



Estudos de Caso e Notas

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Disclaimer: Articles published in this section are not peer-reviewed and are not indexed.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.

Avaliação do Potencial Hídrico Não-Potável em Aquíferos do Município de Salvador, Bahia, com Base no Mapa de Vulnerabilidade GOD

Evaluation of Non-Potable Groundwater Potential in Aquifers of the Municipality of Salvador, Bahia, Based on GOD Vulnerability Map

Jorge Haroldo de Souza Marques^{✉1}; Iara Brandão de Oliveira²

¹ Universidade Federal da Bahia, Salvador, Bahia.

² Universidade Federal da Bahia, Salvador, Bahia.

✉ jmarques@ufba.br, oliveira@ufba.br,

Palavras-chave:

Vulnerabilidade de aquíferos.
Método GOD.
Cálculo de Volumes Não-Potáveis.
Município de Salvador - BA.

Keywords

Aquifer vulnerability.
GOD Method.
Calculation of Non-Potable Volumes.
Municipality of Salvador - BA.

Resumo

Este trabalho avaliou o potencial hídrico não-potável dos aquíferos do município de Salvador, Bahia, com base no mapa de vulnerabilidade GOD. Os aquíferos de Salvador apresentam características de aquífero fissural, nos domínios do Complexo Cristalino, e de aquífero granular, no domínio das rochas sedimentares. O método GOD calcula a vulnerabilidade intrínseca do aquífero através da avaliação numérica dos parâmetros hidrogeológicos do sítio associados ao tipo de aquífero (de confinado à não confinado), ao tipo de solo (de argila à areia) e da profundidade até o topo do aquífero. A metodologia GOD revelou que a vulnerabilidade natural dos aquíferos da cidade de Salvador se classifica de baixa à insignificante, nos trechos mais argilosos e de topografia elevada da cidade; e, de alta à extrema, nos trechos mais arenosos dos vales e baixadas. Construindo o mapa das classes de vulnerabilidade e delineando os trechos de alta à extrema vulnerabilidade, foi possível avaliar o potencial de água subterrânea classificada como não potável, face ao risco de contaminação por atividades antrópicas nelas instaladas ou, por instalar. Tomando-se a área desses trechos e as características hidrogeológicas do aquífero, foi quantificado um volume hídrico não potável de aproximadamente 20 milhões de m³, com recarga anual de aproximadamente 9 milhões de m³, baseada numa taxa anual de recarga de 12% das precipitações pluviométricas sobre as áreas mapeadas como vulnerabilidade GOD alta e extrema. Assim sendo, o mapa de vulnerabilidade favorece uma exploração ambientalmente adequada dos recursos hídricos subterrâneos de uma região.

Abstract

This study evaluated the non-potable water potential of aquifers in the municipality of Salvador, Bahia, based on the GOD vulnerability map. The aquifers of Salvador have characteristics of fissural aquifer in the domains of the Crystalline Complex and, of granular aquifer in the domain of sedimentary rocks. The GOD method calculates the intrinsic vulnerability of the aquifer by numerically evaluating site hydrogeological parameters associated with aquifer type (from confined to unconfined), soil type (clay to sand), and depth to the top of the aquifer. The GOD methodology revealed that the natural vulnerability of the aquifers of the city of Salvador is classified from low to insignificant, in the most clayey and high topography of the city; and from high to extreme in the sandy parts of the valleys and lowlands. By mapping the vulnerability classes and outlining the sections from high to extreme vulnerability, it was possible to assess the potential of groundwater classified as non-potable, in view of the risk of contamination by anthropogenic activities installed in them or, to be installed. Taking the area of these sections and the hydrogeological characteristics of the aquifer, a non-potable water volume of approximately 20 million m³ was quantified, with an annual recharge of approximately 9 million m³, based on an annual recharge rate of 12% of rainfall on areas mapped as high and extreme GOD vulnerability. Thus, the vulnerability map favor an environmentally sound exploitation of a region's groundwater resources.

DOI: <https://doi.org/10.14295/ras.v34i1.29801>

1. INTRODUÇÃO

No Município de Salvador a recarga dos aquíferos posicionados em áreas de relevo baixo é feita preferencialmente por águas meteóricas incorporadas aos deflúvios que escoam das partes mais elevadas, de onde descem lavando ruas, praças e demais espaços públicos da cidade, geralmente contaminados com resíduos sólidos e efluentes urbanos dispostos na superfície e subsuperfície. Os aquíferos de Salvador também são recarregados com águas residuárias vazadas do sistema de esgotamento sanitário, devido à baixa eficiência do saneamento básico, ou, simplesmente, por infiltração direta, nos casos de ausência de esgotamento sanitário. Além das chuvas, soma-se também as recargas oriundas do sistema de distribuição de água potável, devido à perdas de até 40% do que sai das plantas de tratamento (ELIAS, 2012).

Nas épocas chuvosas, em razão da elevação temporária nos níveis dos corpos hídricos presentes nos vales, estes podem ser influentes nos aquíferos, carregando-os com águas de má qualidade, na medida em que os corpos hídricos são receptores do sistema municipal de esgotamento de águas pluviais e sanitárias. Também favorecem a infiltração das águas meteóricas nos aquíferos a presença de fendas, rachaduras e canais biológicos originados por raízes decompostas ou pela fauna do solo; bem como as escavações de origem antrópica, difusas por todo o município, representadas por poços e cisternas, furos para cravar postes e estacas, fundação de obras e demais intervenções penetrantes desprovidas de selagem sanitária. Podem-se citar ainda os cortes no relevo para implantação de rodovias, avenidas e demais obras civis, que aproximam a superfície do terreno da superfície freática, diminuindo a espessura da zona vadosa e reduzindo a proteção dos aquíferos. Ao facilitar a incorporação das águas infiltradas à zona saturada dos aquíferos reduz-se os processos de geodepuração, consequentemente eleva-se o risco de contaminação das reservas subterrâneas.

Os aquíferos da cidade de Salvador apresentam contaminantes nas águas subterrâneas, difundidos por toda a área, sendo os mais comuns os de natureza orgânica, como relatado por Guerra e Nascimento (1999) que pesquisaram o grau de comprometimento das águas do aquífero freático de Salvador por vazamentos em postos de gasolina; relatado por Gois et al. (2000) que analisou a qualidade microbiológica da água subterrânea das soluções alternativas coletivas (SAC) para abastecimento de água potável em Salvador; e por Nascimento (2002) que desenvolveu estudos da qualidade da água do aquífero freático nas bacias dos rios Lucaia e Baixo Camarujipe.

Segundo Nascimento (2002), as águas subterrâneas do município de Salvador são acessíveis para a população de baixa renda que habitam nos vales e baixadas através de poços rasos ou cacimbas, e servem para o abastecimento nas olericulturas dos vales, em chácaras e casas de veraneio. Nascimento (2008) estimou que cerca de 5% do total da demanda de água potável do município de Salvador vem de fontes subterrâneas, integrando, inclusive, o fornecimento para o sistema designado como Solução Alternativa Coletiva - SAC, nos 14 Distritos Sanitários do município de Salvador (GOIS et al. 2012).

Tendo em vista o significativo uso da água subterrânea do município de Salvador, Marques (2012) 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. A metodologia GOD tem sido extensivamente aplicada com fins de avaliação da vulnerabilidade dos aquíferos por vários autores (HIRATA et al. 1991; CPRM 2001; CAMPONOGARA et al. 2004; BOVOLATO 2005; BARBOZA et al. 2007; AFONSO et al. 2008; ALMARSI 2008; AWAWDEH et al 2008; TAVARES et al 2009; CUTRIM e CAMPOS 2010; RIBEIRO et al. 2011; MONTEIRO e PEIXOTO 2013; TERRA et al. 2013; DUARTE et al. 2016; SABADINI et al. 2017; NASCIMENTO et al. 2019) dentre outros.

Os aquíferos de Salvador com potencial de reservas hídricas não potáveis estão associados aos trechos urbanizados da cidade mapeados como vulnerabilidade GOD alta e extrema, e onde se encontram instaladas, ou podem ser instaladas, fontes potenciais de contaminação. Esses aquíferos estão posicionados geralmente nos trechos deprimidos do relevo, representados pelos vales e baixadas, nos quais a superfície saturada dos aquíferos está próxima da superfície do terreno. Também ocorrem nas áreas com relevo levemente a medianamente elevado, mas com a zona vadosa formada por litologias arenosas (MARQUES 2012). Esses aquíferos são geralmente de natureza livre, a zona vadosa apresenta espessura inferior a 3m e está composta geralmente por litologia inconsolidada sedimentar e/ou cristalino-decomposta. Entretanto, reservas hídricas não potáveis podem também ocorrer nos aquíferos cuja zona vadosa possui espessura de até 20m, mas constituída por areais inconsolidadas. Em ambas as situações a condutividade hidráulica favorece a infiltração relativamente rápida das águas, indicando que os processos relacionados com a geodepuração não são plenos. Portanto, a avaliação do potencial hídrico não potável dos aquíferos do município de Salvador, com base no mapa de vulnerabilidade GOD, pode ser útil para uma utilização adequada deste importante recurso hídrico subterrâneo.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área de Estudo

2.1.1. Localização e clima do município de Salvador

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).

