



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Disclaimer: Articles published in this section are not peer-reviewed and are not indexed.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

Mapeamento da vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas do Sistema Aquífero Barreiras na Bacia no Rio Pirangi/RN utilizando os Métodos GOD, DRASTIC e IS.

Mapping the vulnerability of water contamination of Barreiras Aquifer System in the Pirangi River Basin using GOD, DRASTIC and IS methods.

Janaína Medeiros da Silva¹, José Geraldo de Melo¹, José Braz Diniz Filho¹✉

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Norte

✉ jana_medeiros91@hotmail.com, jgmo2@gmail.com, brazdf@geologia.ufrn.br

Resumo

Palavras-chave:

Vulnerabilidade natural e antrópica, Sistema Aquífero Barreiras, Bacia do Rio Pirangi, contaminação de aquíferos.

Keywords

Natural and anthropic vulnerability, Barreiras Aquifer System, Pirangi River Basin, aquifer contamination

Este estudo objetiva realizar o mapeamento da vulnerabilidade natural e antrópica à contaminação do Sistema Aquífero Barreiras (SAB) na Bacia do Rio Pirangi aplicando os métodos GOD, DRASTIC e IS. A partir da análise e interpretação de 38 perfis litológicos de poços distribuídos na área de estudo e de dados cartográficos de trabalhos anteriores, foi realizado o mapeamento da profundidade ao lençol freático, grau de confinamento do aquífero, litologia da zona não saturada, recarga pluviométrica, material litológico do aquífero, tipo de solo, declividade, condutividade hidráulica e uso e ocupação do solo. O cruzamento das informações em sistema SIG foi feita através da ferramenta 'álgebra de mapa'. De modo geral, o zoneamento da vulnerabilidade a partir do método GOD revelou maior restrição quanto ao uso e ocupação do solo frente aos métodos DRASTIC e IS, visto que foram identificados predominantemente setores de alta vulnerabilidade. Considerando as zonas de uso e ocupação do solo, identificou-se para a zona urbana índice de vulnerabilidade predominantemente baixo e intermediário através dos métodos GOD e DRASTIC e índice intermediário através do método IS. Nas zonas de desenvolvimento agrícola e no domínio de lagoas e dunas com pouca intervenção humana, determinou-se, através dos métodos DRASTIC e IS, índices de vulnerabilidade baixo e intermediário, enquanto pelo método GOD há predominância de alta vulnerabilidade. Diante do mapeamento de áreas mais sensíveis à contaminação do aquífero, recomenda-se adoção de medidas de controle ambiental mais efetivas, além da elaboração de bases cartográficas mais detalhadas e aquisição de dados mais aprofundados quanto ao uso e ocupação do solo e as fontes de contaminação.

Abstract

This study aims to map the natural and anthropogenic vulnerability to contamination of the Barreiras Aquifer System (SAB) in the Pirangi River Basin by applying GOD, DRASTIC and IS methods. From the analysis and interpretation of 38 lithological profiles of wells distributed in the study area and cartographic data from previous works, the mapping of the depth to the water table, aquifer confinement degree, unsaturated zone lithology, rainfall recharge, lithological aquifer material, soil type, slope, hydraulic conductivity and land use and occupation. The information crossing in GIS system was done through the map algebra. In general, the vulnerability zoning from the GOD method revealed greater restriction regarding land use and occupation compared to the DRASTIC and IS methods, since predominantly high vulnerability sectors were identified. Considering the areas of land use and occupation, a predominantly low and intermediate vulnerability index was identified for the urban zone through the GOD and DRASTIC methods and an intermediate index through the IS method. In the areas of agricultural development and in the area of lagoons and dunes with little human intervention, low and intermediate vulnerability indices were determined using the DRASTIC and IS methods, while the GOD method has a high vulnerability predominance. Given the mapping of areas more sensitive to aquifer contamination, it is recommended to adopt more effective environmental control measures, as well as the elaboration of more detailed cartographic bases and the acquisition of more detailed data on land use and occupation and sources of contamination.

DOI: <https://doi.org/10.14295/ras.v34i1.29786>

1. INTRODUÇÃO

As águas subterrâneas constituem recurso estratégico e vital para o abastecimento econômico e seguro com água potável nos meios urbano e rural em diversas regiões do planeta. Contudo, o desenvolvimento econômico sem o planejamento ambiental adequado tem sido causa de diversos impactos ambientais que influenciam diretamente os processos hidrológicos e ameaçam a qualidade das águas subterrâneas (TUCCI, 2003), sendo imprescindível o desenvolvimento de políticas de controle e preservação ambiental baseadas no desenvolvimento sustentável.

Nesse contexto, a identificação do grau de suscetibilidade de aquíferos à contaminação representa um instrumento norteador na gestão governamental e não-governamental dos recursos hídricos subterrâneos (NOBRE, 2006; PATRIKAKI *et al.*, 2012; FOSTER *et al.*, 2013). O termo “vulnerabilidade” pode ser compreendido como um conjunto de características inerentes ao aquífero, naturais ou antrópicas, e que determinam o quanto esse poderá ser afetado por determinada carga contaminante (BRAGA, 2008). A interação entre a vulnerabilidade natural do aquífero e o perigo à contaminação (avaliação da potencial carga contaminante) determina o risco à contaminação do aquífero (GOERL *et al.*, 2012).

Na Bacia Hidrográfica do Rio Pirangi, Região Metropolitana de Natal (RMN), as águas do Sistema Aquífero Barreiras (SAB) constituem principal fonte de abastecimento para as populações urbana e rural, sendo essa unidade hidrogeológica caracterizada por elevadas potencialidades hídricas, facilidade de captação e águas com excelente qualidade em suas condições naturais (MELO *et al.*, 2017).

Entretanto, nas últimas décadas, a região tem passado por expressivo crescimento urbano e agrícola. A cidade de Parnamirim, localizada na porção norte da bacia, contém população atual estimada em 261.469 habitantes e taxa de crescimento de 7 mil pessoas para moradia por ano (IBGE), sendo a maior dentre os municípios da RMN. A ausência de saneamento básico na cidade condiciona o uso de sistemas de esgotamento sanitário rudimentares (sumidouros e fossas negras), constituindo ameaça aos mananciais subterrâneos principalmente no tocante à contaminação por compostos nitrogenados. Além disso, no domínio oeste da bacia, onde são desenvolvidas predominantemente atividades agropecuárias, constata-se adoção de práticas agrícolas sem controle do uso de fertilizantes e/ou pesticidas, afetando a qualidade hídrica subterrânea.

O uso de fertilizantes agrícolas, criação de animais e os sistemas de saneamento *in situ* constituem importantes fontes de nitrato nas águas subterrâneas (VARNIER & HIRATA, 2002). O íon nitrato é um contaminante de elevada preocupação ambiental devido à sua grande mobilidade na água e persistência em condições aeróbias.

Face ao exposto e considerando a escassez de estudos na área que abordam tal temática (ANA, 2012; MELO *et al.*, 2017), esse trabalho objetiva realizar uma análise comparativa do mapeamento da vulnerabilidade à contaminação do SAB na Bacia Hidrográfica do Rio Pirangi a partir da aplicação dos métodos GOD, DRASTIC e IS.

2. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo (370 Km²) está inserida na Bacia hidrográfica do Rio Pirangi (Figura 1), localizada no litoral oriental do estado do Rio Grande do Norte, abrangendo os municípios de Natal, Parnamirim, Macaíba, Nísia Floresta, São José de Mipibú e Vera Cruz, os quais, com exceção do último, fazem parte da RMN. A bacia é composta pelas sub-bacias dos rios Pitimbu, Taborda e Pium, todos perenes, além dos riachos Mendes, Água Vermelha e Lamarão, afluentes do Rio Pirangi e pelas lagoas do Jiquí e do Pium. LUCENA *et al.* (2004) afirmam ampla relação entre os mananciais superficiais e subterrâneos, sendo o SAB nitidamente de regime influente nos canais fluviais e lagoas.

O clima da área de estudo é do tipo As' – quente e úmido (KOPPEN e GEIGER, 1928) e elevado regime pluviométrico com destaque para os setores centro e leste da bacia, onde as precipitações são superiores a 1600 mm/ano (EMPARN, média 1992-2018). No setor oeste, as precipitações pluviométricas diminuem para 800 mm/ano.

A geologia da área de estudo é constituída, da base para o topo, pelas seguintes unidades litoestratigráficas: sequência do embasamento cristalino Pré-cambriano, representado pelas rochas ígneas e metamórficas; sequência sedimentar Cretácea, formada por rochas carbonáticas e areníticas; sequência Cenozoica Tércio-Quaternária constituída pelos arenitos argilosos com níveis de argilitos e conglomerados da Formação Barreiras; e sequência Quaternária, formados por sedimentos aluvionares, colúvio-eluviais e eólicos (Figura 2) (BARRETO *et al.*, 2004; ANGELIM *et al.*, 2006), sendo apenas as duas últimas sequências aflorantes na bacia. Quanto à geomorfologia, predominam os tabuleiros costeiros e as planícies fluviais.

Figura 1 - Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Pirangi - Região Metropolitana de Natal.

