



VULNERABILIDADE À CONTAMINAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DO SISTEMA DE AQUÍFERO IÇÁ/FRATURADO NORTE NA ÁREA URBANA DO MUNICÍPIO DE PORTO VELHO/RONDÔNIA

Miqueias Lima Duarte¹, Marília Locatelli², Tatiana Acácio da Silva³ e Eliomar Pereira da Silva Filho⁴

Resumo: As águas subterrâneas são fontes vitais para o suprimento das necessidades humanas. No entanto, as diversas atividades antrópicas desenvolvidas na superfície do solo têm comprometido sua quantidade e qualidade. O conhecimento das áreas com maior ou menor nível de vulnerabilidade à poluição nos aquíferos é de extrema importância para a gestão eficiente desses recursos. Este estudo visa avaliar a vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas no sistema de aquífero Içá/Fraturado Norte na área urbana do município de Porto Velho, Rondônia, e mapear as principais fontes potenciais de geração de carga contaminante. A aplicação do método GOD (Groundwater occurrence; Overall lithology of the unsaturated zone; and Depth of the water table), permitiu identificar as classes de vulnerabilidade na área. Os resultados obtidos mostram que existe uma predominância de média vulnerabilidade à contaminação (52%) distribuídas em toda área de estudo, seguida de alta vulnerabilidade (37%) ocorrendo principalmente na região central, e baixa vulnerabilidade (12%) em predominância nas regiões ONO, N e ENE. O mapeamento das principais fontes geradoras de carga contaminante, juntamente com o estudo de direção de fluxo indicou que na região central da área urbana existem locais com real risco à contaminação, em especial devido a maior quantidade de postos de combustíveis, demonstrando a necessidade de estabelecimento de medidas públicas que visem o melhor planejamento do uso das áreas de recarga, e ações voltadas à prevenção e proteção das águas subterrâneas da região.

Palavras-chave: Aquífero livre. Método GOD. Pontos de contaminação.

1 Introdução

A água constitui um recurso indispensável à vida e cadeias produtivas; ela também é reconhecidamente um recurso vulnerável, finito e já escasso em quantidade e qualidade em várias regiões do mundo, de modo que necessita ser gerida de forma a atender as demandas sociais e ambientais no presente e no futuro.

As águas subterrâneas constituem excelentes fontes para abastecimento das necessidades humanas, pois são fontes de águas mais limpas, e geralmente possuem boa qualidade por estarem protegidas naturalmente (ANA, 2010). No entanto, a utilização desordenada desses recursos juntamente com a má ocupação do solo tem comprometido sua quantidade e qualidade (FOSTER et al., 2006; LIGGETT; TALWAR 2009; TAVARES et al., 2009).

Identificar os pontos vulneráveis à contaminação de um aquífero consiste o primeiro passo para sua proteção, pois, a partir desse é possível delinear áreas de proteção, bem com traçar metas e definir critérios para seu melhor gerenciamento, mediante controle no uso e ocupação do solo, e na locação de poços em áreas adequadas (FOSTER; HIRATA; ANDREO, 2013).

Com este intuito, vários estudos sobre vulnerabilidade à contaminação de aquíferos vêm utilizando métodos indexados como prática comum em todo o mundo, nas últimas três décadas. Eles têm se tornado de fundamental importância, uma vez que permitem delinear áreas em potencial para contaminação das águas subterrâneas, bem como ajudam na definição de critérios para o uso da área nas zonas de distintas vulnerabilidades (AUGE, 2004; FOSTER et al., 2006; LINHARES et al., 2014;

¹E-mail: miqueiaseng@hotmail.com

²E-mail: marilialocatelli@yahoo.com.br

³E-mail: tatianaacacio1909@gmail.com

⁴E-mail: Eliomar@unir.br

MONTEIRO; PEIXOTO, 2013; MOURA; SABADIA; CAVALCANTE, 2016).

A avaliação da vulnerabilidade à contaminação de aquíferos pode ser intrínseca ou específica. Segundo Ribeiro (2005), a vulnerabilidade intrínseca considera unicamente as características geológicas, hidrológicas e hidrogeológicas do meio, sendo por isso, independente do tipo de poluente gerado pelas atividades antropogênicas. Por outro lado, a vulnerabilidade específica deve ser utilizada sempre que se consideram também as propriedades de um poluente específico, e as suas relações com os componentes de vulnerabilidade específica.

Para Auge (2004), a vulnerabilidade intrínseca é mais útil no planejamento do uso da terra e água, especialmente em relação à preservação da qualidade dos recursos. Já a vulnerabilidade específica inclui parcialmente o conceito de risco, pois refere-se ainda ao risco de deterioração em relação aos poluentes específicos.

Segundo Foster e Hirata (1988), a vulnerabilidade à contaminação de um aquífero é definida pela sua sensibilidade a ser adversamente afetado por uma carga contaminante imposta. Inúmeras atividades humanas podem gerar carga contaminante significativa, ainda que de maneira geral, somente alguns tipos de atividades sejam responsáveis pela maioria dos casos graves de contaminação da água subterrânea (FOSTER; HIRATA; ANDREO, 2013).

Na região norte do Brasil, apesar da grande disponibilidade de recursos hídricos superficiais, a utilização de águas subterrâneas para abastecimento público é crescente (ANA, 2010). A facilidade na exploração, bem como a boa qualidade que esses recursos geralmente possuem tem sido fator principal. No entanto, seu uso desordenado e as inadequadas formas de uso e ocupação do solo, podem comprometer sua qualidade e quantidade (TAVARES et al., 2009; CUTRIM; CAMPOS, 2010; DUARTE et al., 2016).

No estado de Rondônia, incluindo a capital do estado, 20% das sedes municipais são abastecidas exclusivamente por fontes de água subterrânea, e mais 0,09% por fontes mistas (ANA, 2010). O abastecimento de água no município de Porto Velho, capital do estado, é realizado pela Companhia de Água e Esgoto de Rondônia (CAERD). O sistema de abastecimento é do tipo misto, proveniente de corpo hídrico superficial e poços tubulares.

O crescimento desordenado no meio urbano, e conseqüentemente, o aumento de consumo de recursos hídricos proporciona o aumento da produção de esgoto e resíduos sólidos, que inadequadamente dispostos, podem afetar negativamente os recursos hídricos subterrâneos que servem para abastecimento público no município. Nesse caso, é de suma importância o desenvolvimento de estudos que visem o melhor planejamento da região.

O método GOD a ser empregado para avaliar a vulnerabilidade à contaminação do aquífero foi proposto por Foster e Hirata (1988) e modificado por Foster et al. (2006) e visa avaliar a vulnerabilidade à contaminação do aquífero de modo intrínseco.

O método GOD avalia basicamente três parâmetros, sendo eles: G (*Groundwater hydraulic confinement*) que corresponde ao grau de confinamento hidráulico, O (*Overlying strata*) a litologia das formações penetradas na zona não saturada e D (*Depth to groundwater table*) a profundidade do nível da água subterrânea.

Vários outros métodos de avaliação de vulnerabilidade de aquíferos são descritos na literatura, como o DRASTIC de Aller et al. (1987), SINTACS desenvolvido por Civita et al. (1990), EPIK desenvolvido por Doerfliger e Zwahlen (1997). O método GOD por ser um método de fácil aplicabilidade, e boa sintonia com os dados disponíveis, tem sido o mais aplicado em estudos regionais, apresentando bons resultados que tem auxiliado no melhor gerenciamento desses recursos.

O método tem sido amplamente utilizado para avaliação da vulnerabilidade em diferentes sistemas de aquíferos no Brasil, dentre eles, destacam-se os desenvolvidos por Barbosa et al. (2011), Kemerich et al. (2011), Löbler et al. (2013) e Meira, De-Campos e Pereira (2014) realizados no aquífero Guarani, Reginato e Ahtert (2013), Silvério da Silva et al. (2013) e Borba et al. (2016) no aquífero Serra Geral, Rosenberger et al. (2013), Silvério da Silva, Nascimento e Löbler (2014) e Junior, Soares e Castro (2015), no aquífero Bauru, Duarte et al. (2016) avaliaram o aquífero Aluvionar e Cutrim e Campos (2010) o aquífero Furnas.

Este estudo visa realizar uma análise da vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas na área urbana do município de Porto Velho, utilizando o método GOD, bem como mapear os principais pontos potenciais de geração de carga contaminante da área urbana.