2.1.2. Geologia e hidrogeologia do município de Salvador

O município pode ser dividido em dois domínios geológicos distintos, separados pela zona da Falha de Salvador, gerando um relevo que caracteriza a capital soteropolitana por apresentar dois compartimentos geomorfológicos, a cidade alta e a cidade baixa.

A cidade alta ergue-se sobre a região geológica do Alto Cristalino, formado por um horst de rochas metamórficas de alto grau, datadas do Pré-Cambriano, que separa a Bacia Sedimentar do Recôncavo, do Oceano Atlântico. Enquanto que a cidade baixa ergue-se sobre rochas sedimentares do Cretáceo Inferior, pertencentes ao Grupo Ilhas da referida Bacia. Esses dois domínios eventualmente encontram-se sotopostos a sedimentos continentais pouco consolidados, de idade Plio-Pleistocênica, correspondentes a Formação Barreiras, e sedimentos continentais e marinhos inconsolidados, dispostos em camadas relativamente delgadas, datados do Quaternário, que alguns autores agrupam em um domínio geológico distinto correlacionado à margem costeira atlântica.

A Tabela 1 apresenta a coluna estratigráfica para as rochas que afloram no Município de Salvador, adaptada de DNPM (1983), a qual será descrita a seguir.

Tabela 1. Coluna Estratigráfica das Rochas que Afloram em Salvador, adaptado de DNPM (1983).

QUATERNÁRIO	(Q) Depósitos aluviais, depósitos costeiros, arenitos, areias inconsolidadas, mangues, depósitos eólicos e dunas litorâneas.			
TERCIÁRIO	Plioceno	(Tb) Formação Barreiras		
CRETÁCEO (CRETÁCEO INFERIOR)	Supergrupo Bahia	Grupo Ilhas	Indiferenciado (Kis)	(Kisp) Formação Pojuca (Kism) Formação Marfim
PRE CAMBIANO	(p€) Rochas Cristalinas			

2.1.2.1 Domínio do Complexo Cristalino (p€)

Este domínio possui, aproximadamente, 244km² de área, correspondendo a 80% da área total do município (NASCIMENTO, 2008). Emerge do oceano Atlântico, na costa leste, estendendo-se continuamente para o interior do continente, onde ocupa toda a cidade alta, desde os bairros litorâneos da Barra, Ondina, Rio Vermelho, Amaralina, Pituba, Piatã, Itapuã, passando pelos bairros interiores da Federação, Nazaré, Cosme de Farias, Brotas, Pernambuco, Cabula, Sussuarana, Águas Claras, prosseguindo até os bairros situados nos limites com a cidade baixa, como o Corredor da Vitória, Praça da Sé, Pelourinho, Santo Antônio, Barbalho, Liberdade, parte alta de São Caetano, Pirajá, Valéria, entre outros. Ao longo da orla marítima, desde o Porto da Barra até Itapuã, é possível observar estas rochas aflorando em estado de relativamente pouca alteração intempérica ou mesmo sem alteração – rocha sã. Apresenta-se em superfície profundamente alterada, com a decomposição favorecida pelas águas pluviais, sob condições climáticas favoráveis, formando um manto regolítico com espessuras relativamente elevadas, podendo atingir, segundo Ribeiro (1991), profundidades superiores a 30m, com passagens quase bruscas para a rocha sã, conforme observa Fujimori & Allard (1966). Exibe eluviões predominantemente argilo-arenosos, geralmente latossolos e podzóis vermelho-amarelo distróficos (RIBEIRO, 1991).

O sistema de fraturas desenvolvido no p€ serve como canal de percolação das águas, facilitando a instalação de processos físico-químicos de intemperismo, os quais, juntamente com os processos erosivos, dão origem aos vales e depressões, onde se desenvolve a rede natural de drenagem fluvial da cidade. Os cursos d'água retilinizados são marcados como vales adaptados a estas fraturas, representando uma rede de drenagem com alta densidade de pequenos cursos d'água pouco profundos (SACRAMENTO, 1980)

Os solos siltosos predominam no domínio do Complexo Cristalino, conforme descritos no estudo de Cerqueira Neto (1983) e mostrados na Tabela 2. Cerqueira Neto (1983) fez medidas da permeabilidade hidráulica no alto da Federação, nas proximidades da Escola de Arquitetura-UFBA, encontrando a condutividade hidráulica de $(10^{-6}$ à 10^{-7} cm/s) sobre o solo regolito.

Tabela 2. Distribuição Percentual dos Tipos de Solo no Domínio Cristalino. Fonte: Cerqueira Neto (1983).

Tipo de Solo	Complexo Cristalino - pC (%)
Argilosos	2,7
Siltosos	57,8
Areno-argilosos	5,8
Areno-siltosos	10,0
Não classificados	23,7

Nos litotipos próprios do embasamento cristalino (pC) ocorrem os aquíferos fissurais, onde as águas encontram-se armazenadas em fraturas ou fissuras. Para que ocorra água subterrânea explotável neste meio é preciso que as fraturas possuam abertura expressiva, o suficiente para armazenar e possibilitar o fluxo hídrico; e que estejam interconectadas entre si e a uma zona de recarga que garanta o seu reabastecimento. Segundo Lima (1999), o desenvolvimento do aquífero fissural em Salvador deve-se, principalmente, ao elevado grau de fraturamento presente nas rochas cristalinas, como resultado de repetidos estágios de deformação quebradiça. Em função disso, este domínio possui uma efetiva porosidade de fissuras que proporciona elevados valores de permeabilidade hidráulica, com destaque para as fendas mestras transversais, bastante contínuas e de grandes aberturas, sendo que muitas destas correspondem a falhas geológicas. As zonas fraturadas conferem ao cristalino condutividade hidráulica geralmente variando entre 10^{-7} a 10^{-2} m/s, em função de vários aspectos, principalmente quanto ao grau de fraturamento, sendo este fator decisivo para o volume da água armazenada (FRACALLOSSI JÚNIOR, 2001).

Do ponto de vista quantitativo, este sistema aquífero abriga relevante volume hídrico, cujas reservas renováveis, de acordo com Nascimento (2008), são capazes de abastecer 20 a 25% da população de Salvador durante todo o ano, o que é significativo.

Com relação à recarga dos aquíferos em meio cristalino, os estudos efetuados permitem inferir que os aquíferos fissurais dos vales e baixadas apresentam bom potencial de recarga nos locais com zona vadosa pouco espessa e valores de permeabilidade alta, que favorecem o acesso das águas à zona saturada e para onde convergem os deflúvios durante as épocas chuvosas. Por outro lado, nos trechos mais elevados do relevo, a recarga dos aquíferos é de baixo potencial, onde a zona vadosa aparece com espessura geralmente elevada, formada predominantemente por solos residuais, argilosos, com menor condutividade hidráulica, se comparada com as regiões de vales e baixadas. Apresenta, inclusive, relevo acidentado, com vertentes de natureza siltosa-argilosa, com inclinações geralmente variando entre 15 e 25°, podendo atingir até 50° na zona da escarpa da falha e desníveis topográficos variando de 50 a 100m (LIMA, 1995), privilegiando o escoamento superficial em detrimento da infiltração.

Quanto à parte urbanizada do município que apresenta ocupação desordenada e, muitas vezes, irregular, em geral, tem preservação de áreas verdes insignificante, proporcionando impermeabilização acentuada por meio de calçamentos, vias asfaltadas e telhados, resultando em menores áreas de recarga natural dos aquíferos, prejudicando o equilíbrio hidrodinâmico dos aquíferos, e aumentando excessivamente o escoamento superficial, com perdas hídricas durante as épocas chuvosas.

Com relação à recarga indireta dos aquíferos fissurais, esta ocorre devido à transferência de água por fluxo lateral a partir dos aquíferos porosos localizados nos vales e baixadas que, durante os períodos chuvosos, distribui água nas adjacências por elevação temporária da superfície freática nestes trechos. Lima (1995) observa que, ao longo das zonas fraturadas do embasamento, justapostas aos sedimentos da Bacia do Recôncavo, é possível haver transferência de muita água do sistema clástico para o sistema cristalino, configurando, nestes dois casos, eficientes zonas de recarga.

Nos trechos mais elevados do relevo, em meio regolítico, devido à valores de condutividade hidráulica relativamente baixa, a significativa espessura da zona vadosa e o relevo movimentado, o escoamento superficial predomina largamente sobre a infiltração. Também o potencial de recarga direta do aquífero fissural encontra-se comprometido devido ao elevado grau de impermeabilização dos solos promovido por telhados, áreas cimentadas e ruas asfaltadas, e ausência quase que completa de cobertura vegetal. A existência de várias nascentes brotando nas encostas de Salvador, tanto no contato entre o manto de decomposição e a rocha sã como nas fraturas da rocha sã, indicam que as águas que se infiltram são, em parte, descarregadas por fluxo lateral e não contribuem efetivamente para recarga das fraturas mais profundas.

Nos aquíferos do Complexo Cristalino, as cotas piezométricas aferidas em poços tubulares evidenciam eixo divisor dos fluxos, paralelo a cumeada, determinada pela zona da Falha de Salvador e acompanhando o relevo. Esse sistema aquífero apresenta um sentido regional do fluxo com gradiente decaindo no sentido do oceano Atlântico; embora, secundariamente, apresente um sentido de fluxo orientado para a Baía de Todos os Santos. Esta situação ocorre porque a superfície freática tende a acompanhar a superfície do terreno, devendo, portanto, acompanhar o relevo da escarpa da Falha. Sondagens realizadas por Lima (1995) indicaram elevada profundidade (mais de 23m) da superfície freática na área do centro histórico de Salvador.