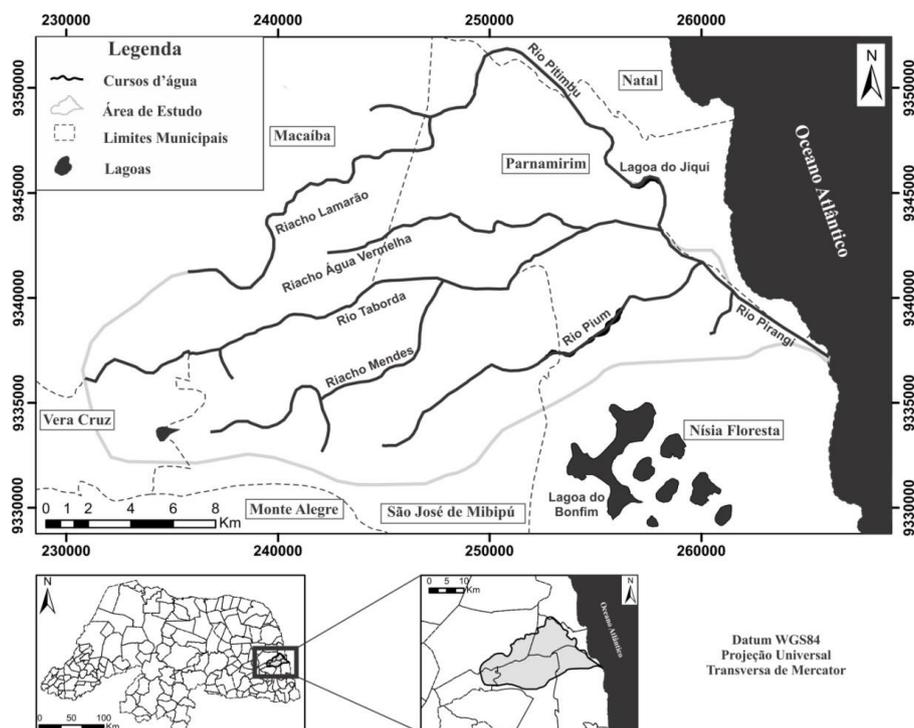
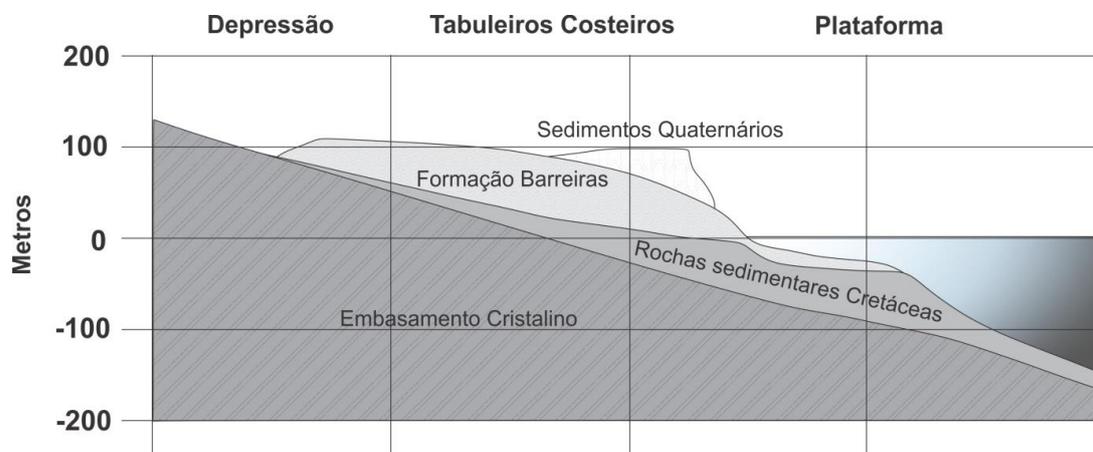


Figura 2 - Unidades litoestratigráficas e perfil geomorfológico da Bacia do Rio Pirangi - Região Metropolitana de Natal. Adaptado de ARAÚJO *et al.* (2006).



O SAB é a principal unidade hidrogeológica da área de estudo, sendo suas águas destinadas para consumo humano, irrigação de culturas e uso industrial. O SAB é litologicamente constituído pelas rochas de formação homônima, compondo estratos areníticos horizontalizados de espessuras variadas, ocorrendo arenitos finos associado com intercalações argilosas na parte superior e arenitos médios a grossos na parte inferior. As camadas argilosas promovem semiconfinamentos localizados (aquítard), embora que o caráter livre do aquífero seja dominante (SERHID, 1998). A compartimentação estrutural do terreno exerce marcante influência sobre as espessuras saturadas do SAB e suas potencialidades, o que se reflete na produtividade dos poços, visto que as maiores vazões explotáveis correspondem às maiores espessuras saturadas (BEZERRA *et al.*, 1993; LUCENA *et al.*, 2006).

Quanto ao uso e ocupação do solo, a área de estudo pode ser subdividida em três domínios principais: zona urbana consolidada e áreas de expansão urbana no setor norte; ecossistema de lagos e dunas com pouca interferência antrópica e características naturais preservadas no setor leste; atividade agropecuária com cultivo predominante de feijão, batata e macaxeira no setor oeste.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A avaliação da vulnerabilidade à contaminação do SAB na Bacia do Rio Pirangi consistiu na aplicação dos métodos GOD, DRASTIC e IS, a partir da sobreposição de parâmetros litológicos, hidrogeológicos e geoambientais conforme estabelecidos nos métodos adotados.

O método GOD (FOSTER, 1987; FOSTER *et al.*, 2006) avalia a vulnerabilidade natural de um aquífero a partir da análise e atribuição de um valor numérico a cada ponto de investigação (poço), considerando cada parâmetro apreciado no método. No método GOD, os seguintes indicadores são observados: grau de confinamento do aquífero (G), litologia e seu grau de consolidação na zona vadosa ou camadas confinantes (O) e profundidade do nível freático do aquífero (D) (Tabela 1). Conforme Equação 1, o resultado, definido como índice de vulnerabilidade GOD, é determinado em cada ponto, compondo um conjunto de valores de vulnerabilidade espacialmente distribuídos, permitindo, mediante interpolação (vizinho natural), promover o zoneamento da vulnerabilidade à contaminação de um aquífero.

$$\text{Índice GOD} = \text{Valor G} * \text{Valor O} * \text{Valor D} \quad (\text{Equação 1})$$

Segundo o método, as variáveis G, O e D são igualmente significantes na determinação do índice de vulnerabilidade GOD, o qual permite classificar a vulnerabilidade do aquífero à contaminação desde insignificante (< 0,1) até extrema (> 0,7) (Tabela 2) e o seu uso elimina ou minimiza a subjetividade inerente aos processos de avaliação (LEITÃO *et al.*, 2003). Devido à simplicidade de operação e baixo custo de aplicação, o método GOD é amplamente utilizado em estudos preliminares, podendo compor estratégia de gestão e planejamento ambiental para definição técnica de zonas de uso e ocupação do solo, permitindo controle efetivo de lançamento de cargas contaminantes em regiões onde o aquífero está mais ameaçado.

Assim como no GOD, a aplicação dos métodos DRASTIC e IS consistiu em avaliar e quantificar cada parâmetro de análise em cada ponto de investigação. O método DRASTIC (ALLER *et al.*, 1987) avalia a vulnerabilidade natural do aquífero considerando sete parâmetros: profundidade do nível freático do aquífero (D), recarga (R), litologia do aquífero (A), tipo do solo (S), topografia (T), impacto da zona não saturada (I) e condutividade hidráulica (C) (Tabela 3). A cada variável é atribuído um valor entre 1 a 10, o qual, posteriormente, é multiplicado por um peso, que pode variar de 1 a 5. Logo, no método DRASTIC, os parâmetros analisados possuem distintas significâncias na determinação do índice de vulnerabilidade, o qual é obtido a partir soma ponderada dos sete parâmetros (Equação 2). O resultado obtido permite classificar a vulnerabilidade do aquífero desde baixa (< 120) até muito alta (> 199) (Tabela 4).

$$\text{Índice DRASTIC} = 5 * \text{Valor D} + 4 * \text{Valor R} + 3 * \text{Valor A} + 2 * \text{Valor S} + \text{Valor T} + 5 * \text{Valor I} + 3 * \text{Valor C} \quad (\text{Equação 2})$$

O método IS (índice de susceptibilidade) (FRANCÉS *et al.*, 2001) originou-se a partir da modificação do método DRASTIC e avalia a vulnerabilidade natural e antrópica à contaminação do aquífero a partir de cinco parâmetros: profundidade do nível freático do aquífero (D), recarga (R), litologia do aquífero (A), topografia (T) e uso e ocupação do solo (US) (Tabelas 5 e 6). Assim como no método DRASTIC, um valor é atribuído a cada parâmetro e multiplicado por um peso (Equação 3). O índice de vulnerabilidade é obtido a partir da soma ponderada dos parâmetros, que pode variar de 0 a 100, e a vulnerabilidade do aquífero à contaminação é classificada desde baixa (<45) até muito alta (>85) (Tabela 7).

$$\text{Índice IS} = 0,186 * \text{Valor D} + 0,212 * \text{Valor R} + 0,259 * \text{Valor A} + 0,121 * \text{Valor T} + 0,222 * \text{Valor US} \quad (\text{Equação 3})$$

Nos métodos GOD, DRASTIC e IS, admite-se que todos os contaminantes possuam as mesmas características de mobilidade na água. Além disso, atribui-se que a carga contaminante migra verticalmente até o aquífero por infiltração de águas meteóricas (recarga), não se aplicando a situações em que o poluente está introduzido à profundidade no aquífero.

O método IS se diferencia dos métodos GOD e DRASTIC por considerar a interferência antrópica na avaliação de vulnerabilidade do aquífero. O conceito de vulnerabilidade pode ser dividido em vulnerabilidade intrínseca e vulnerabilidade específica (AUGE, 2004). No primeiro, a vulnerabilidade do aquífero à contaminação envolve somente as características do meio sem considerar as características da potencial carga de contaminantes; no segundo, são consideradas tanto as características do meio como da potencial carga de contaminantes.

Tabela 1 – Parâmetros e valores inerentes à avaliação da vulnerabilidade de aquífero à contaminação pelo método GOD. Adaptado de FOSTER et al. (2006).