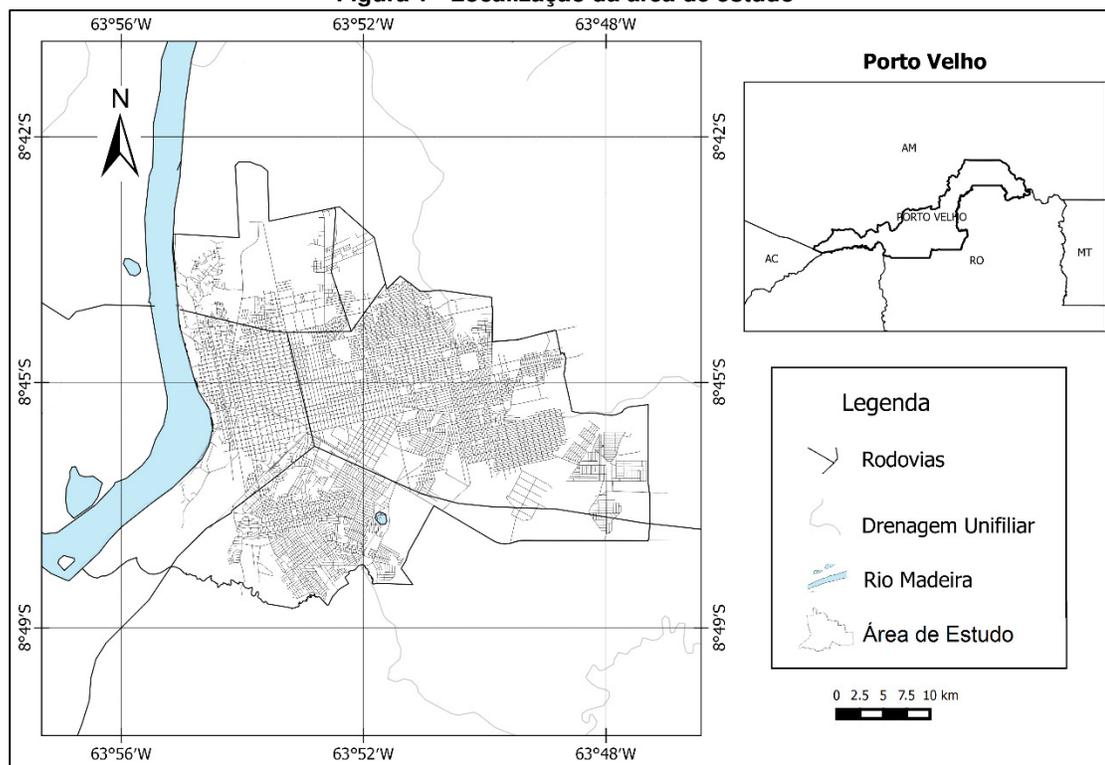
2 Metodologia

2.1 Área de estudo

A área de estudo compreende o meio urbano do município de Porto Velho, Oeste do estado de Rondônia, situada à margem direita do rio Madeira, cujas coordenadas são 8°46'17" Sul e 63°53'2" Oeste, possuindo área de 1.185,53 km². Esta área se limita com o estado do Amazonas ao norte, nordeste e noroeste; ao sul com os municípios de Candeias do Jamari e Alto Paraíso; ao oeste com o estado do Acre e Bolívia. Ao sudeste se limita com os municípios de Cujubim e Machadinho d'Oeste; a Sudoeste com os municípios de Buritis, Nova Mamoré e Alto Paraíso e a Leste com o município de Candeias do Jamari (Figura 1). Sua população, segundo IBGE (2010), é de 428.527 habitantes, sendo que o meio urbano possui uma população de 391.014 habitantes.

O clima da região segundo a classificação de Köppen, se enquadra no tipo Aw - Clima Tropical Chuvoso com média climatológica da temperatura do ar durante o mês mais frio, superior a 18°C. Possui um período seco bem definido durante o inverno astral, quando ocorre na região um moderado déficit hídrico, com índices pluviométricos inferiores a 50mm⁻¹mês. A média climatológica da precipitação pluvial é de 2.250 mm ano⁻¹, apresentando duas estações distintas, a chuvosa e a seca. O período chuvoso é compreendido entre novembro e abril no qual se registra um índice pluviométrico superior a 220 mm mês⁻¹, sendo janeiro o mês que apresenta maior índice, com média de 333,4 mm. O período seco abrange os meses de junho a agosto, com precipitações inferiores a 50 mm mês⁻¹, sendo que o mês de julho apresenta o menor índice pluviométrico, com média de 25,3 mm (SEDAM, 2012).

Figura 1 - Localização da área de estudo



Fonte: Autores (2017)

2.2 Geologia

Com respeito ao esboço geológico local, são evidenciadas 5 unidades litoestratigráficas (Figura 2), que são: Coberturas Sedimentares Indiferenciadas (NQi), Depósitos Aluvionares (Q2a),

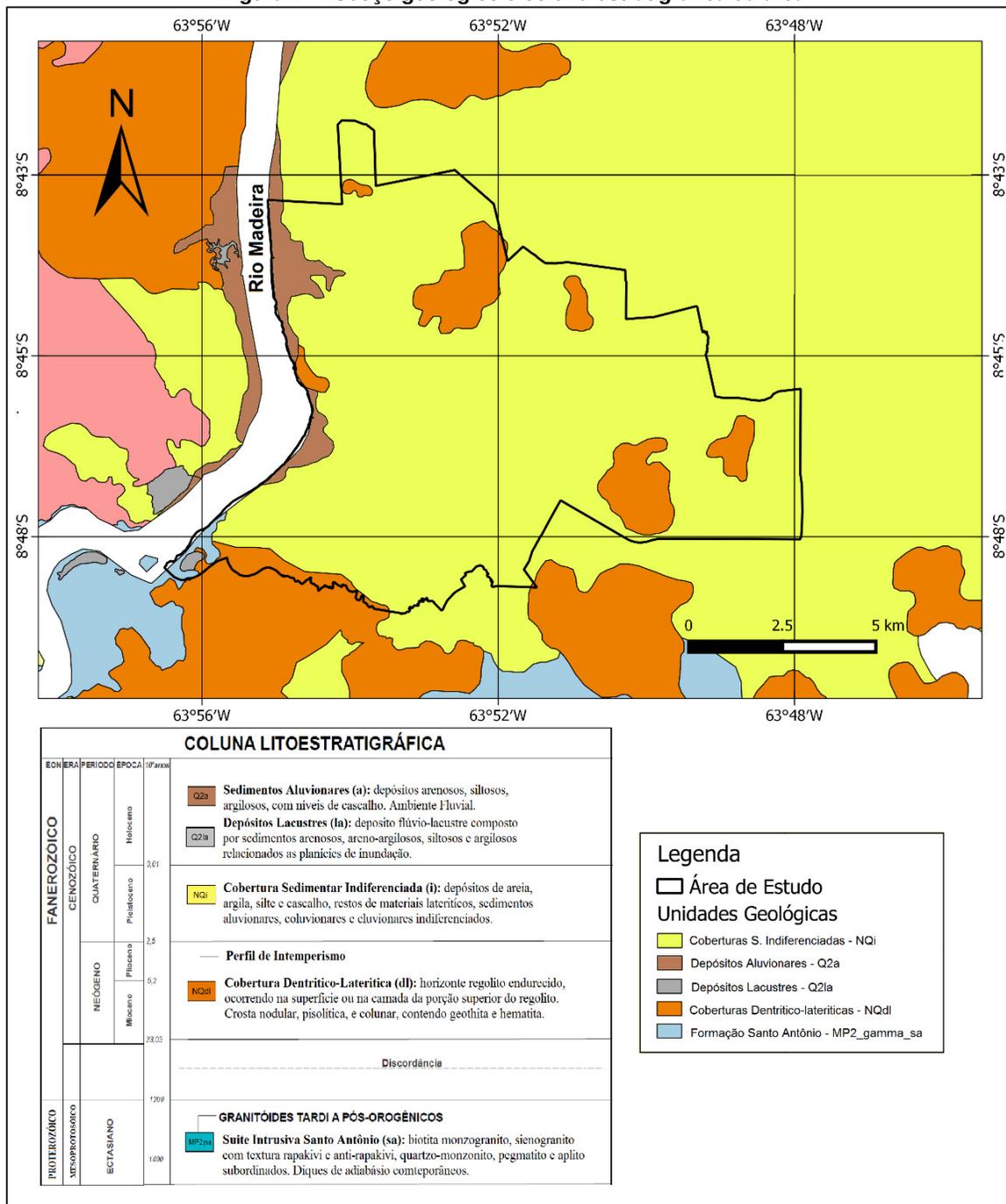
Depósitos Lacustres (Q2la), Coberturas Dentritico-lateríticas (NQdl) e Formação Santo Antônio (MP2ysa).