As pesquisas de Santos (2003) na região de Arembepe, ao longo da Falha de Salvador justaposta à Bacia do Recôncavo, permitiu inferir que a condição regional do fluxo da água subterrânea pode ser predominantemente horizontal, exceto nas proximidades da falha, onde há uma importante componente vertical descendente.

2.1.2.2 Domínio do Grupo Ilhas

Os terrenos pertencentes ao domínio do Grupo Ilhas aparecem bordejando a Baía de Todos os Santos, na região da cidade baixa, desde o bairro do Comércio até a Base Naval de Aratu, passando pelos bairros da Calçada, Bonfim, Ribeira, Plataforma, Periperi, Paripe, entre outros, incluindo as Ilhas de Maré e dos Frades. Estas rochas encontram-se constituídas por sedimentos compactados, variando granulometricamente entre argila, silte e areias.

Em termos estratigráficos, o Grupo Ilhas está constituído pelas formações Pojuca (Kisp) e Marfim (Kism), integrando o Supergrupo Bahia e formando o pacote de rochas sedimentares depositado na Bacia Sedimentar do Recôncavo (DNPM 1983). Essa Bacia pertence ao sistema de bacias cretáceas do Leste Brasileiro, apresentam a geometria de um semi-Gráben assimétrico, definido por uma falha em seu limite oriental - Falha de Salvador - e, na margem oposta, em seu limite ocidental, falhas de pequeno rejeito (BARBOSA e DOMINGUEZ 1996). Em termos geomorfológicos, a faixa litorânea limita-se com o continente, em alguns trechos, por falésias devido às estruturas geológicas de fraturamento, apresentando formas dissecadas sobre os sedimentos e formas de acumulação marinha e fluviomarinha, e depósitos de estuários.

Os solos argilosos e siltosos correspondem a quase 60% no domínio da Formação Pojuca (CERQUEIRA NETO, 1983), conforme mostrado na Tabela 3.

Tabela 3. Distribuição Percentual dos Tipos de Solo na Formação Pojuca, Grupo Ilhas. Fonte: Cerqueira Neto (1983).

Tipo de Solo	Kisp - Formação Pojuca (%)
Argilosos	42,9
Siltosos	14,3
Areno-argilosos	-
Areno-siltosos	-
Não classificados	42,9

Segundo Lima (1979), os depósitos do Grupo Ilhas são constituídos por espessos pacotes de folhelhos e siltitos, contendo diversos corpos de arenitos e delgados de calcários, perfazendo um total de mais de 2.000m de espessura. Apresentam baixa produtividade hídrica, devidas à alta compactação e argilidade dos arenitos. O modelo hidrogeológico dos aquíferos deste Grupo, por atuar como uma imensa área de recarga, sugere tratar-se de um aquífero extenso, com porosidade intergranular baixa, regime de fluxo livre, semi-confinado ou confinado e com nível estático variável, pelo menos nos trechos em estudo. A recarga se processa de maneira direta, a partir das precipitações pluviais, e indireta, através dos aquíferos de passagem, formados pelos sedimentos terciários e quaternários sobrepostos.

A característica argilosa prevalecente no pacote de sedimentos que forma o Grupo Ilhas sugere recargas pouco efetivas por águas meteóricas, e escoamento superficial predominante em detrimento da infiltração, sobretudo pelo elevado grau de impermeabilização promovido pelas intervenções antrópicas, como asfaltamentos, telhados, pisos cimentados etc.

Considerando o posicionamento espacial do Grupo Ilhas ao redor da Baía de Todos os Santos, e as cotas do nível estático dos poços pesquisados neste domínio por Marques (2012), o fluxo das águas subterrâneas encontra-se orientado para a referida Baía.

2.1.2.3 Domínio da Cobertura Sedimentar: Formação Barreiras (Tb)

Os sedimentos da Formação Barreira no Município de Salvador apresenta geralmente pouca espessura, normalmente entre 5 e 10m, embora eventualmente, possa alcançar até mais de 30m. No restante da Bacia Sedimentar do Recôncavo, a espessura atinge comumente mais de 50m (ACCIOLY, 1997). Pode ser observada em inúmeras cascalheiras, em áreas de lava e nos cortes de entrada, como na BR-324, na altura do entroncamento da Estrada Velha do Aeroporto, onde cobre uma área com cerca de 10km².

Litologicamente, a Formação Barreiras é descrita como um pacote de sedimentos continentais pouco litificados, de cores variegadas, constituídos por arenitos grosseiros com matriz argilosa, de grãos mal selecionados, subangulares a arredondados, de cores variadas, predominando a vermelha sobre a amarela, branca e violeta, conforme a argila da matriz (DNPM 1992). Em termos geomorfológicos, no município de Salvador, essa formação apresenta trechos formando “mesas” ou “tabuleiros”, sobrepostos discordantemente tanto sobre o embasamento como sobre o Grupo Ilhas.

Cerqueira Neto (1983) caracteriza os solos da Formação Barreiras predominantemente siltosos/areno-argilosos, conforme mostrado na Tabela 4.

Tabela 4. Distribuição dos Tipos de Solo na Formação Barreiras. Fonte: Cerqueira Neto (1983).

Tipo de Solo	Tb - Formação Barreiras (%)
Argilosos	4,9
Siltosos	43,9
Areno-argilosos	17,1
Areno-siltosos	4,9
Não classificados	29,3

Segundo Marques (2012), no âmbito do município de Salvador, a litologia da Formação Barreiras está predominantemente sobreposta ao Domínio Cristalino, e é composta de areias com matriz argilosa, constituindo uma sequência aquífera freática e níveis confinados em profundidade. Sua exploração é pouco desenvolvida no município, tendo em vista sua relativamente pequena área de afloramento.

A disposição espacial dos sedimentos da Formação Barreiras indica que a recarga se dá geralmente por contribuições meteóricas, servindo também como aquífero de passagem para os mananciais sotopostos. Nos trechos onde a composição areno-argilosa predomina e onde a zona vadosa apresenta maior espessura, os processos de geodepuração devem atuar com relativa eficiência.

Com relação ao sentido do fluxo, considerando que a Formação Barreiras aparece sobreposta aos terrenos do embasamento cristalino e/ou do Grupo Ilhas, o sentido do fluxo está provavelmente determinado por estes sistemas geológicos.

2.1.2.4 Domínio da Cobertura Sedimentar: Depósitos Quaternários (Q)

Os depósitos quaternários são descritos por DNPM (1983) como sedimentos fluviais e costeiros, representados por aluviões do quaternário indiferenciado (Qi); dunas (Qe); depósitos flúvio-lagunares (Qfl); terraços arenosos (Qt2); pântanos em mangues atuais (Qpm); recifes de corais e de algas coralinas (Qr); terraços arenosos deixados acima do nível atual do mar pela regressão subsequente à transgressão pleistocênica (Qt1); e depósitos de leques aluviais coalescentes (Qla). Esses depósitos formam distintos sistemas aquíferos constituídos pelas mais variadas litologias, mas foram agrupados em uma única unidade hidrogeológica, devido à difícil separação dos mesmos.

No Município de Salvador, os sedimentos quaternários se apresentam em ocorrências contínuas ou descontínuas, dispostas sobre os domínios do Complexo Cristalino e do Grupo Ilhas. Afloram mais no litoral norte, a partir do bairro de Itapuã até o município de Lauro de Freitas, onde aparecem cobrindo áreas mais extensas. Entretanto, a planície arenosa litorânea de origem marinha está formada por amplos terraços de composição arenosa que se estendem pelos bairros da Pituba, Costa Azul e Stiep. Campos de dunas, denominados por Martin et al. (1980) de externas e atuais, ocorrem nos bairros litorâneos desta área, sendo resultantes do retrabalhamento pelos ventos dos depósitos arenosos marinhos. As dunas são constituídos por areias finas, bem selecionadas, predominantemente quartzosas, com grau de arredondamento variado, apresentando coloração ocre à branca, sendo, por vezes, amarelada nas dunas atuais. Também os depósitos quaternários acompanham as drenagens fluviais e as planícies rebaixadas do relevo em toda a cidade. Eventualmente, também ocorrem na costa da Baía de Todos os Santos e em suas ilhas.

Encontram-se, ainda, 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, segundo Lima (1995), uma via de alta permeabilidade para o fluxo freático. 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 que foram analisados, os dados hidrogeológicos anotados correspondem ao conjunto das zonas produtoras do perfil.

Quanto à morfologia associada ao Quaternário, destacam-se os terraceamentos dos fundos de vales, visíveis ao longo das avenidas Vasco da Gama, ACM e Juracy Magalhães Júnior, com aluviões fluviais constituídos por partículas areno-argilosas, erodidas a partir de rochas alteradas do embasamento e retrabalhadas por processos promovidos por águas pluviais e movimentos de massas que se deslocam nas encostas devido à gravidade. Muitos desses vales exibem marcas de inundações marinhas, ocorridas durante transgressões marinhas no quaternário, principalmente no Holoceno (RIBEIRO, 1991).