Parâmetro G		Parâmetro O						Parâmetro D	
		Não consolidados (Sedimentos)		Consolidados (Rochas porosas)		Consolidados (Rochas densas)			
Tipologia	Valor G	Tipologia	Valor O	Tipologia	Valor O	Tipologia	Valor O	Limite (m)	Valor O
Nenhum	0	Argilas lacustres/estuarinas	0,4	Lamito	0,5	Formações ígneas e metamórficas	0,6-0,7	>50	0,6
Fluxo ascendente jorrante	0	Siltos residuais	0,4	Xisto	0,5-0,6	Lavas vulcânicas recentes	0,8	20-50	0,7
Confinado	0,2	Siltos, loess, till glacial	0,5	Siltito	0,6	Calcretes / calcários cársticos	0,9-1,0	5-20	0,8
Semiconfinado	0,4	Areia eólica	0,6	Turfo vulcânico	0,6-0,7			< 5	0,9
Não confinado (coberto)	0,6	Areia aluvial fluvioglacial	0,7	Arenitos	0,7-0,8				
Não confinado	1,0	Cascalho de leques aluviais	0,8	Calcário / calcarenito	0,8-0,9				

Tabela 2 – Classes de vulnerabilidade à contaminação de aquífero pelo método GOD. Adaptado de FOSTER et al. (2006).

Valor GOD	< 0,1	0,1 - 0,3	0,3 - 0,5	0,5 - 0,7	>0,7
Vulnerabilidade	Insignificante	Baixa	Média	Alta	Extrema

Tabela 3 – Parâmetros e valores inerentes à avaliação da vulnerabilidade de aquífero à contaminação pelo método DRASTIC. Adaptado de ALLER et al. (1987).

Parâmetro D		Parâmetro R		Parâmetro A		Parâmetro S		Parâmetro T		Parâmetro I		Parâmetro C	
Limite (m)	Valor D	Limite (mm)	Valor R	Tipologia	Valor A	Tipologia	Valor S	Limite (%)	Valor T	Tipologia	Valor I	Limite (m/dia)	Valor C
<1,5	10	< 50	1	Xisto argiloso, argilito	1-3 (2)	Fino ou ausente	10	< 2	10	Camada confinante	1	<4,1	1
1,5-4,5	9	50-100	3	Rocha metamórfica ou ígnea	2-5 (3)	Areia	9	2-6	9	Argila/Silte	2-6 (3)	4,1-12,2	2
4,5-9,0	7	100-180	6	Rocha metamórfica ou ígnea alterada	3-5 (4)	Turfa	8	6-12	5	Folhelho argiloso, argilito	3-5 (3)	12,2-28,5	4
9,0-15,0	5	180-255	8	Arenito, calcário e argilito estratificado	5-9 (6)	Argila expansiva e/ou agregada	7	12-18	3	Calcário	2-7 (6)	28,5-40,7	6
15,0-23,0	3	>255	9	Arenito, calcário ou areia e cascalho	4-9 (6)	Franco arenoso	6	>18	1	Arenito ou arenito, calcário e/ou argilito	4-8 (6)	40,7-81,5	8
23,0-30,0	2			Basalto	2-10 (9)	Franco siltoso	4			Rocha metamórfica	2-8 (4)	>81,5	10
>30,0	1			Calcário cárstico	9-10 (10)	Franco argiloso	3			Basalto	2-10 (9)		
						Calcário	2			Calcário carstificado	2-10 (10)		
						Argila não expansível e não agregada	1						

Tabela 4 – Classes de vulnerabilidade à contaminação de aquífero pelo método DRASTIC. Adaptado de ALLER *et al.* (1987).

Valor DRASTIC	<120	120 -159	159 - 199	>199
Vulnerabilidade	Baixa	Intermediária	Alta	Muito Alta

Tabela 5 – Parâmetros e valores inerentes à avaliação da vulnerabilidade de aquífero à contaminação pelo método IS. Adaptado de FRANCÊS *et al.* (2001).

Parâmetro D		Parâmetro R		Parâmetro A		Parâmetro T	
Limite (m)	Valor D	Limite (mm)	Valor R	Tipologia	Valor A	Limite (%)	Valor T
<1,5	100	<51	10	Xisto argiloso, argilito	10 - 30 (20)	< 2	100
1,5 - 4,6	90	51 - 102	30	Rocha metamórfica ou ígnea	20 - 50 (30)	2-6	90
4,6 - 9,1	70	102 - 178	60	Rocha metamórfica ou ígnea alterada	30 - 50 (40)	6-12	50
9,1 - 15,2	50	178 - 254	80	“Till” Glacial	40-60 (50)	12-18	30
15,2 - 22,9	30	>254	90	Arenito, calcário e argilito estratificado	50 - 90 (60)	>18	10
22,9 - 30,5	20			Arenito maciço	40 - 90 (60)		
>30,5	10			Calcário maciço/areia e balastro	40 - 90 (80)		
				Basalto	20 -100 (90)		
				Calcário Carsificado	90 - 100 (100)		

Tabela 6 – Parâmetro US e valor inerentes à avaliação da vulnerabilidade de aquífero à contaminação pelo método IS. Adaptado de FRANCÊS *et al.* (2001).

Parâmetro US	
Tipologia	Valor US
Descargas industriais, zonas de espalhamento de lixos	100
Perímetros regados, arrozais	90
Aeroportos, zonas potuárias, infraestrutura de rede de autoestradas e da rede ferroviária	75
Espaços de atividades industriais, comerciais e de equipamentos em geral	
Espaços verdes urbanos	
Zonas com equipamentos desportivos e de ocupação de tempos livres	
Tecido urbano contínuo	

Tecido urbano descontínuo	70
Culturas permanentes (vinhas, pomares, oliveiras, etc)	
Culturas anuais associadas às culturas permanentes	50
Pastagens	
Sistemas culturas e parcelares complexos	
Terras ocupadas principalmente por agricultura com espaços naturais importantes	
Territórios agroflorestais	
Meios aquáticos (sapais, salinas, ect)	
Florestas e meios seminaturais, superfícies com água	0

Tabela 7 - Classes de vulnerabilidade à contaminação de aquífero pelo método IS. Adaptado de FRANCÉS *et al.* (2001).

Valor IS	0 - 45	45 - 65	65 - 85	85 - 100
Vulnerabilidade	Baixa	Intermediária	Alta	Muito Alta

A elaboração do zoneamento da vulnerabilidade do aquífero à contaminação utilizando os métodos GOD, DRASTIC e IS iniciou com produção de mapas temáticos. Os mapas que retratam o grau de confinamento do aquífero, as características litológicas do aquífero e da zona não saturada e a profundidade ao lençol freático foram elaborados a partir da análise e interpretação de perfis litológicos e construtivos de 38 poços distribuídos na área de estudo seguida de interpolação através da técnica de vizinho natural.

Os demais parâmetros foram obtidos a partir de estudos anteriores e bases cartográficas já conhecidas. Os dados sobre recarga do aquífero foram obtidos a partir de ANA (2012), que desenvolveram estudos hidrogeológicos na RMN. As características pedológicas são oriundas do Projeto RADAM, as quais foram atualizadas com imagens de satélite e levantamentos de campo, e disponibilizadas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) na escala 1:250.000. Os dados topográficos foram obtidos a partir do modelo digital de elevação do Projeto Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), que são imagens de radar com resolução espacial de 30 metros, disponibilizados pelo serviço Earth Explorer do USGS (Serviço Geológico Americano). Devido à carência de dados de recarga pluvial e de tipos de solos a nível local para a área de estudo, foram utilizados bases cartográficas regionais, o que pode acarretar em perda de acurácia devido a generalizações. No Brasil, apenas 1% do território nacional foi mapeado em escala 1:100.000, demonstrando a incipiência dos dados e a dificuldade de obtenção de bases cartográficas que permitam estudos de vulnerabilidade de aquíferos mais detalhados (CONCAR, 2013).

Os valores de condutividade hidráulica e informações sobre o uso e ocupação do solo foram obtidos a partir de MELO *et al.* (2017) que desenvolveram estudo hidrogeológico na Bacia do Rio Pirangi.

Considerando os setores de uso e ocupação do solo, o perigo à poluição do aquífero foi classificado conforme o método POSH (FOSTER *et al.*, 2002), que considera o tipo de atividade antrópica desenvolvida e sua capacidade geradora de contaminante (perigo). Esse método determina perigo elevado às cargas poluidoras oriundas do perímetro urbano e das atividades agrícolas e insignificante às áreas de vegetação remanescente. Os resultados da vulnerabilidade natural à contaminação do aquífero (métodos GOD e DRASTIC) foram confrontados perigo à poluição, gerando discussões, embora preliminares, sobre o risco de contaminação do SAB na área de estudo (Tabela 8).

Tabela 8 - Determinação do risco à contaminação de aquífero.

		Índice de vulnerabilidade do aquífero		
		Baixa	Intermediária	Alta
Perigo à contaminação	Insignificante	Muito baixo	Baixo	Baixo
	Moderado	Baixo	Moderado	Alto
	Elevado	Moderado	Alto	Extremo

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As características dos parâmetros utilizados, representados a partir de mapas temáticos, são descritas a seguir.

A análise do nível do lençol freático do SAB na área de estudo revela profundidades entre 1,57 m a 38,60 m, sendo verificado, de modo geral, aumento da profundidade do nível freático de montante para jusante com relação ao fluxo subterrâneo, ou seja, no sentido oeste-leste. Considerando mesmo tempo de infiltração de contaminantes, quanto mais profundo for o lençol freático, maior tempo o contaminante necessita para atingir o aquífero, e consequentemente, menos vulnerável este estará. No método GOD, a avaliação do nível freático permitiu subdividir a área de estudo em três classes, enquanto nos métodos DRASTIC e IS foram identificadas seis classes.

A recarga pluviométrica elevada proporciona maior transporte de determinada carga contaminante, aumentando a vulnerabilidade do aquífero. Os dados sobre recarga pluviométrica (ANA, 2012) permitiram subdividir a área de estudo em três classes, conforme intervalos estabelecidos nos métodos DRASTIC e IS. O domínio oeste apresenta valores de recarga de 48 mm/ano; ao centro e ao leste a estimativa de recarga é de 148 mm/ano; a sudeste, foi delimitada uma pequena área com recarga de 370 mm/ano. Nessa última, a recarga é acentuada devido à presença de campos dunares, favorecendo a infiltração das águas pluviométricas.