As NQi ocupam cerca de 85,2% da área de estudo e são constituídas por sedimentos do tipo alúvio, colúvio e/ou elúvio compostos por depósitos de areia, silte, argila

ou cascalho, bem como resquícios de materiais do tipo laterítico. Ocorrem praticamente em toda a área, na qual as

outras unidades se distribuem dispersamente (ADAMY, 2010).

Figura 2 - Esboço geológico e coluna estratigráfica da área



Fonte: Esboço geológico elaborado pelos autores do trabalho e coluna estratigráfica adaptado de CPRM (2006).

Os Q2a ocupam uma área de 2,33%, sendo descrita e representada por sedimentos arenosos e argilosos que são classificados como inconsolidados a semiconsolidados, associando-lhes níveis de

cascalho e matéria orgânica (MAIA, 2010). Bem similar a este, os Q2la ocupam uma área de 0,67%, sendo que essa unidade tem predominância de sedimentos argilosos e siltosos, maciços ou laminados, em geral com

grande quantidade de matéria orgânica. Esses depósitos têm sua origem relacionada a ambientes lacustrinos e de lagos de meandros abandonados, associados à evolução de sistemas fluviais (ADAMY, 2010).

Já as NQdl ocupam 11,2% da área de estudo, em alguns domínios dispersos das faixas leste norte, sul e oeste. São formadas por crostas lateríticas ferruginizadas e seus materiais se diferenciam dos outros materiais mais modernos em razão do seu avançado estado de endurecimento. A estrutura é colunar/concrescionário ou composta por detritos eluviados/coluviados de lateritos compostos por materiais argiloarenosos e cascalhos, cobertos por Latossolos (ADAMY, 2010).

E por fim, há a MP2ysa que ocupa 0,60% da área de estudo, sendo caracterizado como terrenos cristalinos de natureza ígnea, incluindo corpos granitóides rapakivíticos, a princípio correlacionados ao granito tipo Serra da Providência. São unidades graníticas com evidências de interação com magmas básicos constituídas por biotita Monzogranito de granulação grossa, equigranular a localmente porfirítico e Sienogranito com esparsas texturas rapakivi e anti-rapakivi; e biotita Monzogranito equigranular de granulação média, outros litotipos fazem parte do batólito, mas com dimensões reduzidas, como hornblenda-biotita-quartzo monzonito, diques pegmatíticos e aplíticos, rochas híbridas e raros diques de diabásio sin-plutônicos (ADAMY, 2010).

2.3 Hidrogeologia

Neste trabalho adotou-se a definição da ANA no que diz respeito a distribuição dos sistemas de aquíferos na área de estudo. Diante disso, ocorrem na área o aquífero Içá (livre), e o aquífero Fraturado Norte (semi-confinado) compoem a base do aquífero Içá (Figura 3).

O aquífero Fraturado Norte constitui pequena parte da região sul da área urbana (12,82%), e as demais áreas são representativas do aquífero Içá (Figura 3). O aquífero Fraturado Norte constitui-se por rochas da Formação Santo Antônio e Cobertura Detritos-Lateríticas, sendo caracterizado por um meio aquífero de caráter fissural cujas porosidades e permeabilidade se desenvolveram a partir de fraturas/falhas geológicas de natureza tectônica. O aquífero Içá constitui-se por materiais sedimentares

(aluviões), bem como alúvios e colúvios que formam solos cuja acumulação de água subterrânea os caracteriza como unidade aquífera (CPRM, 2017; SOUZA et al., 2013).

O aquífero Içá constitui maior parte da área urbana do município de Porto Velho, constituído pelas Coberturas Sedimentares Indiferenciadas, Depósitos Aluvionares e Depósitos Lacustres, o que o caracteriza como um bom produtor de água (capacidade específica dos poços $>10 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$), pois existem areias com boa porosidade e permeabilidade, com espessura variando de 45 a 50m. Por outro lado, o aquífero Fraturado Norte apresenta um baixo potencial hídrico, tendo em vista sua porosidade e permeabilidade de caráter fissural, com capacidade específica dos poços variando entre 0,5 a $1,0 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ (ANA, 2010; SOUZA et al., 2013).

Dos 56 registros de poços avaliados, apenas 8 poços estão situados no aquífero Fraturado Norte, os demais encontram-se instalados no aquífero Içá. A Figura 3 compreende uma seção hidrogeológica (A-B) elaborada a partir dos dados obtidos em dois (2) poços tubulares da região, disponibilizados pelo SIAGAS (2015) e CPRM (2017). Constata-se na seção A-B a distribuição vertical dos aquíferos Fratura Norte (na base) e Aquífero Içá sobrejacente, bem como indicação das características e espessuras dos tipos litológicos atravessados, descontinuidades/variações faciológicas laterais e verticais, estruturação das camadas.

Como visto na Figura 3, o aquífero Içá, de modo geral, apresenta uma estrutura intercalada de areia/silte/argila em sua formação, em predominância a ocorrência de areias em sua parte superior. Por outro lado, o aquífero Fraturado Norte, de modo geral, apresenta uma litologia constituída de granito/rochas intemperizadas.

2.4 Base de dados

Para obtenção dos parâmetros do método GOD foram utilizados dados de poços tubulares da área de estudo obtidos diretamente no website do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS, 2015) do Serviço Geológico do Brasil (CPRM, 2017).

No banco de dados do SIAGAS existem 776 registros de poços tubulares cadastrados no município de Porto Velho, no entanto, apenas 56 registros de poços foram

utilizados para análise, pois são os poços que abrangem a área de estudo, e possuem os registros de dados necessários para análise.

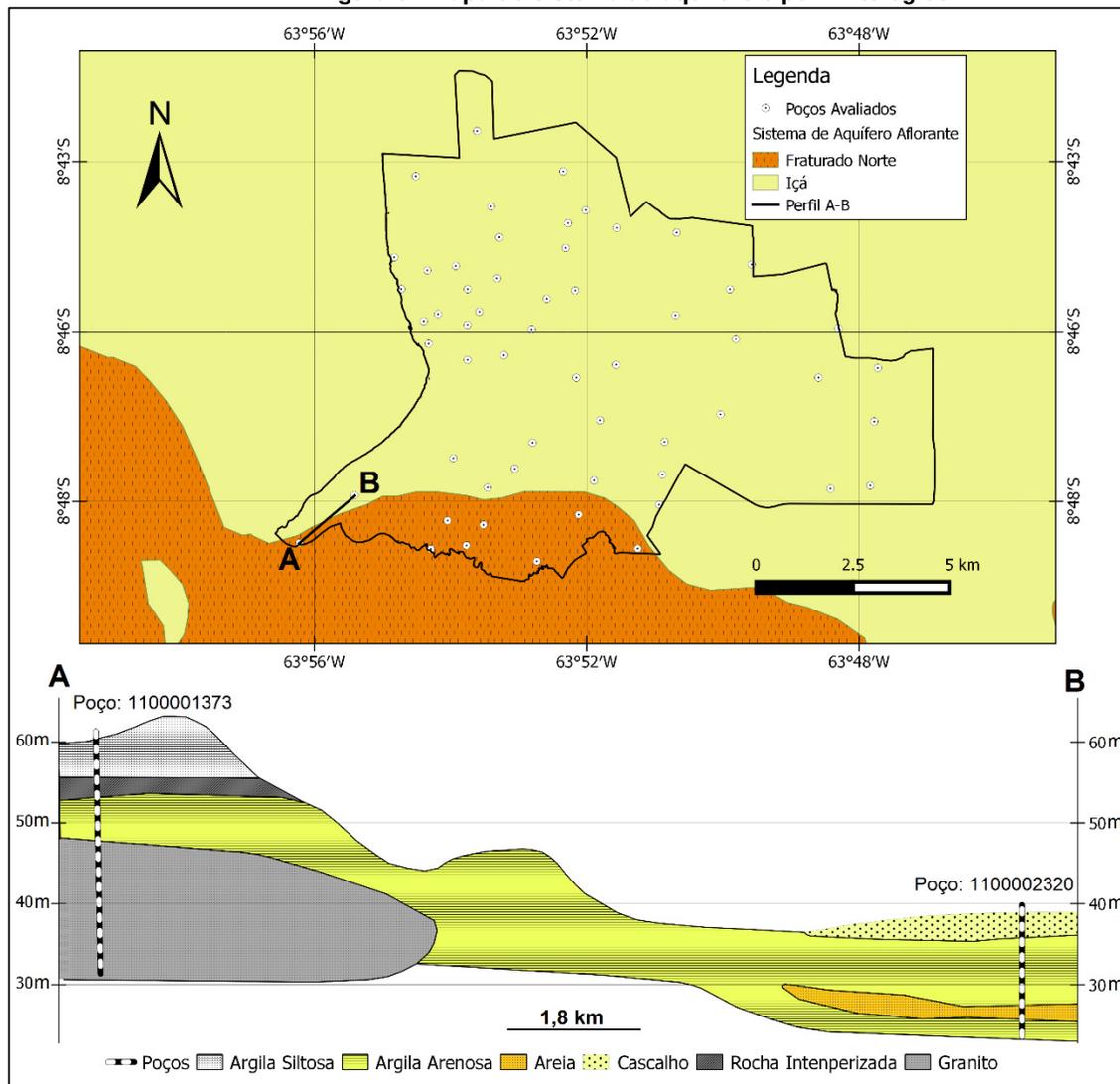
Para elaboração do mapa geológico, contou-se com dados no formato vetorial da geologia do estado de Rondônia disponível no banco de dados do GEOBANK da CPRM (2017) com escala de 1:1.000.000.