O sistema aquífero quaternário também apresenta importância hidrogeológica em áreas localizadas e restritas, principalmente ao longo do litoral, onde é explorado através de poços rasos, perfurados a trado manual ou perfuratrizes mecânicas de pequeno porte, e poços amazonas (cisterna), visando geralmente o abastecimento doméstico, com destaque para as casas de veraneio, residências com renda modesta e residências rurais. Os poços tubulares que alcançam maiores profundidades, em relação às

cisternas ou poços a trado, são, em sua maioria, de natureza mista, ou seja, captam água nestas coberturas e no meio fissural sotoposto.

Trata-se de um sistema vulnerável à contaminação em função do seu posicionamento, relativamente superficial, onde o topo da zona saturada aparece com profundidade média em torno de apenas 4m e com cobertura litológica muitas vezes arenosa. Constitui geralmente aquífero livre, de espessura reduzida, média de 9m, sendo constituído, predominantemente, por areia, silte e argila de texturas variadas, litológica e hidrodinamicamente heterogêneo, impossibilitando a identificação de valores hidráulicos que sejam representativos para esse sistema aquífero como um todo.

A disposição espacial dos sedimentos quaternários, sobrepostos a outros estratos litológicos, indica que a recarga se dá por contribuições meteóricas, a qual pode ser considerada relativamente eficiente, especialmente nos trechos mais arenosos. Também favorecem a recarga os fatos destes sedimentos estarem dispostos horizontalmente e sob elevada pluviosidade, em torno de 2.100 mm/ano. Além das contribuições das águas meteóricas é de se considerar eventuais contribuições de águas vazadas do sistema regular de abastecimento, bem como de águas residuárias, nas áreas com deficiência de redes de esgoto, notórias em muitas cidades brasileiras. A disposição espacial dos sedimentos quaternários também indica que estes sedimentos trabalham como aquíferos de passagem para os mananciais sotopostos. A eficiência dos processos de geodepuração depende da espessura e granulometria da zona vadosa, sendo que esta eficiência varia na proporção direta da espessura e do conteúdo de argila.

Com relação ao sentido do fluxo, é de se esperar que esteja orientado no mesmo sentido dos estratos sotopostos, ou seja, acompanha o fluxo determinado pelo embasamento cristalino ou Grupo Ilhas, considerando que os depósitos quaternários aparecem sobrepostos a ambos.

2.2. Qualidade das Águas Subterrâneas do Município de Salvador

Os estudos de Guerra e Nascimento (1999), sobre o grau de comprometimento das águas do aquífero freático de Salvador, reportam que a ação antrópica se manifestou nas águas subterrâneas através da alteração de parâmetros físicos, químicos e biológicos, tais como: cor, turbidez, odor, metais pesados, hidrocarbonetos de petróleo, como o BTEX (benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos), além da presença de coliformes fecais e totais. Esses pesquisadores encontraram que em 93 % dos pontos investigados, as águas subterrâneas apresentaram algum tipo de contaminação, especialmente nos trechos mais rasos, já possuindo restrições para uso doméstico. Com relação à contaminação biológica, ou a contaminação mais recorrente em toda área, os coliformes fecais aparecem em 44,3% dos pontos amostrados e os coliformes totais em 83%. Dentre os metais pesados investigados, foram encontrados o chumbo, ferro e mercúrio.

Os vetores de contaminação apontados foram os esgotos domésticos, os resíduos sólidos e vazamentos em postos de venda de combustíveis, dentre outros. A presença do BTEX decorre da influência direta ou indireta dos postos de combustíveis e garagens de ônibus/caminhões. O chumbo e o mercúrio, que possuem correlação com os sulfatos, podem estar associados aos defensivos e fertilizantes agrícolas, e baterias e pilhas elétricas abandonadas. O ferro encontrado, mais acentuado nas águas do cordão arenoso litorâneo, principalmente em alguns poços existentes no Bairro da Pituba, tem, em boa parte, origem natural.

Continuando os estudos, Nascimento (2002) investigou a qualidade da água do aquífero freático nas bacias dos rios Lucaia e Baixo Camarujipe. Ele reportou os componentes maiores (Ca, Mg, Na, K, Cl, HCO₃, SO₄) dentro dos padrões normais de potabilidade, e do ponto de vista hidroquímico, as águas são de natureza cloretada sódica-cálcica (67%) e, secundariamente, cloretadas-bicarbonatadas sódicas (22%). Entretanto, os nitratos e os fosfatos, oriundos dos esgotos domésticos e urbanos e de prováveis fossas sépticas, foram elementos com alteração. O fosfato estaria ligado a contaminações de fezes e sabões/saponáceos oriundos das residências domésticas.

Os estudos de Gois et al. (2012) analisou a qualidade microbiológica da água subterrânea das soluções alternativas coletivas (SAC) para abastecimento de água potável em Salvador, sob fiscalização da Vigilância em Saúde Ambiental (VISAMB) do município. Tendo como referência o padrão de potabilidade da Portaria nº 518/2004 do Ministério da Saúde, os pesquisadores reportam que, em 2008, das 142 amostras analisadas, 48% estavam fora do padrão; em 2009, das 143 amostras analisadas, 38% estavam fora do padrão e; em 2010, das 100 amostras analisadas, 54% estavam fora do padrão. Os autores agregam que estes resultados fora do padrão podem estar relacionados com o fato dos rios urbanos da cidade de Salvador terem se transformado em canais de esgotos, além dos tipos de aquíferos da cidade poderem permitir a captura de água contaminada por esgotos pelos poços de abastecimento.

Depreende-se que, no Município de Salvador, a qualidade das águas subterrâneas nos trechos dos aquíferos fissurais do cristalino, em que os processos geodepurativos não são eficientes, devem refletir a qualidade das águas lançadas sobre o solo e subsolo. Nos vales e baixadas, nas épocas chuvosas as drenagens tornam-se influentes nos aquíferos devido à súbita elevação dos seus níveis, com risco real de contaminação dos mananciais subterrâneos pela má qualidade dos deflúvios escoados da zona urbana e concentrados nos vales, onde fluem como se fossem esgotos a céu aberto. E nas áreas de relevo elevado, e em condições favoráveis à geodepuração, a qualidade das águas subterrâneas é melhor. Por exemplo, na fonte Santa Luzia, localizada ao pé da escarpa da falha de Salvador sob a região do Centro Histórico, em atividade desde o Século XVI, Tourinho (2008) observou que a qualidade da água estava em conformidade com os padrões da Resolução CONAMA 357/2005. O cloreto, nitrato, DBO e os coliformes termotolerantes associado à esgotos, todos

apresentaram concentração inferior aos limites máximos preconizados. Esses indicadores, favoráveis à qualidade da água, remetem à capacidade de geodepuração do meio regolítico, de relevante conteúdo argiloso.

2.3. Cálculo da Vulnerabilidade dos Aquíferos de Salvador pelo Método GOD

A vulnerabilidade GOD refere-se à vulnerabilidade intrínseca, ou “natural” dos aquíferos utilizando parâmetros propostos por Foster et al. (2006), devidamente adaptados às características do subsolo de Salvador. Para o cálculo da vulnerabilidade dos aquíferos, atribui-se uma valoração ao parâmetro G (grau de confinamento do aquífero), ao parâmetro O (tipo litológico da camada de cobertura) e ao parâmetro D (espessura da zona vadosa), os quais são agregados por um fator multiplicativo preconizado pelo método. Foram desconsideradas no cálculo, as alterações antrópicas (de relevo por cortes e/ou aterros em obras de construção civil) ocorridas posteriores à elaboração do mapa topográfico e do mapa geológico utilizados para a construção do presente trabalho.

O Quadro 1 apresenta os resultados da aplicação do índice GOD nos diversos cenários hidrogeológicos do Município de Salvador e as respectivas classes de vulnerabilidade natural determinadas, como apresentados em Marques (2012).