O material constituinte do aquífero influencia a capacidade de percolação de um contaminante ao longo do manancial subterrâneo, relacionando intimamente a porosidade específica com a velocidade do fluxo. Na área de estudo, a análise do material da camada aquífera mapeou duas classes, conforme características estabelecidas nos métodos DRASTIC e IS. Em 81,15% da área, o material do aquífero foi caracterizado como arenítico. No restante, o aquífero é composto litologicamente por arenitos com intercalações argilosas.

O tipo de solo subordina a susceptibilidade à contaminação do aquífero por influenciar diretamente na infiltração. A Bacia do Rio Pirangi é constituída pedologicamente por neossolos, latossolo, argissolo e coberturas dunares. Os neossolos, caracterizados pelo pequeno desenvolvimento pedogenético, de pouca profundidade e com predomínio de areias quartzosas, ocorrem em faixas pouco expressivas no sudeste da área, abrangendo 5,07% da área de estudo. Os latossolos, solos minerais com pouca diferenciação entre horizontes e camadas, são predominantes na área de estudo, perfazendo 68,35%. Os argissolos, que ocorrem margeando os cursos d'água e caracterizados por níveis argilosos, cobrem 23,73% da área de estudo. Por fim, os campos dunares ocorrem no extremo sudeste da área, abrangem apenas 2,85%.

A análise da topografia do terreno na avaliação da vulnerabilidade do aquífero é importante tendo em vista a relação entre o escoamento superficial e infiltração. Em locais de maior declividade, o escoamento superficial é favorecido, diminuindo a infiltração e consequentemente o transporte do contaminante até o aquífero. A análise da declividade do terreno permitiu definir cinco intervalos conforme os métodos DRASTIC e IS, os quais variam desde valores abaixo de 2% até declividades acima de 18%. A presença dos tabuleiros costeiros resulta no predomínio de baixas declividades, embora ocorram trechos de declividade mais acentuada nas encostas dos principais vales e nos campos dunares.

O mapeamento litológico da zona não saturada dividiu a área de estudo em seis domínios aflorantes: campos dunares, que ocorrem no setor sudeste da área de estudo (3,79%); sedimentos arenosos finos a médios no setor sudeste e pequena ocorrência no setor oeste (14,16%); arenitos com coberturas arenosas nos domínios sul e oeste da bacia (36,06%); arenito com coberturas arenoargilosas no setor noroeste da área (6,43%); arenito na porção central e extremo norte (19,64%); arenito com intercalações argilosas no setor norte (19,92%). A análise dos estratos na zona não saturada também permitiu avaliar o grau de confinamento do aquífero, parâmetro utilizado no método GOD. Identificou-se ocorrência de semiconfinamento do aquífero na porção norte da área de estudo (23,94%). Nos demais setores, admitiu-se aquífero de caráter livre (76,06%).

A condutividade hidráulica é uma propriedade do aquífero que reflete a facilidade com que a água nele se movimenta. Os valores de condutividade hidráulica na área de estudo variam de 0,28 a 176,25 m/dia, sendo constatado, de modo geral, aumento da condutividade hidráulica no sentido oeste-leste. Conforme intervalos estabelecidos pelo método DRASTIC, cinco classes de condutividade hidráulica foram mapeadas.

As Figuras 3, 4 e 5 representam a base de dados cartográficos necessárias a análise de vulnerabilidade do SAB na área de estudo a partir dos métodos GOD, DRASTIC e IS, respectivamente.

Figura 3 – Base de dados cartográficos utilizados na avaliação da vulnerabilidade natural do SAB na Bacia do Rio Pirangi a partir do método GOD. A - Grau de confinamento do aquífero (Parâmetro G). B - Material da zona não saturada (Parâmetro O). C - Profundidade ao lençol freático (Parâmetro D).

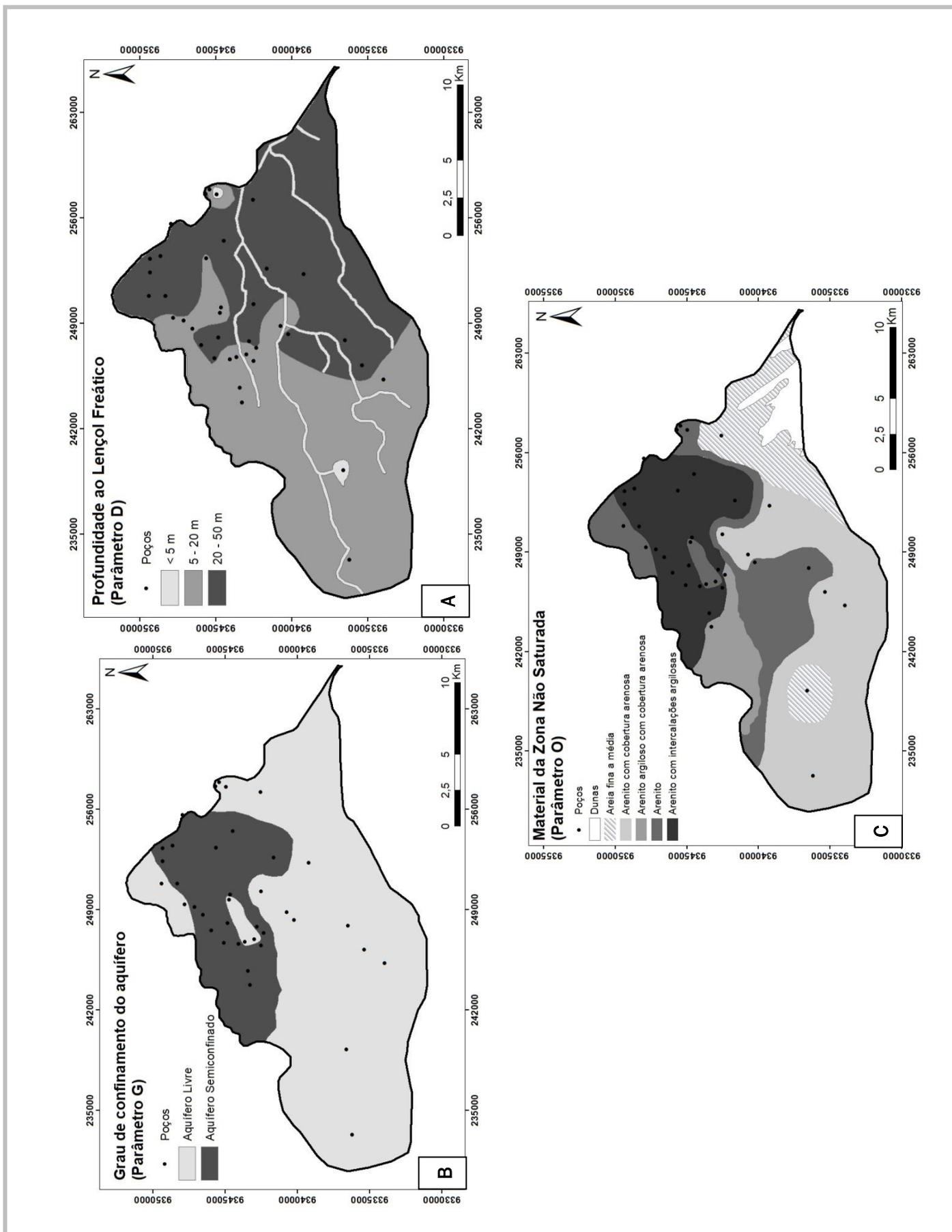
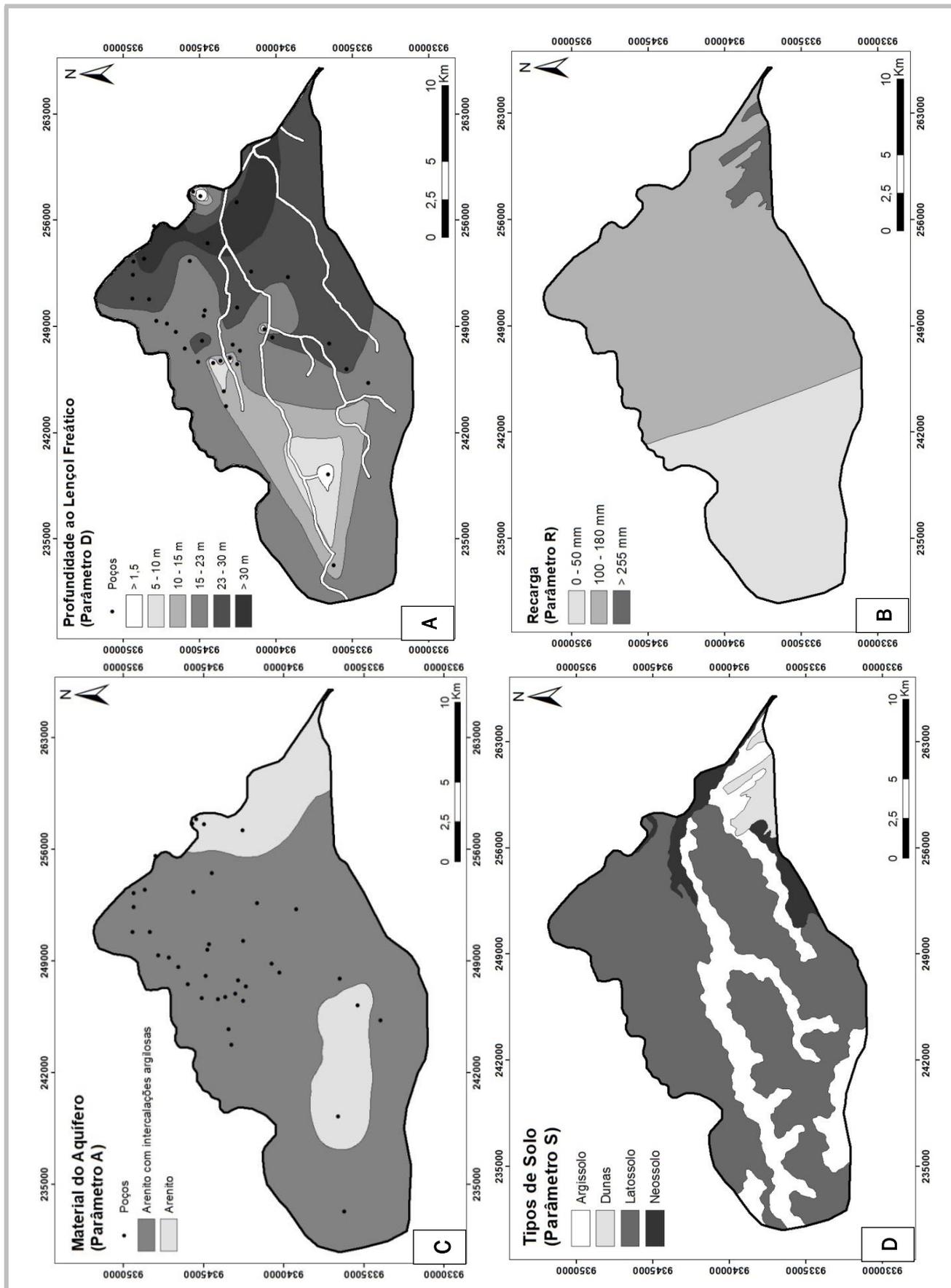