O mapa hidrogeológico foi elaborado com base em dados vetoriais de Áreas Aflorantes dos Aquíferos e Sistemas

Aquíferos do Brasil, disponível no banco de dados GEONETWORK da ANA (2017), com escala de 1:1.000.000.

A elaboração do mapa potenciométrico foi realizado com base nos dados da profundidade do nível estático (296 registros) dos poços e a elevação obtida do SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), uma vez que maioria dos registros dos poços tubulares contidos no SIAGAS não apresentavam a cota do terreno.

Figura 3 - Mapa do sistema de aquífero e perfil litológico



Fonte: Adaptado do mapa do sistema de aquífero da ANA (2017) e perfil litológico esquemático elaborado com base em dados de poços tubulares disponível no SIAGAS (2015).

2.5 Descrição e aplicação do método GOD

O método GOD proposto por Foster e Hirata (1988) e modificado por Foster et al. (2006) para avaliar a vulnerabilidade à contaminação de aquíferos baseia-se na

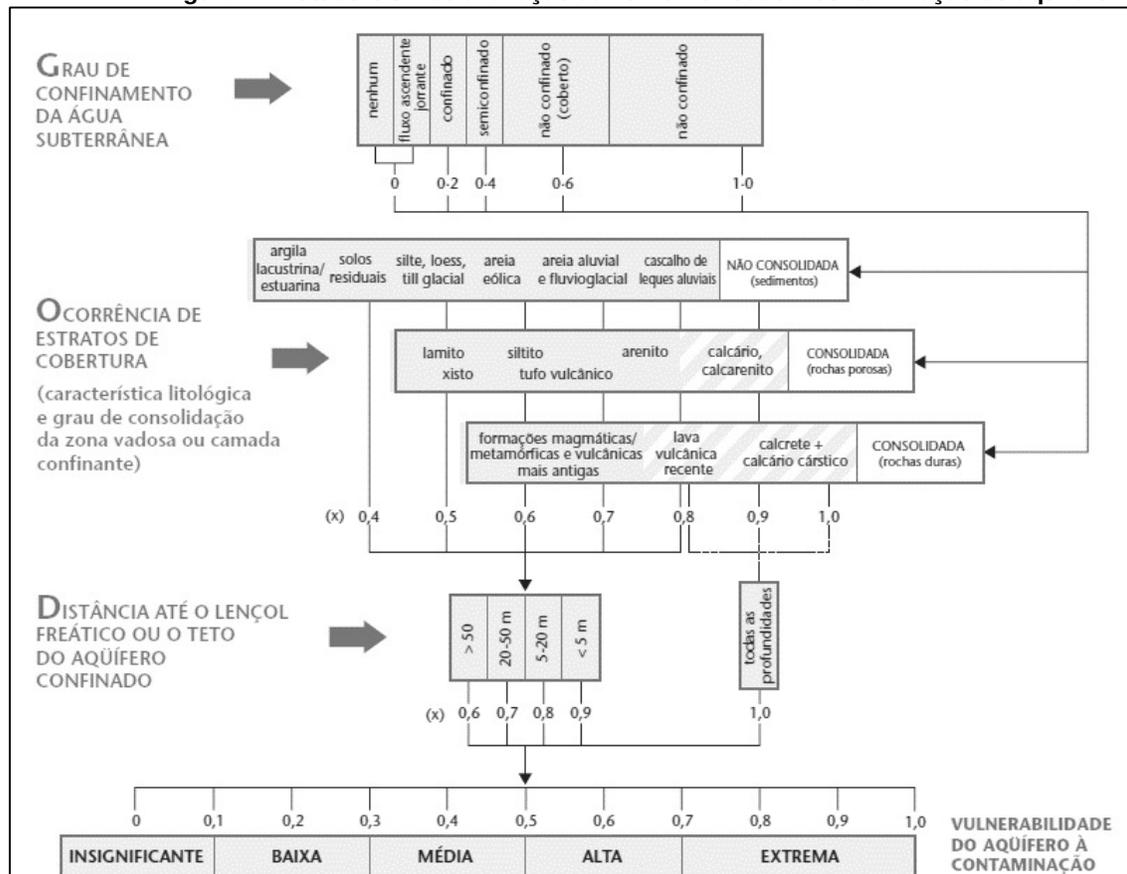
análise de três parâmetros: G (*Groundwater hydraulic confinement*), que corresponde ao grau de confinamento do aquífero que varia de 0 a 1. O (*Overlaying strata*) que corresponde ao tipo de litologia encontrada na zona não saturada que pode variar entre 0,4

a 1. E por fim, o parâmetro D (*Depth to groundwater table*) que corresponde a profundidade do nível d'água que varia de 0,6 a 1,0.

O índice final de vulnerabilidade constitui-se o produto dos três parâmetros

GxOxD, em que valores mais próximos de zero correspondem a menores índices de vulnerabilidade, e valores mais próximos de 1 correspondem a maiores índices de vulnerabilidade à contaminação do aquífero (Figura 4).

Figura 4 - Método GOD de avaliação da vulnerabilidade à contaminação do aquífero



Fonte: Foster et al. (2006)

Com a obtenção dos dados na base do SIAGAS, foi aplicado o método GOD sendo atribuído os pesos para cada parâmetro. Para o parâmetro G foi atribuído pesos de 0,6-0,9 a 1,0. Os locais que apresentaram afloramento do aquífero foram empregados maior índice (1,0), e os pontos que apresentavam cobertura menor que 5m constituída por areias foi empregado índice 0,9. E por fim, os pontos que se apresentaram como não confinado e coberto constituído por material argiloso/siltoso/arenoso com profundidade superior a 5m metros foi empregado índice 0,6.

2.6 Interpolação e confecção cartográfica

Após a obtenção dos índices do método GOD, foi realizado uma interpolação

Com respeito ao parâmetro O, os índices empregados foram 0,6-0,7 e 0,8. O índice 0,6 foi empregado para a litologia constituída em predominância de argila, seguido de areia. Já o índice 0,7 foi empregado para as litologias constituídas em predominância de areia, seguido de argila/silte. E por fim, o índice 0,8 foi empregado para os locais com apenas litologia constituída por areia ou cascalho.

Para o parâmetro D foram empregados apenas dois índices, sendo 0,8 e 0,9. O índice 0,8 foi empregado nas profundidades entre 5-20m, já o índice 0,9 para as profundidades <5.

de cada parâmetro, bem como do índice de vulnerabilidade e do valor do nível estático aplicando o método Krigagem no software SAGA GIS (WICHMANN; BÖHNER, 2015)

integrado ao ambiente QGIS. Esse método é aplicado como um método geostatístico não paramétrico para estimar dados de locais não amostrados baseando em pontos conhecidos (MARCUSO et al., 2011).

O mapa potenciométrico foi obtido a partir da altitude do SRTM (cota do terreno) subtraída da profundidade do nível do aquífero freático nos poços. A confecção cartográfica foi realizada no software QGIS 2.8 (SUTTON et al., 2017), o sistema de referência de coordenadas utilizado foi o Universal Transversal de Mercator/UTM, e a base de referência SIRGAS 2000, Zona 20S.