Quadro 1. Classes de Vulnerabilidade Para os Aquíferos de Salvador utilizando o método GOD. Fonte: Marques (2012)

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 siltosa/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 siltosa/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 siltosa/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 siltosa/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 siltosa/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 siltosa/arenosa	0,8	0,4	0,8	0,256	Baixa
	10 a 20	Argila	0,8	0,3	0,8	0,192	Baixa
	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 siltosa/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

2.4. Mapa e Descritivo da Vulnerabilidade GOD dos Aquíferos de Salvador

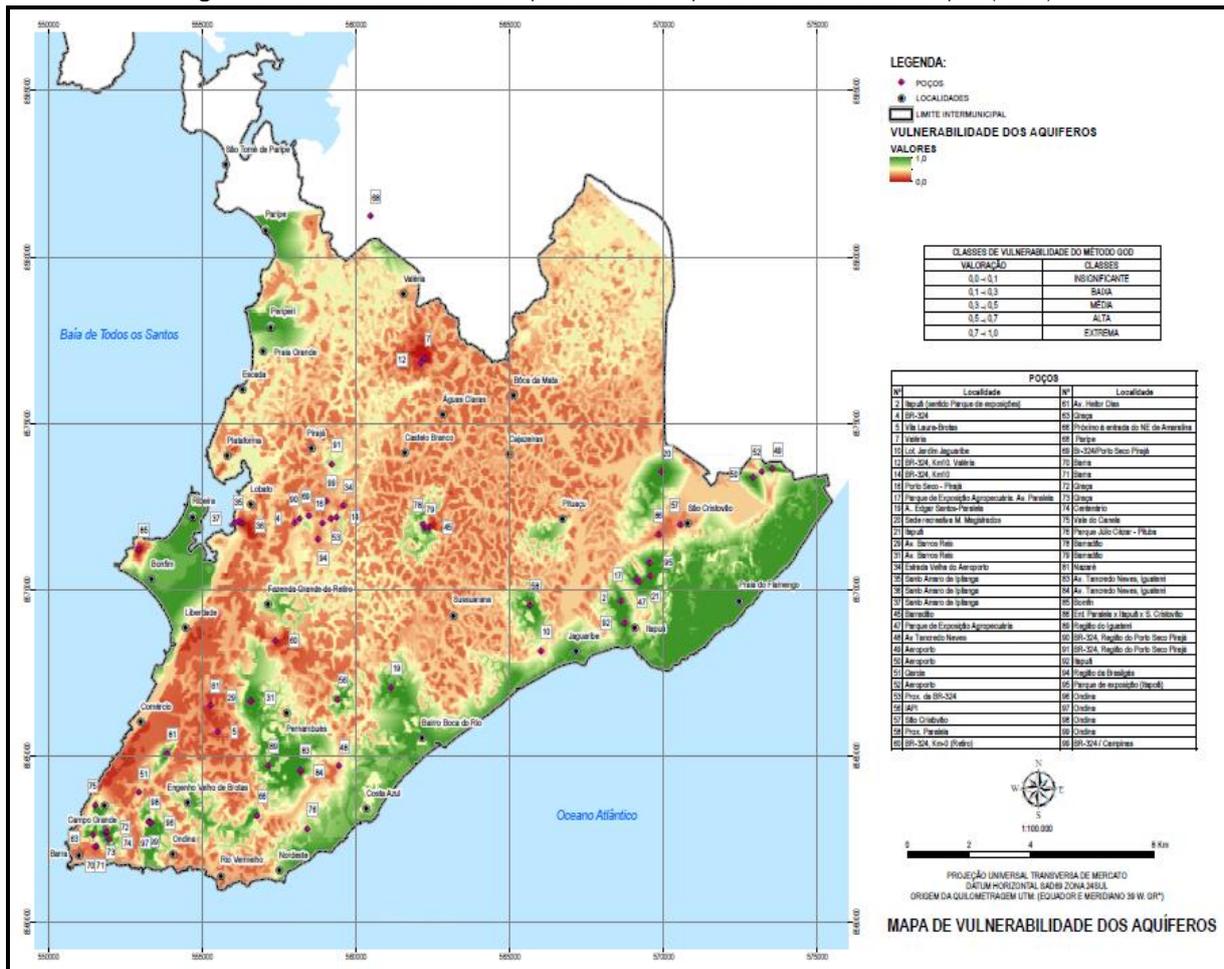
O mapa de vulnerabilidade GOD dos aquíferos do Município de Salvador, construído por Marques (2012) está mostrado na Figura 1.

Para construir o Mapa de Vulnerabilidade GOD, foi necessário a elaboração de nove (9) mapas distintos, apresentados em Marques (2012), relativos aos parâmetros de vulnerabilidade do método: Mapa de Topografia do Terreno; Mapa do Modelo Digital do Terreno – MDT; Mapa de Hidrografia e o Mapa de Espelhos d’Água; Mapa do Modelo Digital de Elevação da Superfície Saturada do Aquífero – MDSA; Mapa de Profundidade da Superfície Saturada do Aquífero; Mapa do Grau de Confinamento dos Aquíferos; Mapa Geológico do Município de Salvador (compilado do PERH 2005); Mapa de Características Litológicas da Zona Vadosa. Para construção do mapa de Vulnerabilidade, efetua-se a multiplicação das imagens do Grau de Confinamento dos Aquíferos; Características Litológicas da Zona Vadosa; e Profundidade da Superfície Saturada do Aquífero através da ferramenta Raster Calculator do ArcGIS

O mapa de Vulnerabilidade dos Aquíferos do Município de Salvador (Figura 1) mostra uma variação de 0,0 à 1,0, correspondendo aos 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.

No geral, a Figura 1 mostra que na faixa central da península, com relevo mais elevado e argiloso, predomina vulnerabilidade baixa. Na faixa oriental, a vulnerabilidade predominante aumenta à medida que se aproxima do litoral. Na faixa ocidental, na região da Bacia Sedimentar do Recôncavo, a vulnerabilidade aparece em correspondência com o relevo, sendo baixa nos trechos deprimidos e alta nos trechos mais elevados.

Figura 1 – Vulnerabilidade GOD dos Aquíferos do Município de Salvador. Fonte: Marques (2012)



Estão descritos à seguir, por faixa de valores da vulnerabilidade GOD, as características do aquífero e do terreno, e a respectiva distribuição geográfica.

Vulnerabilidade extrema, (0,7 - 1,0): aquífero livre e superfície freática com profundidade <3m, associadas aos aquíferos granulares formados por rochas sedimentares, bem como cristalinas decompostas, nos trechos de relevo baixo. Nessa faixa, as águas subterrâneas encontram-se sob extremo risco de contaminação, relacionado à elevada vulnerabilidade natural dos aquíferos. Só é possível evitar a contaminação evitando-se a disposição da carga contaminante. Portanto, essas áreas não são indicadas para instalação de empreendimentos urbanos com potencial poluidor, como: indústrias; postos de gasolina; assentamentos urbanos utilizando fossas sépticas ou lagoas de decantação; postos de serviços sem controle para resíduos oleosos; dentre outros. Essa condição de vulnerabilidade se verifica ao longo da costa oriental do município, desde o extremo norte, correspondentes aos bairros da Praia do Flamengo, Itapoan e até próximo ao bairro de São Cristóvão, e seguem bordejando o oceano Atlântico numa faixa praticamente contínua até o bairro de Amaralina, na altura do forte de mesmo nome; ao longo dos terraços arenosos e campos de dunas que se estendem pelos bairros da Boca do Rio, Stiep, Costa Azul e Pituba; ao longo das drenagens, vales e demais áreas deprimidas difusas pela cidade, formando os aluviões fluviais, notórios nas avenidas Vasco da Gama, ACM, Juracy Magalhães Júnior e outras. Também nas partes mais rebaixadas do relevo ao longo da costa da Baía de Todos os Santos, especialmente nas partes baixas dos bairros do Bonfim; Ribeira; Periperi e Paripe. Nessas áreas, é comum a captação de água subterrânea para usos diversos, inclusive abastecimento doméstico, através de poços perfurados manualmente ou a trado manual.

Vulnerabilidade alta, (0,5 - 0,7): aquífero livre; superfície freática com profundidade entre 3-20m; e zona vadosa constituída por litologia inconsolidada e arenosa, associadas aos aquíferos granulares, em relevo levemente a medianamente elevado. Essa espessura de zona vadosa, sem a presença de litologia argilosa, coloca a água subterrânea sob alto risco de contaminação, na presença de vetores de contaminação dispostos no terreno. O risco está diretamente relacionado à vulnerabilidade natural do aquífero e só é possível evitar a contaminação evitando-se a disposição da carga contaminante. Nas regiões com essa faixa de vulnerabilidade é comum a exploração de água subterrânea, incluindo para uso doméstico, através de poços rasos perfurados manualmente, ou executados através de equipamentos mecânicos, nos aquíferos mais profundos. Devido à vulnerabilidade, essas áreas também não são indicadas para instalação de empreendimentos urbanos com potencial poluidor.

Vulnerabilidade média, (0,3 - 0,5): corresponde à três tipos de aquíferos: (i) aquífero semi-confinado com superfície freática entre 3-20m de profundidade e zona vadosa com litologia arenosa; em geral associadas ao aquífero sedimentar do Grupo Ilhas, situados em cotas medianamente elevadas ou elevadas que ocorrem na região da cidade baixa nos bairros do Bonfim, Ribeira e outros; (ii) aquífero livre-coberto; com superfície freática situada entre 20-50m de profundidade; e zona vadosa constituída por litologias arenosas; que ocorrem em cotas medianamente elevadas ou elevadas nos bairros da Pituba, Boca do Rio, Itapoan, proximidades do aeroporto e outros; (iii) aquífero livre-coberto; com superfície freática 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.