Figura 4 – Base de dados cartográficos utilizados na avaliação da vulnerabilidade natural do SAB na Bacia do Rio Pirangi a partir do método DRASTIC. A - Profundidade ao lençol freático (Parâmetro D); B - Recarga pluviométrica (Parâmetro R), ANA (2012); C - Material do aquífero (Parâmetro A); D - Tipos de solo (Parâmetro S), IBGE; E - Declividade do terreno (Parâmetro T), (UGSS); F - Material da zona não saturada (Parâmetro I); G - Condutividade Hidráulica (Parâmetro C), MELO *et al.* (2017).



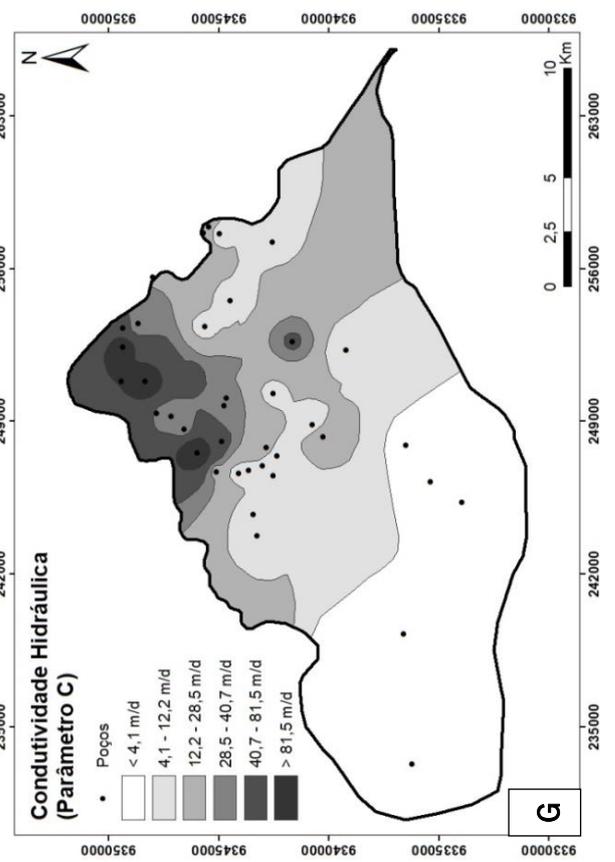
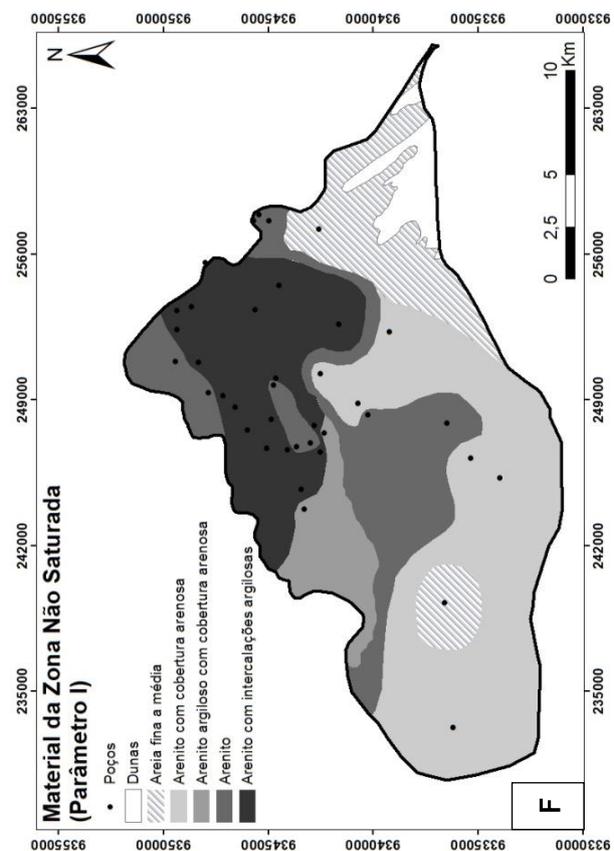
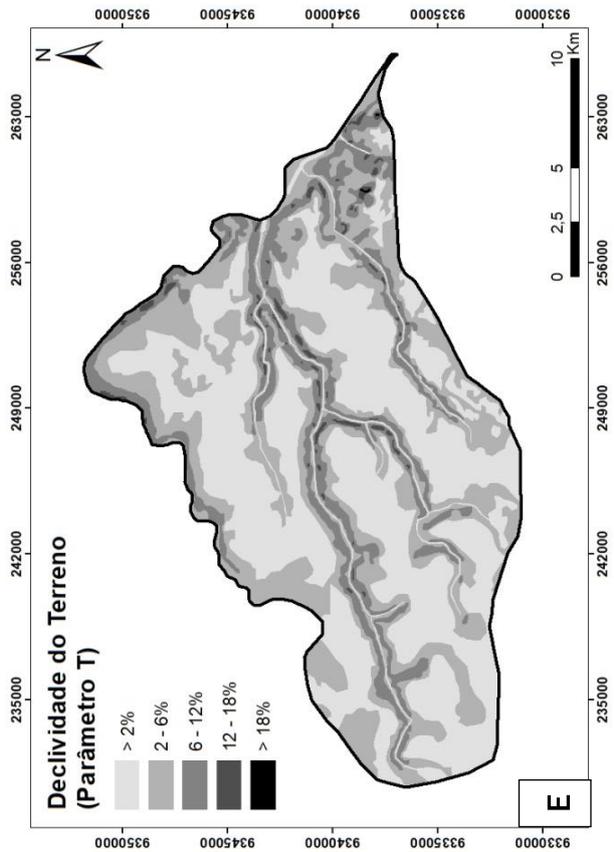
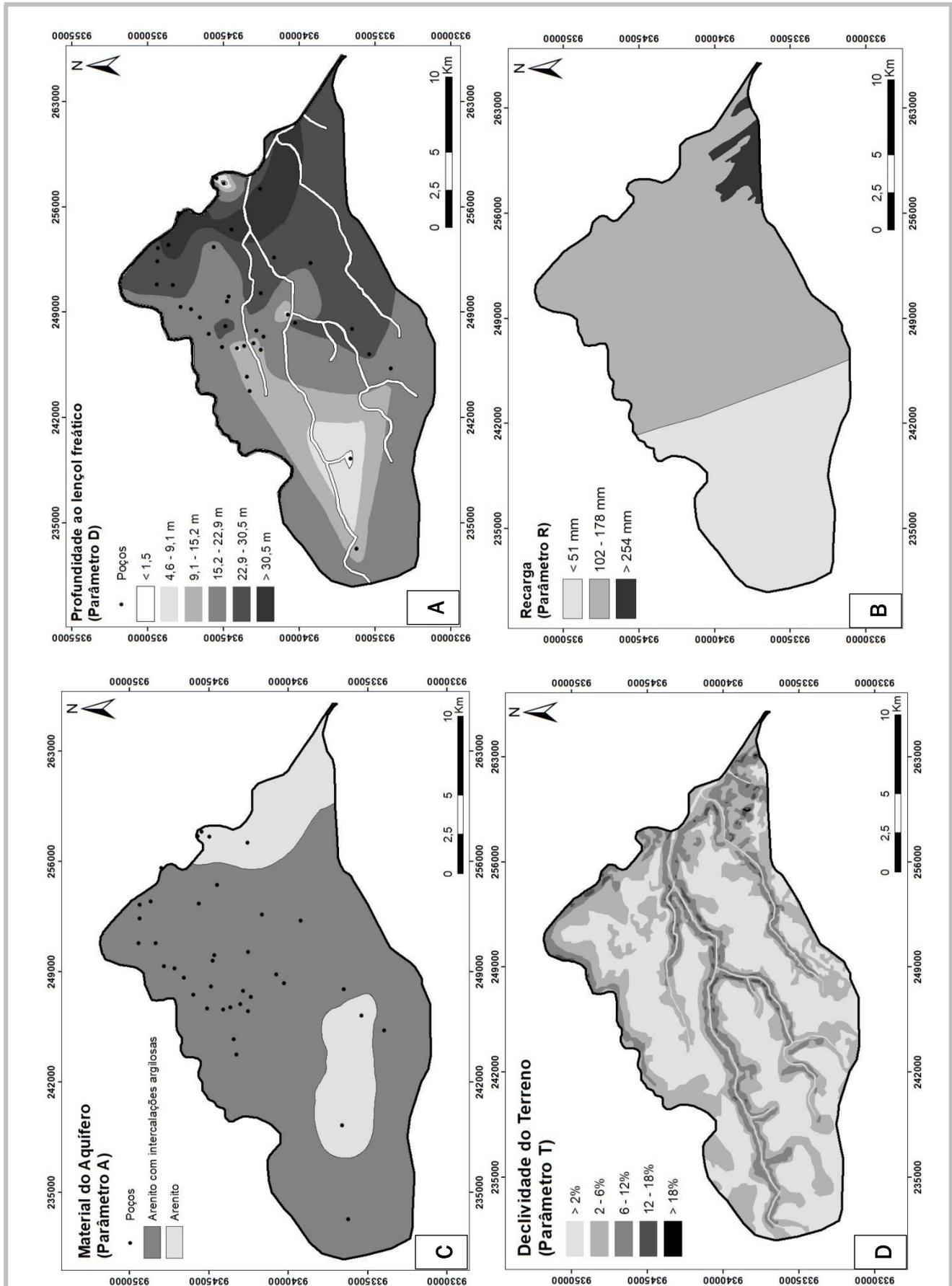
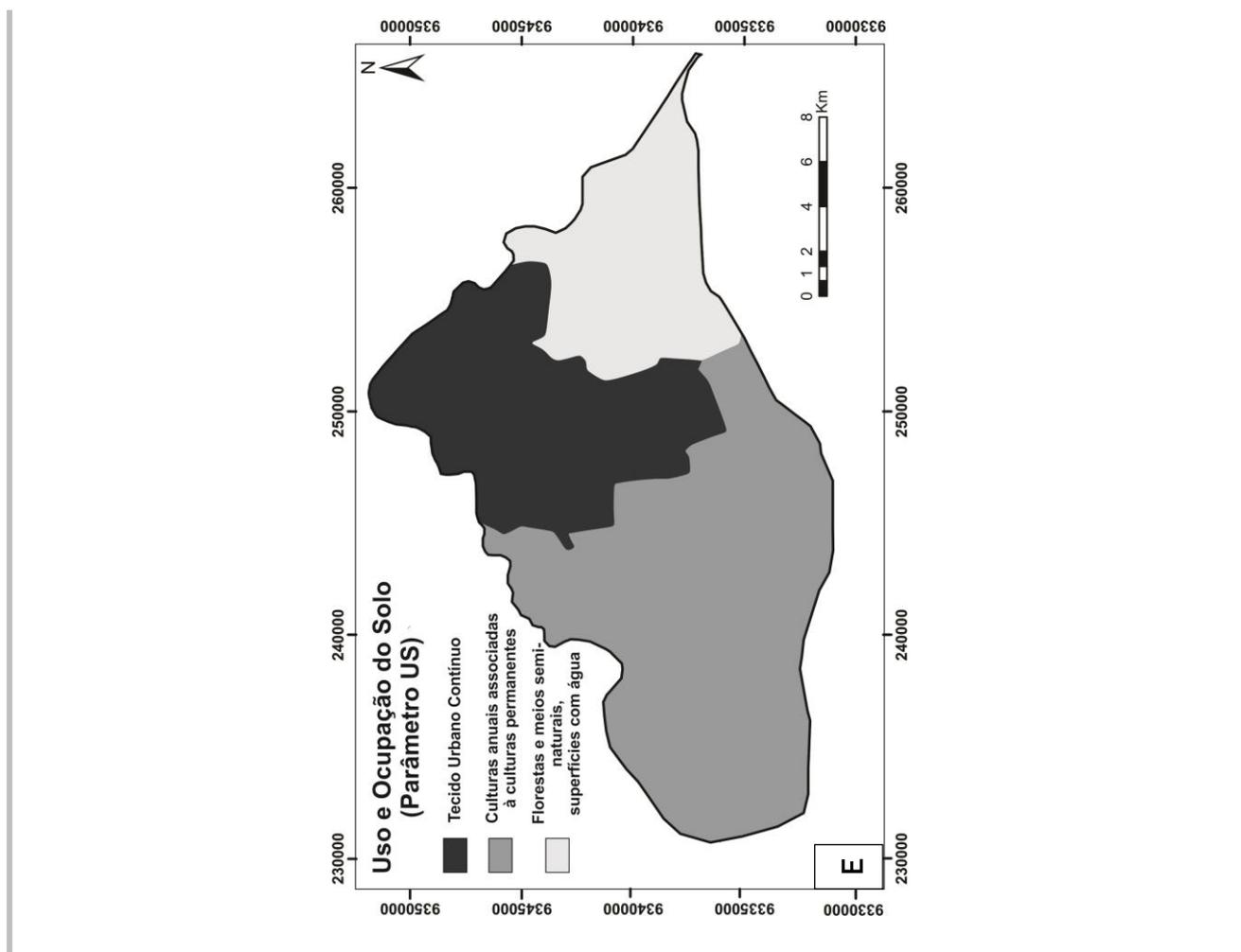