3 Resultados e discussão

A Tabela 1 apresenta algumas características gerais dos poços tubulares analisados no estudo, bem como os respectivos índices GOD. No que diz respeito ao parâmetro “G”, em ambos os casos os valores observados foram superiores a >0,6. Apenas em alguns locais foram empregados índice 1,0 uma vez que o aquífero é livre não coberto (nível freático aflorante no período chuvoso), ocorrendo principalmente às margens do rio Madeira e proximidades de pequenos corpos hídricos.

Tabela 1 - Parâmetros G, O, D e Índice de Vulnerabilidade

ID	NE	G	O	D	IV
1100000473	11,90	1,0	0,8	0,8	0,64
1100000482	11,93	0,6	0,8	0,8	0,38
1100000407	6,74	0,6	0,8	0,8	0,38
1100002024	12,00	0,6	0,6	0,8	0,30
1100002410	12,00	0,9	0,8	0,8	0,57
1100002389	10,60	0,6	0,6	0,8	0,30
1100003045	12,00	0,6	0,6	0,8	0,30
1100002673	8,18	0,9	0,8	0,8	0,57
1100002766	12,00	0,9	0,8	0,8	0,57
1100002563	10,00	0,9	0,8	0,8	0,57
1100002784	12,00	0,9	0,8	0,8	0,57
1100002492	14,00	0,6	0,6	0,8	0,30
1100002141	5,33	0,6	0,6	0,9	0,32
1100002124	10,00	0,9	0,8	0,8	0,57
1100002091	11,00	0,9	0,8	0,8	0,57
1100002079	7,70	0,9	0,8	0,8	0,57
1100002138	6,00	0,9	0,8	0,8	0,57
1100001629	10,50	0,9	0,8	0,8	0,57
1100000472	9,03	0,9	0,8	0,8	0,57
1100000476	13,55	0,6	0,6	0,8	0,30
1100000210	0,00	1,0	0,8	0,9	0,72
1100000206	0,00	1,0	0,8	0,9	0,72
1100002537	10,00	0,9	0,6	0,8	0,43
1100002422	5,00	0,9	0,8	0,9	0,64
1100001913	10,9	0,9	0,8	0,8	0,57
1100000221	10,63	0,9	0,8	0,8	0,57
1100000219	12,37	0,9	0,8	0,8	0,57
1100000218	13,88	0,9	0,8	0,8	0,57
1100002494	7,00	0,9	0,8	0,8	0,57
1100002423	10,00	0,6	0,6	0,8	0,30
1100003158	3,60	0,6	0,7	0,8	0,33
1100003231	5,00	0,9	0,8	0,9	0,64
1100003234	8,00	0,6	0,6	0,8	0,30
1100002557	4,00	0,9	0,8	0,9	0,64
1100002490	5,00	0,9	0,8	0,8	0,57
1100002320	22,00	0,9	0,8	0,9	0,64
1100000438	9,50	0,6	0,6	0,8	0,30
1100000450	11,50	0,9	0,8	0,8	0,57

*(ID) Identificador do poço, (NE) nível estático, (G) Índice G, (O) Índice O, (D) Índice D, (IV) Índice de Vulnerabilidade.

Fonte: Autores (2017)

Com respeito a distribuição do índice “O”, a litologia descrita no perfil dos poços é diversificada

(argila/silte/areia/cascalho/laterita/rocha intemperizada/quartzito decomposto/granito/anfibolitos), no entanto, o índice é empregado

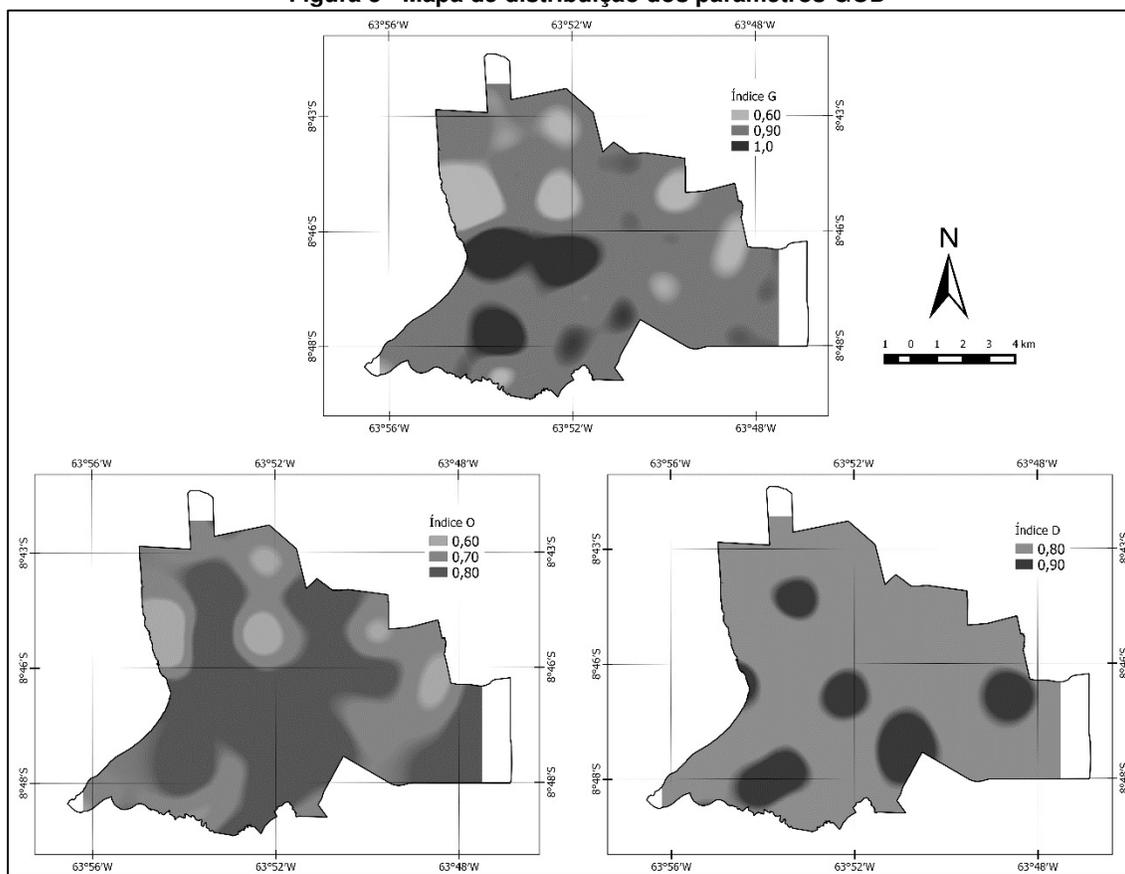
apenas para a camada insaturada, a qual na área de estudo é representada predominantemente por areias, e cascalho (perfazendo 40% dos perfis dos poços avaliados) seguida por argila/silte, argila/areia. A predominância da litologia da camada insaturada que protege o aquífero constituída por areias indica a fácil percolação de carga contaminante no aquífero, agregando alta vulnerabilidade à contaminação.

A pouca profundidade do nível das águas subterrâneas é outro fator preocupante. Nesse caso, o índice "D"

apresentou pouca variação, como ambos os aquíferos apresentaram nível estático próximo a superfície do solo (média de 11,19 metros), o que acarretou em altos índices.

Com base nos dados do grau de confinamento do aquífero, litologia da camada insaturada e distância até o nível d'água obtidos a partir da base de dados dos poços cadastrados no SIAGAS e mapas geológicos do CPRM e sistemas de aquíferos da ANA, foram espacializados e confeccionados os mapas dos parâmetros GOD que são apresentados na Figura 5.

Figura 5 - Mapa de distribuição dos parâmetros GOD



Fonte: Autores (2017)

A multiplicação dos índices do método GOD possibilitou obter o índice de vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas na área urbana do município de Porto Velho, o que possibilitou identificar três classes de vulnerabilidade, sendo elas: baixa, média e alta vulnerabilidade à contaminação (Tabela 2).

De acordo com a Figura 6, existe uma predominância de áreas com média vulnerabilidade à contaminação, seguida de alta suscetibilidade que se deu em função da

ocorrência da predominância de camadas constituídas por areias, bem como a pouca profundidade das águas subterrâneas. Essas características hidrogeológicas atribuem a esse sistema de aquífero uma alta vulnerabilidade natural à contaminação.