Vulnerabilidade baixa, (0,1 - 0,3): corresponde à sete tipos de aquíferos: (i) aquífero semi-confinado com teto de profundidade acima de 20m, e zona vadosa constituída por litologias arenosas do Grupo Ilhas, em relevo levemente elevado a elevado, que ocorrem na região do bairro do Bonfim até o subúrbio ferroviário; (ii) aquífero semi-confinado com teto de profundidade entre 3 - 50m e zona vadosa de litologia areno-argilosa, em geral associadas aos aquíferos intergranulares silto/areno-argilosos, do Grupo Ilhas, em relevo levemente elevado a elevado em bairros erguidos na região do Bonfim, Ribeira até o subúrbio ferroviário; (iii) aquífero semi-confinado com teto de profundidade entre 3-20m e zona vadosa constituída por litologia argilosa, associadas aos aquíferos intergranulares argilosos do Grupo Ilhas, em relevo levemente a medianamente elevado em bairros erguidos na região Calçada, Bonfim, Ribeira até o subúrbio ferroviário; (iv) 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; (v) 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; (vi) 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; (vii) aquífero livre-coberto com superfície freática situada entre 3-50m de profundidade e zona vadosa constituída por litologia argilosa, associadas aos aquíferos intergranulares formadas por rochas sedimentares e/ou cristalinas-decompostas, argilosas, em relevo levemente elevado a elevado. Nessas condições o risco de contaminação das águas subterrâneas é baixo. Se o aquífero é confinado, ocorre um estrato impermeável como teto dos mananciais que atenua e/ou impede o acesso de contaminantes dispostos no terreno para o mesmo. Se o aquífero é semi-confinado a vulnerabilidade é baixa também por causa de uma cobertura relativamente menos permeável, que atenua e/ou impede o acesso de contaminantes até os mananciais. Se o aquífero é livre-coberto, tanto a espessura de 50m da zona vadosa de composição arenosa, a espessura acima de 20m de conteúdo areno-argiloso, ou a espessura de apenas 3m, composta por argilas, justificam a vulnerabilidade baixa porque trabalham protegendo o aquífero. A captação de água subterrânea nessas condições é feita através de poços tubulares perfurados com equipamentos mecânicos de médio ou grande porte.

Vulnerabilidade insignificante, (0,0 - 0,1): corresponde à cinco tipos de situações: (i) ausência de aquíferos, geralmente associado à região do Complexo Cristalino sem fraturas, ou trechos argilosos em sedimentos do Grupo Ilhas; (ii) aquífero confinado com teto acima de 3m de profundidade, e zona vadosa constituída por litologia argilosa, associada aos sedimentos do Grupo Ilhas, em relevo levemente elevado a elevado, em bairros erguidos na região do Bonfim, subúrbio ferroviário e outros. (iii) aquífero semi-confinado com teto acima de 50m de profundidade e zona vadosa constituída por litologias areno-argilosas,

associadas ao Grupo Ilhas, em relevo elevado; (iv) aquífero semi-confinado com teto entre 20-50m de profundidade e zona vadosa constituída por litologias argilosas, associadas aos aquíferos sedimentares em relevo medianamente elevado a elevado; (v) 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, em relevo elevado.

Na condição de aquífero confinado o risco de contaminação das águas subterrâneas é insignificante, pela existência de um estrato impermeável como teto dos mananciais, ainda que sotoposto a camadas arenosas, impedindo o acesso de contaminantes originados da superfície e/ou subsuperfície aos mananciais. No caso dos aquíferos semi-confinados a vulnerabilidade é insignificante também porque se pressupõe a existência de uma cobertura relativamente impermeável com espessura superior a 50m, no caso de composição areno-argilosa, ou superior à 20m, no caso de composição argilosa, impedindo o acesso de contaminantes até os mananciais. No caso dos aquíferos livre-cobertos, a espessura de 50m da zona vadosa, de matriz argilosa, justifica a vulnerabilidade insignificante porque trabalham protegendo o aquífero.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Cálculo das Reservas Hídricas Subterrâneas Não-Potáveis no Município de Salvador

Os aquíferos com reservas hídricas não potáveis estão associados aos trechos urbanizados da cidade, onde encontram-se instaladas fontes potenciais de contaminação e foram mapeados como vulnerabilidade GOD alta e extrema. Esses aquíferos estão posicionados geralmente nos trechos deprimidos do relevo, representados pelos vales e baixadas, nos quais a superfície saturada dos aquíferos está próxima da superfície do terreno. Também podem ocorrer nas áreas com relevo levemente a medianamente elevado, mas com zona vadosa formada por litologias arenosas. São geralmente aquíferos de natureza livre, com zona vadosa de espessura inferior a 3m, composta geralmente por litologia inconsolidada sedimentar e/ou cristalino-decomposta. Por outro lado, os aquíferos podem ter zona vadosa com espessura de até 20m, mas constituída por areais inconsolidados. Em ambas as situações a condutividade hidráulica favorece a infiltração relativamente rápida das águas, indicando que os processos relacionados com a geodepuração não são plenos.

Este trabalho quantificou, de modo aproximado, o volume das reservas hídricas não potáveis existente no Município de Salvador. O cálculo das reservas hídricas não potáveis foi aproximado devido à inexistência de pesquisas primárias em campo; de ensaios técnicos de campo; de levantamento de informações hidrogeológicas precisas; ou de análises laboratoriais, não permitindo, portanto, estimar com precisão os volumes parciais e total das reservas hídricas não potáveis. Outrossim, o volume das reservas subterrâneas do meio fissural, relativas às fraturas do embasamento cristalino inalterado, não puderam ser consideradas porque as informações coletadas são insuficientes.

Para estimar a ordem de grandeza representativa do volume das reservas hídricas não potáveis, tornou-se necessário assumir as seguintes condições: (i) as reservas hídricas não potáveis encontram-se armazenadas nos aquíferos porosos, incluindo o manto de decomposição do embasamento cristalino; (ii) essas reservas estão associadas às áreas com vulnerabilidade GOD alta e extrema, correspondentes aos aquíferos livres com espessura da zona vadosa inferior a 3m, independente da característica litológica, ou com espessura de até 20m, se composta por litologias puramente arenosas; (iii) os relatórios de perfuração dos poços tubulares foram considerados representativos dos aquíferos em estudo; (iv) os aquíferos das unidades sedimentares foram considerados de natureza livre e tratados como parte do manto de decomposição, com granulometria silto-areno-argilosa, pelos seguintes motivos: (a) o Mapa de Vulnerabilidade GOD identifica as áreas de vulnerabilidade alta e extrema, sem compartimentar as unidades litológicas distintas; (b) a granulometria dos sedimentos cretáceos e neogênicos, dos terrenos do Grupo Ilhas e Formação Barreiras, não apresentam diferenciações relevantes, em comparação com a do manto de decomposição, predominando as frações silto-areno-argilosas; (c) a granulometria dos sedimentos quaternários, que varia desde areia fina/média, caso das dunas e dos terraços arenosos, a areno-argilosa, caso dos aluviões fluviais, apesar de diferenciar-se do manto de decomposição, será igualmente tratada como sendo areno-argilosa, assumindo, portanto, uma granulometria menos permeável, que deverá refletir um resultado mais conservador no cálculo da estimativa das reservas.

Para estimar o volume das reservas hídricas não potáveis para os aquíferos livres porosos foi feita a multiplicação das seguintes grandezas: extensão das áreas mapeadas como vulnerabilidade GOD alta e extrema x espessura média da zona saturada dos aquíferos porosos x rendimento específico (Sy). A seguir é detalhado o procedimento para obtenção de cada grandeza e os resultados obtidos.

3.1.1. Extensão das Áreas de Vulnerabilidade Alta e Extrema

A extensão dessas áreas foi estimada a partir do Mapa de Vulnerabilidade Alta e Extrema (Figura 2), e correspondeu à aproximadamente $35,8 \times 10^6$ m².

3.1.2. Espessura Média das Áreas de Vulnerabilidade Alta e Extrema

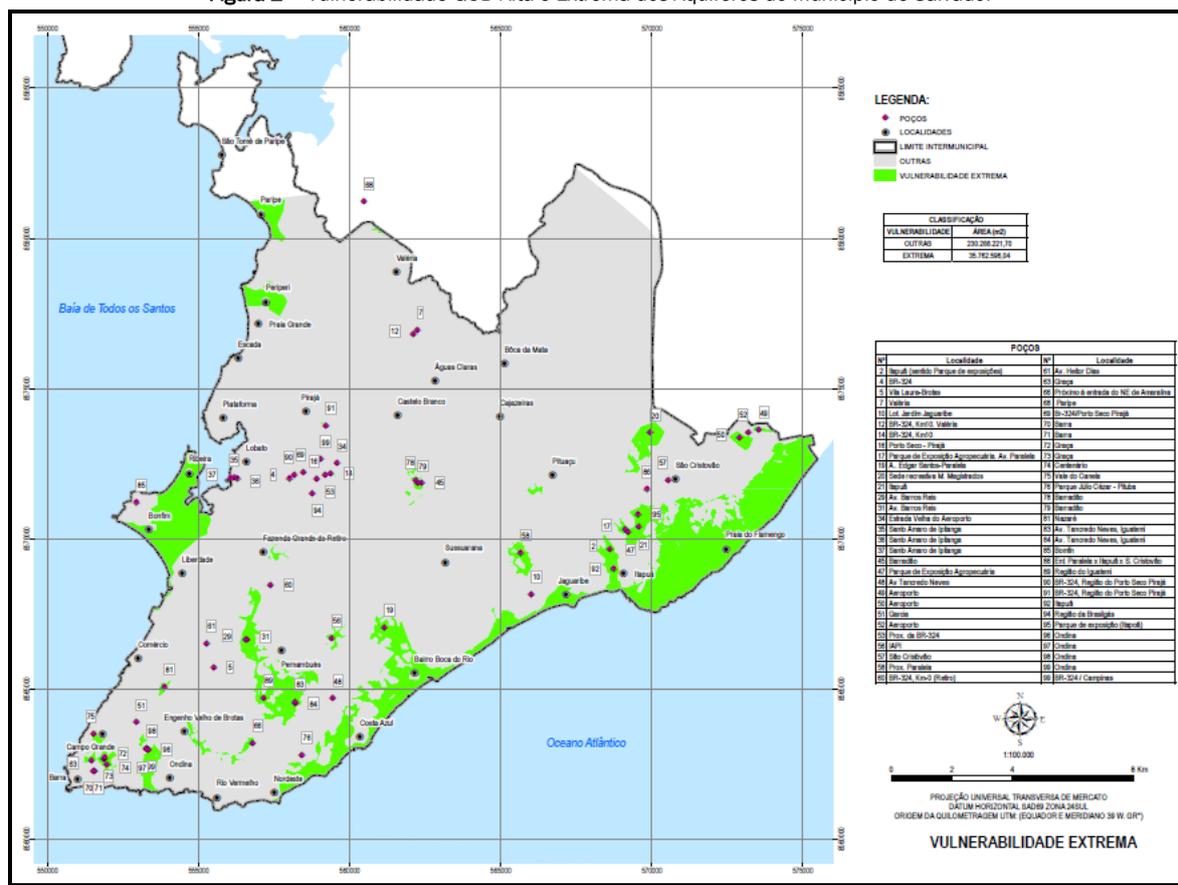
O Quadro 2 apresenta os valores da espessura da zona saturada dos aquíferos porosos não potáveis, na região do manto de decomposição do Complexo Cristalino, bem como dos sedimentos da Formação Barreiras e dos sedimentos Quaternários. Os dados relativos aos aquíferos do Grupo Ilhas não estão contemplados no Quadro 2, porque dos relatórios de perfuração dos