Figura 5 – Base de dados cartográficos utilizados na avaliação da vulnerabilidade natural do SAB na Bacia do Rio Pirangi a partir do método IS. A - Profundidade ao lençol freático (Parâmetro D); B - Recarga pluviométrica (Parâmetro R), ANA (2012); C - Material do aquífero (Parâmetro A); D - Declividade do terreno (Parâmetro T); E - Uso e ocupação do solo (Parâmetro US), MELO *et al.* (2017).



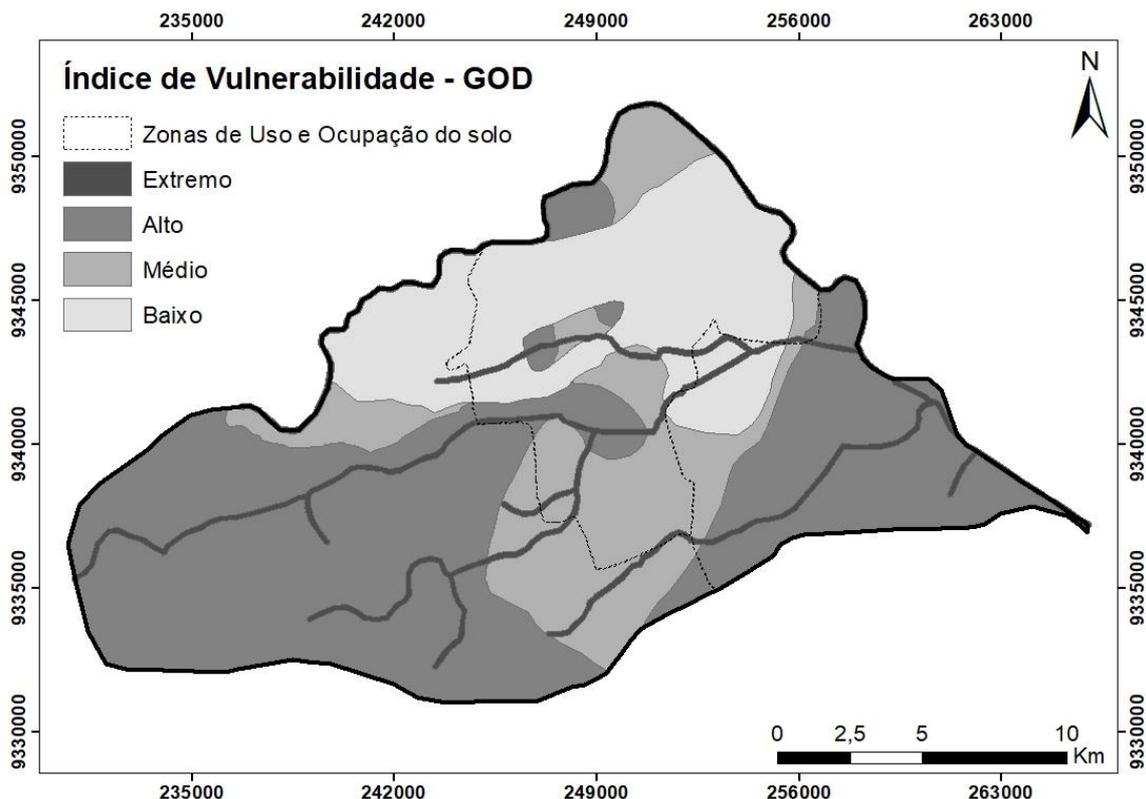


A avaliação da vulnerabilidade do SAB na Bacia do Rio Pirangi pelo método GOD identificou quatro categorias de vulnerabilidade distintas (Figura 6): os valores de baixa vulnerabilidade se concentram na região centro norte da bacia (22,76%), abrangendo predominantemente a zona urbana; no setor centro sul e extremo norte (19,52%), também caracterizado como perímetro urbano, predominam valores de vulnerabilidade média; nas regiões oeste, onde são desenvolvidas atividades agrícolas, e sudeste, a qual preserva características naturais relevantes, prevalece índice de vulnerabilidade alto (51,66%); atribuiu-se índice de vulnerabilidade extrema para os leitos dos rios (6,06%).

No domínio centro norte da bacia, a ocorrência de camadas argilosas na zona não saturada confere ao aquífero a característica de semiconfinamento, tornando essa região menos susceptível à contaminação. Por outro lado, o caráter livre do aquífero no restante na área de estudo concede às águas subterrâneas maior exposição à contaminação, constituindo zonas de média e alta vulnerabilidade. A zona de média vulnerabilidade ocorre predominantemente onde a profundidade ao lençol freático é inferior a 20 m e a zona não saturada é composta por arenitos, arenitos com coberturas arenosas e arenitos argilosos com coberturas arenosas. Conforme método apresentado, o “valor 0” atribuído a essas litologias pouco distoam entre si, sendo nesse caso, a profundidade ao lençol freático fator de maior controle no índice de vulnerabilidade. As zonas de alta vulnerabilidade predominam onde o lençol freático está mais próximo da superfície (setor oeste) e onde a zona não saturada é constituída por sedimentos (inconsolidados), permitindo maior infiltração de um possível contaminante (setor sudeste). Considerando a ampla relação entre os mananciais superficiais e subterrâneos na área de estudo, constatou-se índice de extrema vulnerabilidade à contaminação aos cursos d’água.

Confrontando o índice de vulnerabilidade GOD e o potencial contaminante das cargas poluidoras, é sugerido que o risco à contaminação do aquífero na zona urbana varia entre moderado (domínio de baixa vulnerabilidade) e alto (domínio de média vulnerabilidade). No setor oeste, é revelado risco à contaminação extrema. Já na zona de ecossistema de lagoas e dunas, a qual se caracteriza pela baixa intervenção antrópica, apesar do alto índice de vulnerabilidade natural, o potencial contaminante insignificante concede à região baixo risco à contaminação.