O índice de vulnerabilidade do método GOD proposta por Foster e Hirata (1988), varia de insignificante (0,0 a 0,1) a extrema vulnerabilidade à contaminação do aquífero (0,8 a 1,0). A ponderação dos parâmetros do método possibilitou verificar

que na área urbana do município de Porto Velho existe predominância de média e alta vulnerabilidade à contaminação (0,52%),

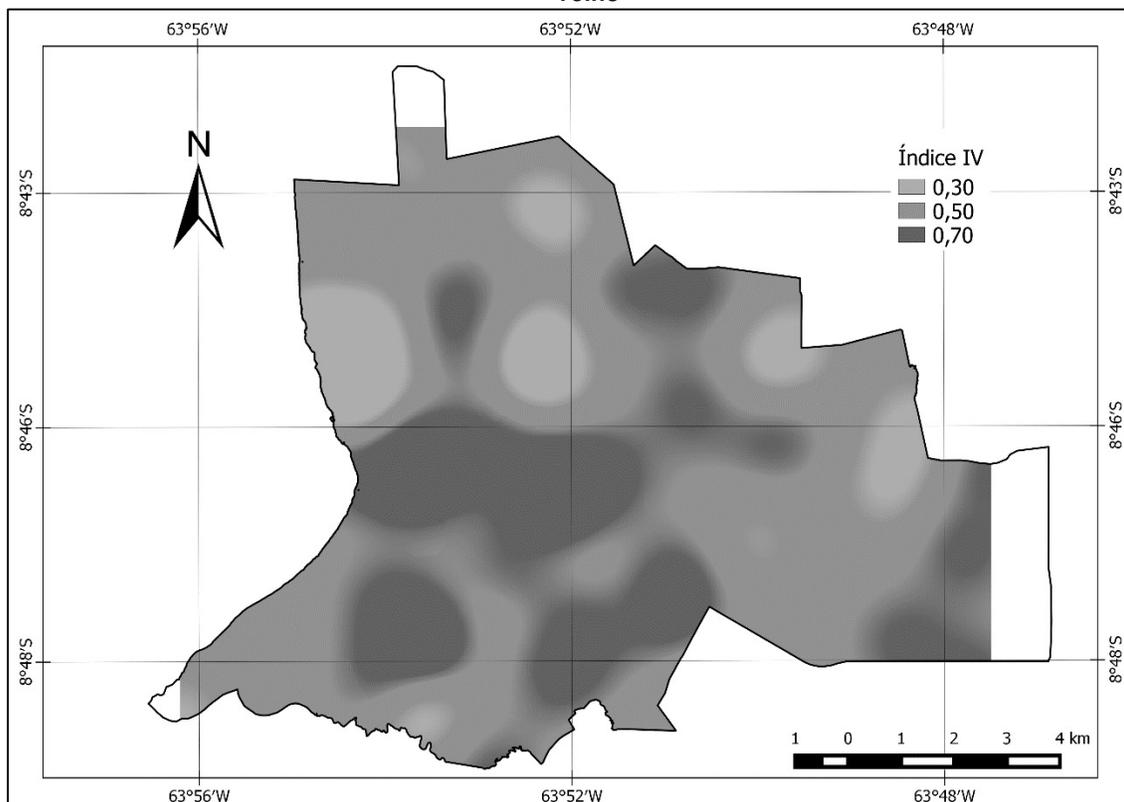
sendo poucos locais caracterizado como baixa vulnerabilidade, corroborando trabalho realizado por Oliveira et al. (2016).

Tabela 2 - Índice GOD de vulnerabilidade com percentagem de área

Índice GOD	Zona de vulnerabilidade	Área (%)
0,0 a 0,1	Insignificante	0
0,1 a 0,3	Baixa	0,12
0,3 a 0,5	Média	0,52
0,5 a 0,7	Alta	0,37
0,7 a 1,0	Extrema	0

Fonte: Autores (2017)

Figura 6 - Índice de vulnerabilidade à contaminação do aquífero na área urbana do município de Porto Velho



Fonte: Autores (2017)

Observa-se que os pontos de maior índice de alta vulnerabilidade ocorreram nos locais onde existe afloramento do lençol freático, bem como nos pontos de ocorrência de litologia constituída em predominância por areias (Figura 6). Esses locais configuram-se áreas de alta vulnerabilidade à contaminação, pois as características naturais de proteção do aquífero não apresentam grandes resistências a percolação por carga contaminante.

Resultados semelhantes foram obtidos por Duarte et al. (2016), avaliando a vulnerabilidade à contaminação do aquífero

Aluvionar, a margem do rio Madeira, na região sul do estado do Amazonas. Nesta, o autor atribuiu a predominância de média/alta vulnerabilidade à contaminação em função das características hidrogeológicas do local, como o raso nível estático e predominância de litologia constituída por areias/silte.

O mapeamento dos principais pontos potenciais de geração de carga contaminante, bem como a provável direção de fluxo subterrâneo no aquífero na área urbana de Porto Velho é de suma importância, uma vez que é possível identificar os locais com maior

perigo à contaminação, possibilitando um melhor planejamento.

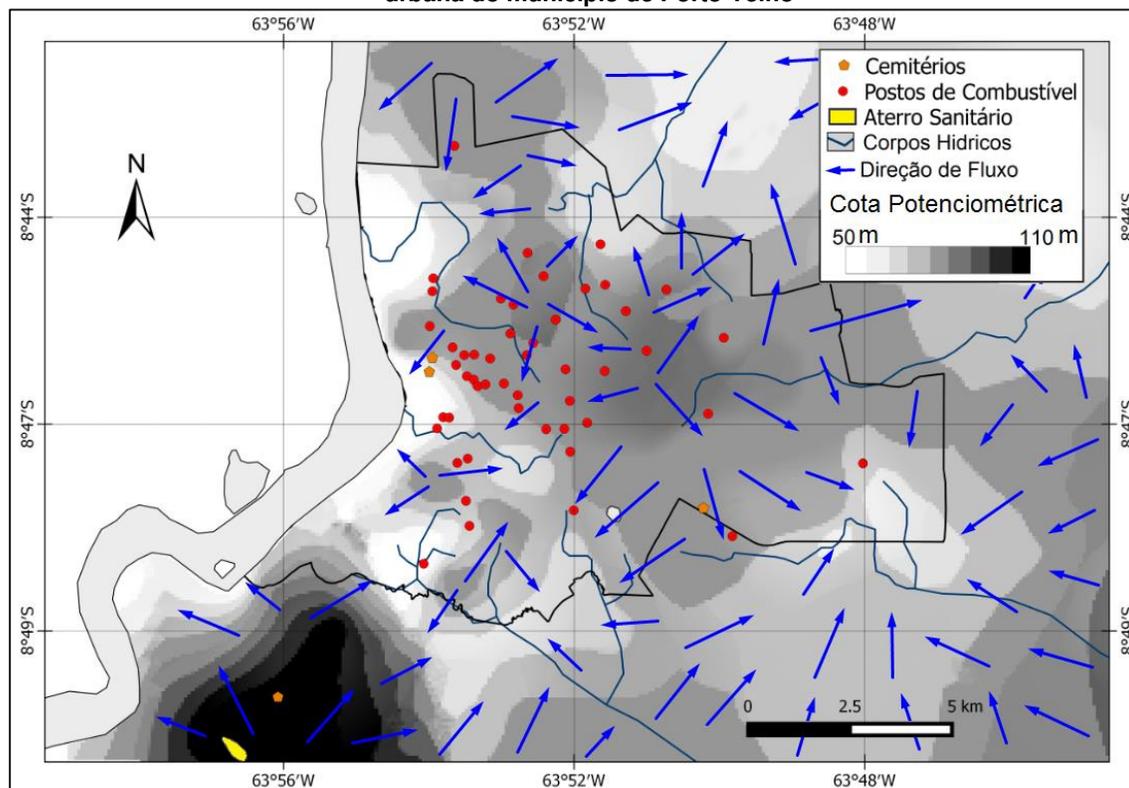
A Figura 7 ilustra os principais pontos de geração de carga contaminante tais como: cemitérios, postos de combustível, aterro sanitário, bem como a tendência de direção de fluxo local na área urbana do município.

No total, no banco de dados da Agência Nacional de Petróleo (ANP, 2017) foram identificados 49 pontos de distribuição de combustível, 4 cemitérios, bem como o aterro sanitário no entorno da área. Com respeito a este, vale ressaltar que o mesmo fica localizado apenas a 3,8 km do poço tubular de abastecimento público mais próximo.

Com respeito ao comportamento do fluxo subterrâneo, notou-se que de modo geral, existe uma predominância de direção de fluxo no sentido dos pequenos corpos hídricos superficiais presentes na área. As maiores cargas potenciométricas estão localizadas na parte SO da área de estudo, local onde se encontra o ponto de disposição de resíduos sólidos do município.