poços construídos neste compartimento geológico, apenas três foram considerados nesse trabalho, e correspondem a poços perfurados em relevo elevado, que não representa o conjunto de poços deste compartimento.

Observa-se no Quadro 2, que os valores da média e da mediana da espessura da zona saturada no Cristalino decomposto são respectivamente, 11,44 e 11,50m; e nos sedimentos Quaternários são de, respectivamente, 6,45 e 7,11m. Na Formação Barreiras um único dado é reportado.

Assim sendo, neste trabalho, optou-se por considerar o valor médio da espessura da zona saturada destes aquíferos, como a média de todos os poços, ou seja, 11,20m. Esse mesmo valor foi também atribuído à zona saturada não potável dos aquíferos formados pelos sedimentos cretáceos do Grupo Ilhas, por insuficiência de informação.

Figura 2 – Vulnerabilidade GOD Alta e Extrema dos Aquíferos do Município de Salvador



Quadro 2. Espessura da Zona Saturada Não Potável nos Aquíferos de Vulnerabilidade Alta e Extrema do Município de Salvador

Nº Poço CERB/CPRM	Espessura (m)			Litologia	
	1 - Profundidade da base do aquífero poroso ou topo da rocha sã	2 - Zona Vadosa ou profundidade do NE	Zona saturada = (1-2)		
3_2311	14,50	-	14,50	Cristalino Decomposto	
3_2312	14,00	-	14,00		
1_1471	14,70	0,49	14,21		
3_2267	12,00	0,50	11,50		
1_1439	24,00	0,73	23,27		
3_2306	17,00	1,00	16,00		
3_2295	4,00	1,05	2,95		
1_674	11,80	1,08	10,72		
1_3414	17,50	1,26	16,24		
3_2310	5,50	1,50	4,00		
3_2563	5,50	1,50	4,00		
1_803	5,50	1,70	3,80		
1_1408	7,00	2,20	4,80		
2_2319	16,50	2,50	14,00		
3_2277	8,30	2,55	5,75		
3_2309	11,50	2,60	8,90		
3_2313	15,30	2,60	12,70		
1_5626	33,60	2,87	30,73		
3_2269	16,00	3,00	13,00		
3_2272	7,00	3,00	4,00		
3_2282	13,00	3,00	10,00		
3_2289	20,00	3,00	17,00		
3_2290	15,00	3,00	12,00		
3_2291	13,00	3,00	10,00		
3_2308	11,00	3,00	8,00		
Média	13,33	1,89	11,44		
Mediana	13,00	2,20	11,50		
1_2589	37,00	3,00	34,00		Fm. Barreiras

Quadro 2. Espessura da Zona Saturada Não Potável nos Aquíferos de Vulnerabilidade Alta e Extrema do Município de Salvador

Nº Poço CERB/CPRM	Espessura (m)			Litologia
	1 - Profundidade da base do aquífero poroso ou topo da rocha sã	2 - Zona Vadosa ou profundidade do NE	Zona saturada = (1-2)	
1_3505	9,00	2,54	6,46	Sedimentos Quaternários
1_3545	10,00	1,10	8,90	
1_3629	9,00	1,25	7,75	
3_2269	6,00	3,00	3,00	
3-2271	6,80	3,60	3,20	
3-2285	17,80	8,40	9,40	
Média	9,77	3,32	6,45	
Mediana	9,00	2,77	7,11	
Média Global	13,40	2,19	11,20	

3.1.3. Cálculo do Rendimento Específico (Sy) do Aquífero

Segundo Heath (1983), o rendimento específico (Sy) de um material poroso é a água armazenada nos poros que irá drenar sob influência da gravidade, ou seja, a quantidade de água que se torna disponível em um aquífero. O Quadro 3 apresenta os valores de Sy para materiais de várias granulometrias, proposto por Johnson (1967), os quais foram também tomados como referência neste trabalho.

Quadro 3. Rendimento Específico. Fonte: Johnson (1967)

Material Inconsolidado	Rendimento Específico (Sy)		
	Mínimo	Médio	Máximo
Argila	0	2	5
Areia argilosa	3	7	12
Silte	3	8	19
Areia fina	10	21	28
Areia média	15	26	32
Areia grossa	20	27	35
Cascalho arenoso	20	25	35
Cascalho fino	21	25	35
Cascalho médio	13	23	26
Cascalho grosso	12	22	26
Areia de duna	-	38	-
Material siltoso	-	6	-
Material arenoso	-	16	-
Material cascalhoso	-	16	-

De forma bastante conservadora, foi adotado neste trabalho o valor $Sy = 5$ para representar o rendimento específico dos aquíferos considerados de vulnerabilidade alta e extrema. O valor 5 corresponde ao rendimento máximo para a argila, sendo inferior ao valor médio de Sy, tanto para a areia-argilosa como para o silte. Como já foi discutido, os sedimentos que predominam no manto de decomposição do Município de Salvador são a argila, silte e areias argilosas. Ao adotar um valor conservador para o rendimento específico, a estimativa do volume das reservas hídricas não potáveis que saturam os aquíferos porosos dos solos residuais e sedimentares em estudo, também foi feita de forma conservadora, o que é mais adequado, tendo em vista as simplificações feitas neste estudo.

3.2. Estimativa do Volume das Reservas Hídricas Subterrâneas Não-Potáveis

O Quadro 4 apresenta o cálculo da estimativa do volume das reservas hídricas não potáveis do Município de Salvador. Como pode ser observado, o resultado foi pouco mais de 20 milhões de metros cúbicos.

Quadro 4. Cálculo da Estimativa de Volume das Reservas Hídricas não Potáveis

A (m ²)	H (m)	Sy (%)	A x H x Sy (m ³)
Extensão das áreas mapeadas como vulnerabilidade GOD alta e extrema	Espessura média da zona saturada dos aquíferos porosos posicionados nestas áreas	Rendimento Específico	Valor estimado
35,8 x 106	11,20	5	20.048.000

3.3. Estimativa de Recarga das Reservas Hídricas Subterrâneas Não-Potáveis

Neste tópico foi calculada, de forma aproximada, a estimativa do volume da recarga anual das reservas hídricas não potáveis de Salvador. Conhecer o volume de recarga dos aquíferos não potáveis é importante para se determinar o volume sustentável de exploração das reservas hídricas correspondentes, ou seja, o valor máximo a ser explorado para manter as reservas hídricas com volume constante.

A recarga das reservas hídricas subterrâneas não potáveis foi definida como o volume da precipitação pluviométrica que se infiltra no solo até alcançar a zona saturada do aquífero, tendo incorporado à esta, todas as substâncias e contaminantes que foi lixiviando e diluindo no fluxo descendente. De uma forma conservadora, a recarga considerada neste trabalho refere-se apenas à contribuição pluvial, excluindo-se as contribuições das cargas hídricas residuárias oriundas do sistema de esgotamento sanitário, bem como às perdas do sistema de distribuição de água potável.

Vários estudos abordam a questão da taxa de recarga dos aquíferos a partir dos volumes de chuva incidentes sobre o terreno. Fracalossi Júnior (2001) discute resultados de simulação do comportamento da recarga em aquíferos com variações da condutividade hidráulica entre 10^{-3} m/s e 10^{-7} m/s, portanto com valores de condutividade hidráulica similares à área de estudo do Município de Salvador, indicando que, no mínimo, 85% do total infiltrado na superfície deslocam-se dos níveis superiores dos aquíferos até os exutórios mais próximos da água subterrânea na escala de tempo correspondente. Somente os restantes 15% é que atingem maiores profundidades do aquífero.