Figura 6 - Avaliação de vulnerabilidade natural à contaminação do SAB na Bacia do Rio Pirangi pelo método GOD.



A partir do método DRASTIC foram identificadas três categorias de vulnerabilidades distintas (Figura 7): baixa vulnerabilidade com predomínio no setor oeste da área (zona agrícola), além de ocorrência nos setores central e sul (70,39%); vulnerabilidade intermediária no setor norte, abrangendo parte da zona urbana consolidada, e no leste, abrangendo o setor com pouca interferência antrópica (23,55%); assim como no método GOD, atribuiu-se máxima vulnerabilidade para o leito dos rios (6,06%).

Tendo em vista a quantidade de parâmetros analisados, o método DRASTIC permite avaliação mais detalhada dos mecanismos envolvidos no transporte dos contaminantes através dos mananciais subterrâneos. No método GOD, a profundidade do nível do lençol freático foi determinante para definir uma zona de alta vulnerabilidade no setor oeste da área, contudo, ao considerar a recarga pluviométrica e a condutividade hidráulica, o método DRASTIC apresenta resultado distinto, visto que o setor oeste apresenta baixos valores de recarga e de condutividade hidráulica implicando em menor fragilidade do aquífero à contaminação. Diferente dos resultados obtidos pelo método GOD, a aplicação do método DRASTIC revela que a maior parte da área de estudo apresenta baixo índice de vulnerabilidade à contaminação.

No domínio norte da área, os elevados valores de condutividade hidráulica, atingindo 176,25 m/dia, contribuem para aumento da susceptibilidade do aquífero, definindo zona de vulnerabilidade intermediária. No domínio sudeste, a recarga elevada e à presença de sedimentos (inconsolidados) na zona não saturada implicam índice de vulnerabilidade intermediário.

Tendo em vista o perigo à poluição do aquífero, é interpretado que o risco à contaminação do aquífero na zona urbana varia entre moderado (zona de baixa vulnerabilidade) e alto (zona de média vulnerabilidade). No domínio oeste da área de estudo, as características de vulnerabilidade natural baixa e o elevado potencial poluidor oriundo das atividades agrícolas atribui risco à poluição moderado. No setor sudeste, apesar da vulnerabilidade média do aquífero, a inexpressividade de fontes poluidoras, confere baixo risco à poluição do aquífero.

A aplicação do método IS resultou no zoneamento de três classes de vulnerabilidade (Figura 8): no domínio “tecido urbano contínuo”, localizados no norte e centro da bacia e caracterizado por zona urbana consolidada e áreas de expansão urbana, são determinadas zonas de vulnerabilidade intermediária. No setor sudeste, caracterizado como “florestas e meios seminaturais, superfícies com água” resultaram em baixa vulnerabilidade do SAB à contaminação, com exceção das áreas com campos dunares, onde a recarga pluviométrica é acentuada. No setor oeste da bacia, apesar da baixa recarga pluviométrica, a baixa profundidade ao lençol subterrâneo e o desenvolvimento de atividades agrícolas define zona de vulnerabilidade intermediária. A zona de baixa vulnerabilidade perfaz 37,31% da área, enquanto a intermediária e alta, 55,35% e 7,34%, respectivamente.

Figura 7 - Avaliação de vulnerabilidade natural à contaminação do SAB na Bacia do Rio Pirangi pelo método DRASTIC.

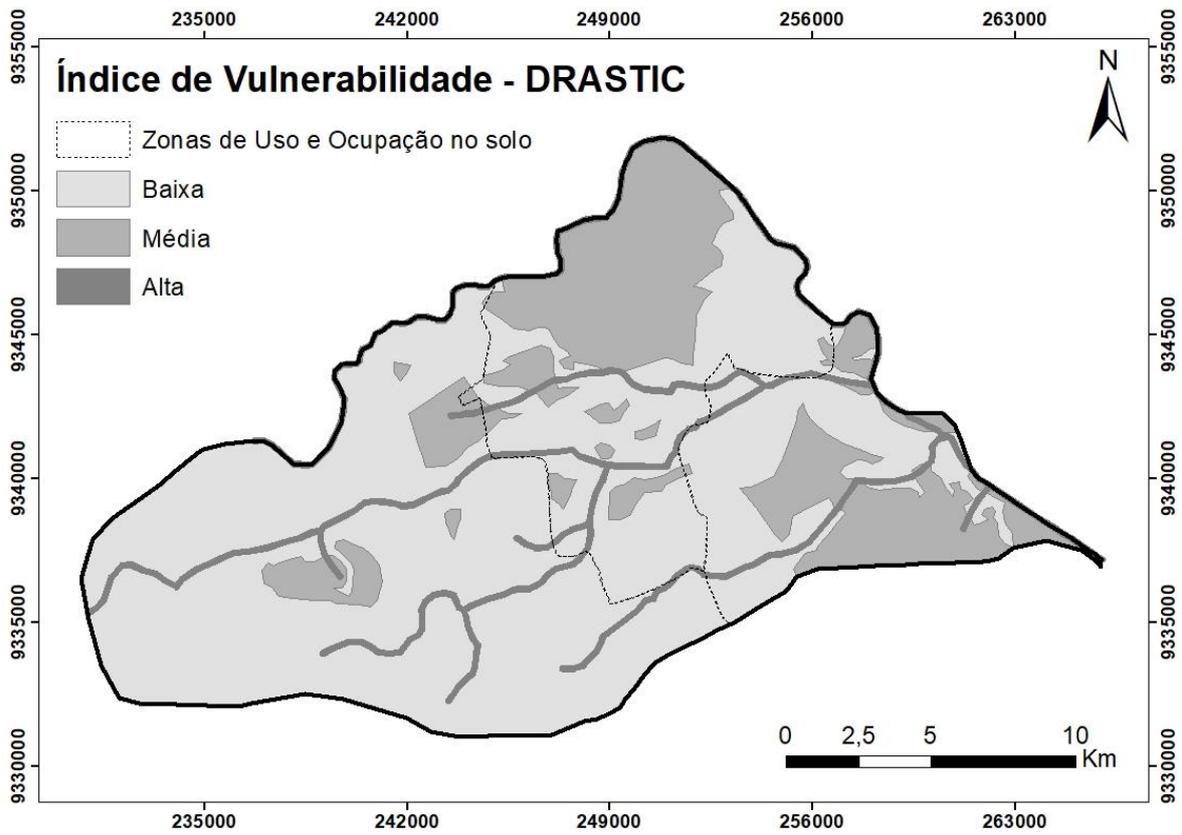
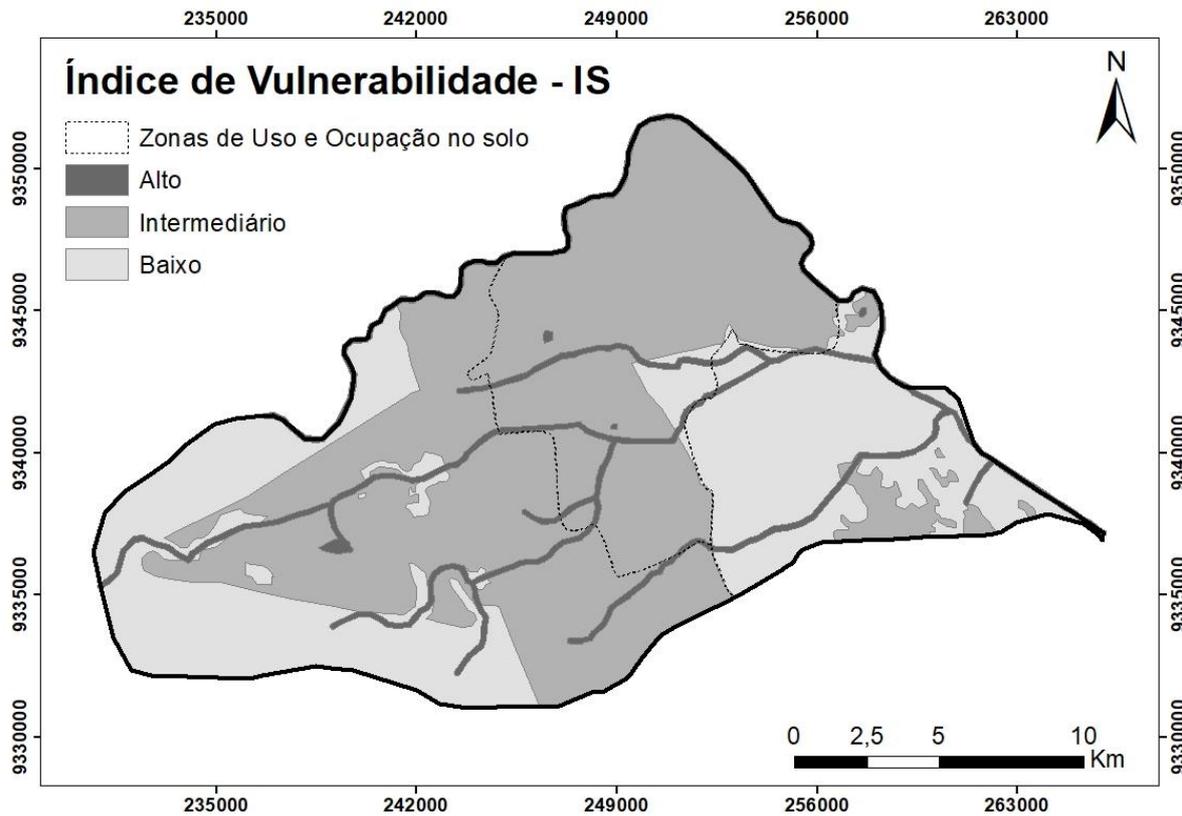


Figura 8 - Avaliação de vulnerabilidade natural e antrópica à contaminação do SAB na Bacia do Rio Pirangi pelo método IS.