Já na parte central, local onde fica localizado a maior quantidade de pontos potenciais de geração de contaminante, a predominância de direção de fluxo ocorre em várias direções, e essa área apresenta uma topografia mais elevada (100 a 115m), o que pode justificar esse comportamento.

Figura 7 - Mapa potenciométrico e de direção de fluxo e principais fontes contaminantes na área urbana do município de Porto Velho



Fonte: Autores (2017)

Para Foster, Hirata e Andreo (2013), as áreas classificadas como de alta vulnerabilidade, e nas quais ocorram fontes potenciais de contaminação por vírus fecais, combustíveis, produtos orgânicos e nutrientes, devem passar por inspeções e monitoramentos constantes. Isto porque existe um sério perigo de contaminação e comprometimento da qualidade do manancial subterrâneo.

Como visto na Figura 7, é possível afirmar que existe um perigo real de

contaminação das águas subterrâneas na parte central da área urbana de Porto Velho, pois nesse local o aquífero foi caracterizado como de alta/media vulnerabilidade à contaminação, e considerando que existem distribuídos nesse setor uma grande quantidade de postos de combustíveis, e a presença de dois cemitérios. A preocupação com a qualidade do recurso hídrico subterrâneo é evidente, pois em estudos realizados por Melo Junior e Costi (2004) e Forte et al. (2007), foi identificada

contaminação por hidrocarbonetos nesses locais, e Rodrigues et al. (2014) identificaram contaminação por coliformes fecais nessa área.

Além do mais, a Figura 7 ilustra a predominância de direção de fluxo subterrâneo dos pontos de alta vulnerabilidade para locais caracterizados como média e baixa vulnerabilidade à contaminação. Nesse caso, caso ocorra a contaminação do aquífero, os locais de baixa vulnerabilidade nas proximidades podem ser comprometidos por esses contaminantes.

Nesse caso, é fundamental reduzir, eliminar e manter um controle sobre as fontes contaminantes, bem como o acompanhamento dos poços instalados a fim de evitar a propagação de contaminantes. Da mesma forma é de suma importância que sejam realizadas análises da qualidade da água com frequência regular, uma vez que pode servir como indicador para a observação de anomalia antes mesmo do avanço do processo de degradação generalizada.

Outro fator importante que deve ser observado em campo diz respeito à boca dos poços tubulares, pois estas devem ser cobertas e isoladas conforme padrão exigido pela NBR 12.244 (ABNT, 2006), impedindo a contaminação da água por esgotamento sanitário. Conforme descrito por Foster et al. (2006), um dos principais pontos de entrada de contaminante nos aquíferos diz respeito a esses locais mal protegidos.

Os poços rasos tipo cacimba ou “tipo amazonas” que são característicos da região, também devem ser fiscalizados, pois normalmente não possuem nenhum padrão técnico de proteção, caracterizando como pontos de fácil acesso de carga contaminante.

4 Conclusões

Na área urbana do município de Porto Velho, a aplicação do método GOD e a representação cartográfica dos índices de vulnerabilidade possibilitaram identificar a distribuição espacial da vulnerabilidade à contaminação na área de estudo. Os resultados demonstram que ocorre uma predominância de domínios com média vulnerabilidade à contaminação do aquífero Içá/Fraturado Norte, e secundariamente ocorrem domínios com alta e baixa vulnerabilidade à contaminação.

A espacialização dos principais pontos de contaminação e a tendência de fluxo possibilitaram identificar os principais pontos com real perigo à contaminação do aquífero.

Os resultados demonstram a fragilidade do manancial subterrâneo local e a necessidade de adoção de políticas públicas voltadas ao melhor regulamento do uso e ocupação do solo urbano por parte dos gestores e ocupantes do espaço.

Os resultados obtidos com o método GOD, associado à praticidade e baixo custo na obtenção dos seus parâmetros, são fatores que justificam sua aplicação, de preferência, no caso de estudos locais que exigem um maior grau de detalhe. Estudos detalhados sobre a vulnerabilidade à contaminação de uma área constituem-se uma excelente ferramenta que pode auxiliar no melhor planejamento de uso do solo, subsidiando ações de proteção e gestão dos recursos hídricos subterrâneos.

Espera-se que os resultados apresentados neste artigo sejam utilizados pelos órgãos gestores responsáveis, e auxiliem na tomada de decisões para a melhor gestão dos recursos hídricos subterrâneos na área urbana do município de Porto Velho.

5 Vulnerability to contamination of groundwater from the aquifer system Içá/Fractured North on the municipality's urban area of Porto Velho/Rondônia

Abstract: *Groundwater is a vital source for the supply of human needs. However, the various anthropogenic activities developed on the soil surface have compromised their quantity and quality. Knowledge of areas with greater or lesser vulnerability to pollution in aquifers is of extreme importance for the efficient management of these resources. This study aims to assess the vulnerability to contamination of groundwater in the Içá/Fractured North aquifer system in urban area of the municipality of Porto Velho, Rondônia, and to map the main potential sources of contaminant load generation. The application of the method GOD (Groundwater occurrence; Overall lithology of the unsaturated zone; and Depth of the water table) allowed to identify the classes of vulnerability in the area. The results show that there is a predominance of vulnerability to contamination (average 52%) distributed throughout the study area, followed by high vulnerability (37%) occurring mainly in the central region, and low vulnerability (12%) in predominance in regions WNW, N and ENE. The mapping of the main load-*

generating contaminant sources together with the flow direction study indicated that in central region of the urban area there are places with real risk of contamination, especially due to larger amount of fuel stations, demonstrating the necessity of establishment of public measures aimed at better planning of the use of recharge areas, and actions aimed at the prevention and protection of groundwater in the region.

Keywords: Aquifer free, GOD method, Contamination points.

6 Referências

- ADAMY, A. **Geodiversidade do estado de Rondônia**. Porto Velho: CPRM, 2010.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA (Brasil). **Atlas Brasil. Abastecimento Urbano de Água: panorama nacional**. Brasília: Agência Nacional de Águas; Engecorps/Cobrape, 2010.
- ANA - AGENCIA NACIONAL DE ÁGUAS-ANA. **Sistemas Aquíferos**. Disponível em: <<http://metadados.ana.gov.br/genetwork/srv/pt/main.home>>. Acesso em: 10 fev. 2017.
- AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO – ANP. **Postos de Combustível**. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/postos/consulta.asp>> Acesso em: 10 mar. 2017.
- ALLER, L., T. BENNETT, J. LEHR, AND R. PETTY. **DRASTIC: a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic setting**. Washington: USEPA, 1987. 58 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 12.244:2006. **Poço tubular - construção de poço tubular para captação de água subterrânea**. Rio de Janeiro, 2006.
- AUGE, M. Vulnerabilidade de Aquíferos. **Revista Latino-Americana de Hidrogeologia**, n.4, p.85-103, 2004.
- BARBOSA, M. C.; CARVALHO, A. M.; IKEMATSU, P. FILHO, J. L. A.; CAVANI, A. C. M. Avaliação do Perigo de Contaminação do Sistema Aquífero Guarani em sua Área de Afloramento do Estado de São Paulo Decorrente das Atividades Agrícolas. **Águas Subterrâneas**, v. 25, n.1, 2011.
- BORBA, W. F.; FERNANDES, G. D'AVILA.; TERRA L. G.; LOBLER, C. A. SILVÉRIO da SILVA J. **Avaliação da Vulnerabilidade Intrínseca à Contaminação do Aquífero na Bacia do Rio Passo Fundo no Estado do Rio Grande do Sul**. Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ. v. 39, n. 2. 2016.
- CIVITA M.; CHIAPPONE A.; FALCO M. E P. JARRE. **Preparazione della carta di vulnerabilità per la rilocalizzazione di un impianto pozzi dell' Aquedotto di Torino**. Proc. 1st. Conv. Naz. "Protezione e Gestione delle Acque Sotterranee: Metodologie, Tecnologie e Obiettivi". v. 2, 1990.
- CUTRIM, A. O.; CAMPOS, J. E. G. Avaliação da vulnerabilidade e perigo à contaminação do Aquífero Furnas na cidade de Rondonópolis (MT) com aplicação dos métodos GOD e POSH. **Revista Geociências**, v.29, n. 3. 2010.
- DOERFLIGER N & F. ZWAHLEN. **EPIK: a new method for outlining of protection areas in karstic environment**. In Gunay & Jonshon (Ed). Int. Symp. On Karst Waters and Environ. Impacts. Antalya, Turkey, 1997. Balkema: 117-123. Rotte dam. 1997.
- DUARTE, M. D; ZANCHI, F. B.; NEVEZ, J. R. D.; COSTA, S. C.; JORDÃO, W. H. C. Vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas no município de Humaitá, Amazonas, Brasil. **Rev. Ambient. Água**, v. 11, n. 2, 2016.
- FORTE, E. J.; AZEVEDO, M.S.; ALMEIDA, R. Contaminação de aquífero por hidrocarbônios: estudo de caso na vila Tupi, Porto Velho – Rondônia. **Química Nova**, v.30, n. 7, p. 1539-1544, 2007.
- FOSTER, S.; HIRATA, R. **Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data**. Lima: WHO/PAHO/HPECEPIS, 1988. p. 81.
- FOSTER, S.; HIRATA, R.; ANDREO, B. The aquifer pollution vulnerability concept: aid or impediment in promoting groundwater protection? **Hydrogeology Journal**. v.21. 2013.
- 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**. São Paulo: Servemar, 2006.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Censo demográfico 2010**. Disponível em: <<http://www.censo2010.ibge.gov.br>>. Acesso em: 17 mar. 2017.
- JUNIOR, L. C. P.; SOARES, H. L. T.; CASTRO, S. S. Vulnerabilidade natural e risco de contaminação do aquífero Bauru no município de Rio Verde -GO. **Águas Subterrâneas**, v. 29, n.2. 2015.

