 2008.
- NASA - National Aeronautics and Space Administration. SRTM - Shuttle Radar Topography Mission. California Institute of Technology. Disponível em <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm>. Acesso em abr 2007.
- PDDU - Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano do Município do Salvador. Prefeitura Municipal do Salvador - PMS. Salvador, BA. 2002.
- PDDU - Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano do Município do Salvador. Prefeitura Municipal do Salvador - PMS. Salvador, Ba. 2011.
- PERH - Plano Estadual de Recursos Hídricos. Sistema Estadual de Informações Ambientais e Recursos Hídricos. SEMA Governo da Bahia. 2005. Disponível em <http://www.seia.ba.gov.br>. Acesso em dez 2010.
- RIBEIRO, D.M.; ROCHA, W.F.; GARCIA, A.J.V. Vulnerabilidade natural à contaminação dos aquíferos da Sub-bacia do rio Siriri, Sergipe. Águas Subterrâneas, v.25, n.1, p91-102, 2011.
- SABADINI, S.C.; RUCHKYS, U.A.; VELÁSQUEZ, L.N.M.; TAYER, T.C. Potencial de vulnerabilidade natural de aquíferos à contaminação no quadrilátero ferrífero, Minas Gerais e sua relação com a atividade minerária de ouro. Caderno de Geografia, v.27, n.49, p.340-352, 2017.
- SEI - Superintendência de Estudos Econômicos e Sociais da Bahia. Balanço hídrico mensal e anual. Estação: Salvador. Período: 1961-1990. 1999.
- SOUZA, V.C.A.B.; SOARES, V.P.; MACIEL, A.V.; KEMERICH, P.D.C. Qualidade da água subterrânea do bairro Perpétuo Socorro de Santa Maria-RS. Disciplinarum Scientia. Série: Ciências Naturais e Tecnológicas, v.5, n.1, p.31-49, 2004.
- TAVARES, P.R.L.; CASTRO, M.A.H.; COSTA, C.T.F.; SILVEIRA, J.G.P.; ALMEIDA JR., F.J.B. Mapeamento da vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas localizadas na Bacia Sedimentar do Araripe, Estado do Ceará, Brasil. Rev. Esc. Minas [online]. v.62, n.2, p.227-236, 2009.

TERRA, L.G.; LÖBLER, C.A.; SILVA, J.L.S. Estimativa da vulnerabilidade à contaminação dos recursos hídricos subterrâneos do município de Santiago-RS. Rev. Eletrônica em Gestão, Educ. e Tec. Amb, v.10, n.10, p.2208-2218, 2013.