5. CONCLUSÕES

Considerando a necessidade de conciliar o desenvolvimento econômico com a proteção dos recursos naturais, o mapeamento da vulnerabilidade do aquífero à contaminação constitui ferramenta importante na gestão dos recursos hídricos subterrâneos. O mapeamento da vulnerabilidade do SAB na Bacia do Rio Pirangi aplicando os métodos GOD, DRASTIC e IS tem caráter inovador diante de carência de estudos com esse enfoque na área.

De modo geral, o zoneamento da vulnerabilidade a partir do método GOD revelou maior restrição quanto ao uso e ocupação do solo, visto que foram identificadas predominantemente setores de alta vulnerabilidade, enquanto que nos métodos IS e DRASTIC há predominância de vulnerabilidade intermediária e baixa, respectivamente. Considerando as zonas de uso e ocupação do solo, identificou-se para a zona urbana índice de vulnerabilidade predominantemente baixo e intermediário através dos métodos GOD e DRASTIC e índice intermediário através do método IS. Nas zonas de desenvolvimento agrícola e no domínio de lagoas e dunas com pouca intervenção humana, determinou-se, através dos métodos DRASTIC e IS, índices de vulnerabilidade baixo e intermediário, enquanto pelo método GOD há predominância de alta vulnerabilidade. A aplicação dos métodos GOD, DRASTIC e IS gerou resultados predominantemente distintos entre si, o que decorre dos diferentes parâmetros considerados em cada método e da relevância de cada na análise. Enquanto o método DRASTIC coloca a profundidade ao lençol freático e o impacto da zona não saturada como principais fatores controladores, o método IS enfatiza a litologia do aquífero e o impacto antrópico. No método GOD, apesar de não atribuir pesos para os parâmetros analisados, tendo em vista sua simplicidade, desconsidera características importantes da zona saturada como o material do aquífero e a condutividade hidráulica.

Tendo em vista o mapeamento de vulnerabilidade realizado através dos métodos GOD e DRASTIC e o potencial contaminante das atividades antrópicas desenvolvidas na área de estudo, o SAB na zona urbana apresenta risco à contaminação moderado a alto. Para a zona agrícola, foi obtido interpretações distintas em função da vulnerabilidade do aquífero, sendo risco à contaminação extremo quando aplicado o método GOD e moderado quando aplicado o DRASTIC. Para zona de ecossistema de lagoas e dunas, apesar dos resultados de vulnerabilidade, atribuiu-se baixo risco à contaminação em virtude do perigo insignificante das atividades desenvolvidas nessa área.

O uso das águas do SAB é imprescindível para o contínuo desenvolvimento urbano, agrícola e industrial na área da Bacia do Rio Pirangi, com destaque para o município de Parnamirim. Entretanto, o mapeamento de vulnerabilidade à contaminação do aquífero identificou áreas sensíveis à poluição subterrânea, sendo necessária adoção de medidas restritivas quanto ao uso e ocupação do solo. Além da aplicação de práticas de controle ambiental mais efetivas, recomenda-se elaboração de bases cartográficas mais detalhadas para a área de estudo principalmente em relação ao tipo de solo e a recarga pluvial assim como aquisição de dados mais aprofundados quanto ao uso e ocupação de solo e as fontes de contaminação.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq – pelo apoio no desenvolvimento do projeto da Rede FINEP/CNPq – CT – Hidro sob o título “Potencialidades e definição de estratégias de manejo das águas subterrâneas da região de Parnamirim/RN”.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLER, L.; BENNET, T.; LEHR, J. H.; PETTY, R. J. DRASTIC: a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hidrogeologic settings. US. EPA Report 600/2-85/018, 1987.
- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. NASCIMENTO, F. S.; FERREIRA, A. N. P.; STEIN, P.; CABRAL, N. M. T.; MARTINS, C. A.; FIGUERÊDO, E. M.. Estudo Hidrogeológico para a orientação do manejo das águas subterrâneas da Região Metropolitana de Natal/RN. Volume 1 – Avaliação Hidrogeológica. Brasília: Agência Nacional de Águas, 2012. 285 p.
- ANGELIM, L. A. A.; NESI, J.R.; TORRES, H. H. F.; MEDEIROS, V. C.; SANTOS, C. A. **Geologia e Recursos Minerais Do Estado Do Rio Grande Do Norte**. Recife: Serviço Geológico do Brasil - CPRM, 2006. 119 p.
- ARAÚJO, T. B.; CLEMENTINO, M. L. M.. Diagnóstico para o plano estratégico Natal - uma metrópole em formação. Volume 3 – Relatório temático da divisão físico-territorial. Recife: Universidade Federal de Pernambuco, 2006. 252 p.
- AUGE, M. **Água subterrânea deterioro de calidad y reserva**. Buenos Aires, 2006.
- BARRETO, A. M. F.; SUGUIO, K.; BEZERRA, F. H. R.; TATUMI, S. H.; YEE, M.; GIANNINI, P. C. F. Geologia e Geomorfologia do Quaternário Costeiro do Estado do Rio Grande do Norte. **Revista do Instituto de Geociências - USP**, v. 4, p. 1–12, 2004.
- BEZERRA, F. H. R.; LUCENA, L. R. F. DE; SAAD, A.; MOREIRA, J. A. M.; LINS, F. A. P. L.; NOGUEIRA, A. M. B.; MACEDO, J. W. P.; NAZARÉ JR. D. 1993. Estruturação neotectônica do litoral de Natal-RN, com base na correlação entre dados geológicos, geomorfológicos e gravimétricos. In: Simpósio Nacional De Estudos Tectônicos, IV. 1993, Belo Horizonte. **Anais**. Belo Horizonte - MG. SBG, Núcleo MG. Bol. 12: p. 317-321.
- BRAGA, Antônio Celso de Oliveira. Estimativa da vulnerabilidade natural de aquíferos: uma contribuição a partir da resistividade e condutância longitudinal. **Revista Brasileira de Geofísica**. v. 26(1), p. 61-68, 2008.
- CONCAR. Comissão Nacional de Cartografia. Cenário Situacional. Disponível em: <<http://www.concar.ibge.gov.br/planejEstrategico.aspx?sub=3>>. Acesso em: 05/11/2019.
- EMPARN. Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte. Monitoramento pluviométrico. Disponível em: <<http://189.124.130.5:8181/monitoramento/monitoramento.php>>. Acesso em 04 de setembro de 2019.

- FOSTER, S. S. D.; HIRATA, R. C. A.; GOMES, D. C.; D'ELIA, M.; PARIS, M. Proteção da qualidade de água subterrânea: um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências ambientais. Banco Mundial/SERVMAR. São Paulo, 2006.
- FOSTER, S.; HIRATA, R.; ANDREO, B. (2013). The aquífer pollution Vulnerability concept: ai dor impediment in promoting groundwater protection?. **Hydrogeology Journal** (2013) 21: p. 1389 – 1392. DOI 10.1007/s10040-013- 1019-7. 2013.
- FRANCÉS, A.; PERALTA, E.; FERNANDES, C.; RIBEIRO, L. Development and application in the Alentejo region of a method to assess the vulnerability of groundwater to difuse agriculture pollution: the susceptibility index. Lisboa, Geosystem Center IST, Third International Conference on Future Groundwater Resources at Risk, june, 2001.
- GOERL, R.F; KOBIYAMA, M; PELLERIN, J.R.G.M. Proposta metodológica para mapeamento de áreas de risco a inundação: estudo de caso do município de Rio Negrinho – SC. **Boletim de Geografia**, Maringá, v.30, n.1, p.81-100, 2012.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Mapas temáticos – solos. Disponível em <<https://mapas.ibge.gov.br/tematicos/solos>>. Acessado em: 03/07/2019.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Pesquisa de Informações Básicas Municipais. <<https://cidades.ibge.gov.br/>>. Acessado em: 18/09/2019.
- KÖPPEN, W.; GEIGER, R. *Klimate der Erde*. Gotha: Verlag Justus Perthes. 1928.
- LEITÃO, T. E. Poluição de águas subterrâneas: principais problemas, processos de prevenção e de reabilitação. Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Cabo Verde, nov. 2003.
- LUCENA, L. R. F.; ROSA FILHO, E. F.; BITTENCOURT, A. V. L. A potenciometria do Aquífero Barreiras no setor oriental da Bacia Do Rio Pirangi-RN e considerações sobre a relação com mananciais superficiais. **Revista Águas Subterrâneas**, v. 18, n. 41, p. 19–28, 2004.
- LUCENA, L. R. F.; Rosa FILHO, E. F.; HINDI, E. C. O controle estrutural no Aquífero Barreiras - área da Bacia do Rio Pirangi-RN. **Revista Águas Subterrâneas**, v. 20, n. 1, p. 83–98, 2006.
- MELO, J. G. Potencialidades e definição de estratégias de manejo das águas subterrâneas da região de Parnamirim, RN. Relatório Final de Pesquisa. Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte. MCT/CNPq - FINEP/CTHIDRO, 2017.
- NOBRE, R.C.M. **Avaliação de Risco para o Uso e Proteção de Aquíferos. Estudo de Caso: Região Metropolitana de Maceió**. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, 269p, 2006.
- PATRIKAKI, O.; KAZAKIS, N.VOUDOURIS, K. (2012). Vulnerability Map: a Useful Tool for Groundwater Protction: na example from Mouriki Basin, North Greece. **Fresenius Environ Bull**, 21 (8c), 2516-2521. 2012.
- VARNIER, C.; HIRATA, R. Contaminação da água subterrânea por nitrato no Parque Ecológico do Tietê - São Paulo, Brasil. **Revista Águas Subterrâneas** n. 16/ Maio 2002.
- SERHID. Secretaria de Recursos Hídricos do Rio Grande do Norte. Plano Estadual de Recursos Hídricos do Rio Grande do Norte. Relatório Técnico. HIDRO-SERVICE/SERHID. Natal, 1998.
- TUCCI, C. E. M. **Qualidade da água subterrânea**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003.
- USGS. United States Geological Survey. Earth Explorer. Disponível em <<https://earthexplorer.usgs.gov/>>. Acesso em: 05/07/2019.