REA – Revista de *estudos ambientais* (Online)
v.19, n. 2, p.40-54, jul./dez.2017

- KEMERICH, P. D. C.; SILVÉRIO DA SILVA, J. L.; DESCOVI FILHO, L. L. V.; VOL-PATTO, F.; SAUCEDO, E. M. Determinação da vulnerabilidade natural à contaminação da água subterrânea no Bairro Nossa Senhora do Perpétuo Socorro em Santa Maria-RS. **Engenharia Ambiental**, v. 1, p. 85–98, 2011.
- LIGGETT, J. E.; TALWAR, S. Groundwater Vulnerability Assessments and Integrated Water Resource Management. Streamline. **Watershed Management Bulletin**. v. 13 n.1. 2009.
- LINHARES, F. M.; ALMEIDA, C. N.; SILANS, A. M. B. P.; COELHO, V. H. R. Avaliação da Vulnerabilidade e do Risco à Contaminação das Águas Subterrâneas da Bacia Hidrográfica do Rio Gramame (PB). **Soc. & Nat.**, Uberlândia, v. 26, n. 1. 2014.
- LÖBLER, C. A.; SILVÉRIO da SILVA, J. L.; MARTELLI, G. V.; ERTEL, T. Pontos Potenciais de Contaminação e Vulnerabilidade Natural das Águas Subterrâneas do Município de Restinga Seca – RS. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.6, n.3. 2013.
- MAIA, M. A. M. **Geodiversidade do estado do Amazonas**. Manaus: CPRM, 2010. p. 59-71.
- MARCUZZO, F. F. N.; DE ANDRADE, L. R.; MELO, D. C. R. Métodos de interpolação matemática no mapeamento de chuvas do estado do Mato Grosso. **Revista Brasileira de Geografia Física**, n. 04, p. 193-804, 2011.
- MEIRA, J. C. R.; DE-CAMPOS, A. B.; PEREIRA, L. C. **Vulnerabilidade Natural e Perigo à Contaminação de Zona de Recarga do Aquífero Guarani**. Águas Subterrâneas. v. 28, n. 1. 2014.
- MELO JUNIOR, H. R.; COSTI, A. C. Z. Avaliação da Contaminação das Águas Subterrâneas por Hidrocarbonetos Provenientes de Postos de Abastecimento de Combustível na Vila Tupí, Porto Velho (RO). In: XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas/ ABAS, 2004.
- MONTEIRO, R. C.; PEIXOTO, A. S. P. Vulnerabilidade e perigo de contaminação dos aquíferos no Alto Aguapeí e Alto Peixe, SP. **Ciência & Engenharia (Science & Engineering Journal)**, v. 22, n. 1, 2013.
- MOURA, P.; SABADIA, J. A. B.; CAVALCANTE, I. N. Mapeamento de vulnerabilidade dos Aquíferos Dunas, Barreiras e Fissural na porção norte do complexo industrial e portuário do Pecém, estado do Ceará. **Geociências**, v. 35, n. 1, 2016.
- OLIVEIRA, G. A.; VEIGA, J. F. V.; ROSA, A. L. D.; PESSOA, J. O.; SILVEIRO da SILVA, J. L. **Avaliação da Vulnerabilidade Intrínseca das Águas Subterrâneas do Município de Porto Velho/RO**. Revista de Engenharia e Tecnologia. v. 8, n. 2, 2016.
- REGINATO, P. A. R.; AHTERT, S. Vulnerabilidade do sistema aquífero Serra Geral na região nordeste do estado do Rio Grande do Sul. **Águas Subterrâneas**. v. 27, n. 2. 2013.
- RIBEIRO, L. F. T. Um novo índice vulnerabilidade específico de aquíferos: formulação e aplicações. In: SIMPÓSIO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS DOS PAÍSES DE LÍNGUA OFICIAL PORTUGUESA (SILUSBA), 7., 2005, Évora. Anais... Évora: [s.n.], 2005. p. 16.
- RODRIGUES, E. R. D.; HOLANDA, I. B. B.; CARVALHO, D. P.; BERNARDI, J. V. E.; MANZATTO, A. G.; BASTOS, W. R. Distribuição espacial da qualidade da água subterrânea na área urbana da cidade de Porto Velho, Rondônia. **Scientia Amazonia**, v. 3, n.3, 2014.
- ROSENBERGER, M.; VARNIER, C.; IRITANI, C.; FERREIRA, L. M. R.; ODA, G. H.; VIOTTI, M. Vulnerabilidade natural à contaminação do sistema aquífero Bauru na área urbana do município de Bauru (SP). **Revista do Instituto Geológico**, São Paulo, v. 34, n. 2. 2013.
- SECRETARIA DE ESTADO DO DESENVOLVIMENTO AMBIENTAL – SEDAM. **Boletim Climatológico de Rondônia** - Ano 2010, COGEO - SEDAM / Coordenadoria de Geociências - v12, 2010 – Porto Velho: COGEO - SEDAM, 2012.
- Serviço Geológico do Brasil – CPRM. **Geologia de Rondônia**. Disponível em: <<http://geobank.cprm.gov.br/>>. Acesso em: 08 fev. 2017.
- SILVÉRIO da SILVA, J. L.; DESCOVI FILHO, L. L. V.; LORENSI, R. P.; CRUZ, J. C.; ELTZ, F. L. Vulnerabilidade do aquífero Serra Geral à contaminação no município de Erechim - Rio Grande do Sul - Brasil. **Ciência e Natura**, v. 35, p. 10-23, 2013.
- SILVÉRIO DA SILVA, J. L.; NASCIMENTO, L. M.; LÖBLER, C. A. Mapeamento das águas subterrâneas do município de Boa Vista do Cadeado/RS. **Revista Monografias Ambientais**, v. 14, p. 3061-3074, 2014.
- SISTEMA DE INFORMAÇÃO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS - **SIAGAS**. Website. 2015. Disponível em: <<http://siagasweb.cprm.gov.br/>>. Acesso em: 10 mar. 2017.
- SOUZA, E. L.; GALVÃO, P. H. F.; PINHEIRO, C. S. S.; BAESSA, M. P. M.; DEMÉTRIO, J. G. A.; BRITO, W. R. R. Síntese da hidrogeologia nas bacias sedimentares do Amazonas e do Solimões: Sistemas Aquíferos Içá-Solimões e Alter do Chão. **Revista do Instituto de Geociências – USP**. v. 13, n.1. 2013.

REA – Revista de *estudos ambientais* (Online)
v.19, n. 2, p.40-54, jul./dez.2017

Star Science Geological Survey - USGS. **SRTM Topography**. Disponível em: <<https://earthexplorer.usgs.gov/>>. Acesso em: 15 mar. 2017.

TAVARES, P. R. L.; DE CASTRO, M. A. H.; DA COSTA, C.T. F.; DA SILVEIRA, J. G. P.; ALMEIDA JÚNIOR, F. J. B. Mapeamento da vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas localizadas na Bacia Sedimentar do Araripe,

Estado do Ceará, Brasil. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 62, n. 2, p. 227-236, 2009.

7 Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico/CNPq pela bolsa de estudo concedido ao autor principal.