As pesquisas de Diniz Filho et al. (2010), em seus estudos de recarga do aquífero na Formação Barreiras, através de meio argilo-arenoso, reporta uma taxa de infiltração potencial nesta unidade da ordem de 33%. Também a pesquisa desenvolvida por Oliveira et al. (2012) em litologias análogas às dos aquíferos não potáveis de Salvador, encontrou taxas de recarga (21,3%; 12%; 6,6%; e 3,9%), diretamente proporcionais à intensidade do fraturamento presente nos litotipos estudados. Uma recarga de 21% correspondeu à rochas intensamente fraturadas, e recarga de 3,9% à rochas com menor grau de fraturamento.

O estudo de Lima (1999) considera elevado, o grau de fraturamento presente nas rochas cristalinas no município de Salvador, decorrentes dos repetidos estágios de deformação tectônica quebradiça. Para esse pesquisador, ao longo das fraturas se implantaram muitas drenagens naturais, rios e riachos que fluem na Região Metropolitana de Salvador, nos trechos deprimidos do terreno, onde se desenvolve o sistema de escoamento das águas superficiais, e, geralmente, abrange as áreas de vulnerabilidade alta e extrema. Além dessas observações, estes trechos mais deprimidos, vales e baixadas, apresentam um relevo pouco movimentado, que favorece a infiltração.

Para se definir a taxa de recarga utilizada neste trabalho, tomou-se os resultados de Oliveira et al. (2012) e as considerações de Lima (1999) com uma abordagem mais conservadora. A estimativa da taxa de recarga nas áreas de vulnerabilidade GOD alta e extrema do município de Salvador, foi considerada como decorrente de uma intensidade de fraturamento mediana, sendo adotado o valor de 12% para a taxa de recarga dos recursos hídricos não potáveis nos aquíferos em Salvador. Ou seja, 12% do volume total das águas pluviais que incidem sobre as áreas mapeadas com vulnerabilidade GOD, alta e extrema, alcançam a zona saturada dos aquíferos, incorporando-se às reservas não potáveis.

Assim, para o cálculo da recarga dos aquíferos não potáveis do Município de Salvador, foram assumidos os seguintes parâmetros: (i) a pluviometria média para o Município foi adotada como sendo de 2090 mm/ano, de acordo com SEI (1999); (ii) a carga pluvial considerada é a que incide diretamente sobre a área mapeada como vulnerabilidade alta e extrema, excluída a carga aportada por escoamento superficial a partir de relevo mais elevado; (iii) e somente 12% da carga pluvial incidente se incorpora à zona saturada dos aquíferos. De acordo com essas condições, o cálculo da estimativa do volume anual de recarga está apresentado no Quadro 5, tendo sido estimada em quase nove milhões de m³/ano. Ou seja, se os aquíferos não potáveis forem explorados na razão de nove milhões de m³/ano, as suas reservas hídricas permanecem com o volume em equilíbrio.

Quadro 5. Estimativa do volume anual de recarga não potável nos aquíferos de Salvador

1. Área com vulnerabilidade alta e extrema (m ²)	2. Volume pluvial anual por metro quadrado (m)	3. Percentual do volume infiltrado	1x2x3 = Volume anual de recarga (m ³)
35.762.596,04	2,09	12%	8.969.259,09

4. CONCLUSÕES

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.

Os mananciais hídricos subterrâneos potencialmente não potáveis correspondem aos que se encontram sob risco de poluição devido à vulnerabilidade alta e extrema e proximidade de fontes potenciais de contaminação, decorrentes das atividades antrópicas instaladas.

As áreas de vulnerabilidade alta e extrema correspondem àquelas em que o aquífero é livre e o topo da zona saturada se encontra com profundidade inferior a 3m, indicando proximidade da superfície, ou com profundidade inferior a 20m, mas sotoposta a litologias inconsolidadas e arenosas, com reflexo negativo na eficiência dos processos da geodepuração pela zona vadosa, fragilizando as reservas subterrâneas ante os riscos de contaminação.

As áreas de vulnerabilidade alta e extrema coincidem com os trechos mais deprimidos do relevo, representados pelos vales e baixadas, em cujos talvegues desenvolvem-se o sistema natural de escoamento das águas superficiais, utilizadas no município como corpos receptores das águas pluviais e residuárias, ou os trechos medianamente elevados, mas com zona vadosa constituídas puramente por areias

O cálculo do volume das reservas hídricas subterrâneas não potáveis do Município de Salvador, armazenadas nos aquíferos porosos de vulnerabilidade alta e extrema, foi estimada, de forma conservadora e aproximada, em 20 milhões de m³.

A estimativa do volume anual de recarga dos aquíferos não potáveis foi estimado em nove milhões de m³, com base numa taxa anual de recarga de 12% das precipitações pluviométricas sobre as áreas mapeadas como vulnerabilidade GOD alta e extrema.

O mapa de vulnerabilidade dos aquíferos mostrou-se como uma importante ferramenta para se conhecer as áreas com risco potencial de fornecimento de água subterrânea não potável, e para proteção do usuário do recurso hídrico subterrâneo.

REFERÊNCIAS

ACCIOLLY, P.C.V. Evolução Quaternária e Dinâmica Atual da Planície Costeira de Arembépe, Litoral Norte do Estado da Bahia. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, 105p, 1997.

AFONSO, M.J.; PIRES, A.; CHAMINÉ, H.I.; MARQUES, J.M.; GUIMARÃES, L.; GUILHERMINO, L.; ROCHA, F.T. Aquifer vulnerability assessment of urban areas using a gis-based cartography: Paranhos Groundwater Pilot Site, Porto, Portugal. 33rd International Geological Congress. p. 259-278, 2008.

ALMARS, M.N. Assessment of intrinsic vulnerability to contamination for Gaza coastal aquifer, Palestine. Journal of Environmental Management, 88, p.577-593, 2008.

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.

- DINIZ FILHO, J.B., MELO, J.G.; CARVALHO, A.K.N. Aspectos hidro estratigráficos da área de recarga do aquífero barreiras na ZPA1 - NATAL/RN. Anais do XVI Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, UFRN, São Luís/MA 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.
- 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. SERVIMAR, São Paulo/SP. 2006.
- FRACALLOSSI JÚNIOR, M.O Aquífero Fissural Como Fonte Hídrica Para o Abastecimento Público - Serra de Baturité - Ceará - Brasil. Dissertação de Mestrado em Geologia, Área de Concentração em Hidrogeologia - Departamento de Geologia do Centro de Ciências da Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, Outubro de 2001.
- FUGIMORI, S., ALLARD, G.O. Ocorrência de safirina em Salvador, Bahia. Sociedade Brasileira de Geologia, Bol. 15, nº2. 1966.
- 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.
- HEATH, R.C. Hidrologia básica de água subterrânea. United States Geological Survey Water Supply 2220. Dept. of Natural resources and community development. North Carolina. USA. Tradução para o português por Mario Wrege e Paul Potter, Instituto de pesquisas Hidráulicas - Universidade Federal d Rio Grande do Sul - IPH / UFRGS. 1983. 173 p.
- 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.
- JOHNSON, A.I. Specific yield – compilation of specific yields for various materials. U.S. Geological Survey Water Supply Paper 1662-D. 74 p. 1967.
- 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.
- MARQUES, J.H.S. Estudo da Vulnerabilidade dos Aquíferos do Município de Salvador, Bahia-Brasil, com Vistas à Prevenção de Poluição e Avaliação de Potencial Hídrico Não Potável. Dissertação, Mestrado Profissional em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais no Processo Produtivo Ênfase em Produção Limpa, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial – PEI, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, 163p. 2012.
- MARTIN, L., BITTENCOURT, A.C.S.P., VILAS BOAS, G.S., FLEXOR, J.M. Texto explicativo para o mapa geológico do Quaternário costeiro do Estado da Bahia - Escala 1:250.000. CPM.SME-BA. 57p. 1980.
- 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>.
- 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.
- OLIVEIRA, M.M., COSTA, A.M., FRANCES, A. Estimativa de Recarga de Águas Subterrâneas a Partir da Análise de Hidrogramas de Escoamento Superficial na Área abrangida pela Folha 6 da Carta Hidrogeológica de Portugal à Escala 1:200.000. Disponível em <http://www.lneg.pt/download/3835/19.pdf>. Acessado em julho de 2012.
- 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, L.P. Alguns aspectos dos solos da cidade do Salvador e suas relações com processos de degradação. Sociedade e Natureza, Uberlândia. Departamento de Geoquímica do Instituto de Geociências da UFBA. 1991.

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.

SACRAMENTO, M.G.P. Relação entre tipos de encostas e características das formações superficiais (Área a Nordeste de Salvador, Bahia). Departamento de Geoquímica, Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia. 1980.

SANTOS, C.P.L. Análise Geofísica das Características Hidráulicas da Falha de Salvador na Região de Arembepe-Ba. Dissertação de Mestrado do curso de Pós-Graduação em Geofísica, Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia. Salvador, 2003.

SEI - Superintendência de Estudos Econômicos e Sociais da Bahia. Balanço hídrico mensal e anual. Estação: Salvador. Período: 1961-1990. 1999.

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.

TOURINHO, A.O. Estudo Histórico e Sócio-Ambiental das Principais Fontes Públicas de Salvador. Dissertação. Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana – MEAU, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia. Salvador, BA. 2008.