

Vulnerabilidade à Poluição Antropogênica no Sistema Aquífero Dunas/Barreiras da Região Metropolitana de Natal

Vulnerability to Anthropogenic Pollution in the Dunas/Barreiras Aquifer System from the Metropolitan Region of Natal

*Felix David Rivera Madroño*¹ 

*Felipe Silva de Oliveira*² 

*Raquel Franco de Souza*³ 

*Júlio Alejandro Navoni*⁴ 

Palavras-chave:

Geoprocessamento
Álgebra de Mapas
Vulnerabilidade Intrínseca
Litologia
Confinamento Hidráulico

Resumo

Tradicionalmente, as águas subterrâneas têm sido consideradas protegidas pelo subsolo. No entanto, o descarte de poluentes estáveis em zonas de infiltração favorável pode gerar contaminação do recurso hídrico, colocando em risco a saúde da população. Para solucionar a crescente contaminação de aquíferos por atividades antrópicas, a avaliação de vulnerabilidade é um dos requisitos fundamentais para gerar diretrizes, estratégias e políticas de prevenção e minimização da contaminação de águas subterrâneas. O presente estudo tem como objetivo avaliar a vulnerabilidade à poluição antropogênica nos aquíferos da Região Metropolitana de Natal. Nesta pesquisa foi utilizado o método GODS (Grau de confinamento, Ocorrência de substrato litológico, Distância da superfície do terreno ao nível da água subterrânea e tipo de Solo), que propõe um cálculo da vulnerabilidade por meio da multiplicação de quatro parâmetros geológicos e hidrológicos, os quais são: grau de confinamento hidráulico, ocorrência do substrato subjacente, distância ao nível da água subterrânea e tipo de solo. Foram usadas ferramentas de um Sistema de Informações Geográficas - SIG. Os resultados mostram que a maior parte do território está em um nível de vulnerabilidade baixo com 39,75%, em nível médio com 24,26%, seguido de um nível de vulnerabilidade extrema com 14,7%, 10,68% com nível alto e 10,61% insignificante. A pesquisa contribuiu para evidenciar como as características intrínsecas do aquífero Dunas-Barreiras da Região Metropolitana de Natal, permitem o transporte de poluentes até o lençol freático em algumas áreas como na zona costeira e nas porções mais baixas das bacias hidrográficas.

Keywords:

Geoprocessing
Map Algebra
Intrinsic Vulnerability
Lithology
Hydraulic Confinement

Abstract

Traditionally, groundwater has been considered protected by the subsurface. However, the disposal of stable pollutants in favorable infiltration zones can generate contamination of the hydric resource, jeopardizing the health of the population. To tackle the increasing contamination of aquifers by anthropic activities, vulnerability assessment is one of the fundamental requirements to generate guidelines, strategies, and policies to prevent and minimize groundwater contamination. The present study aims to evaluate the vulnerability to anthropogenic pollution in aquifers of the Metropolitan Region of Natal (MRN). In this research, the GODS (Groundwater hydraulic confinement, Overlaying strata, Depth to groundwater and Soil type) method was used, proposing a vulnerability calculation through the multiplication of four geological and hydrological parameters, which are: degree of hydraulic confinement, the occurrence of the underlying substratum, distance to the groundwater level, and type of soil. Tools from a Geographic Information System (GIS) were used. The results show that most of the territory is in a low vulnerability level with 39.75%, in moderate level with 24.26%, followed by very high vulnerability level with 14.7%, 10.68% with high level, and 10.61% insignificant level. The research contributed to highlighting how the intrinsic characteristics of the Dunas-Barreiras aquifer in the Metropolitan Region of Natal, allow the transport of pollutants to the water table in some areas such as in the coastal zone and in the lower portions of the river basins.

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN, Natal, RN, Brasil. david.r.1911@hotmail.com

² Instituto Federal do Rio Grande do Norte– IFRN, Natal, RN, Brasil. felipesilva1299@gmail.com

³ Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN, Natal, RN, Brasil. francodesouza.raquel@gmail.com

⁴ Instituto Federal do Rio Grande do Norte– IFRN, Natal, RN, Brasil. navoni.julio@gmail.com

INTRODUÇÃO

No Brasil, o potencial subterrâneo possui 181 aquíferos, dos quais grande parte das águas subterrâneas são extraídas por poços tubulares. Estima-se que há mais de 2,5 milhões de poços tubulares no país, responsáveis por extrair 17.580 milhões de m³ de água ao ano (ANA, 2010). Diversos setores utilizam-se das águas subterrâneas, sendo os principais usos o abastecimento doméstico (30%), agropecuário (24%), abastecimento público urbano (18%) e abastecimento múltiplo (14%), industrial (10%) e outros (4%) (HIRATA et al., 2019). A exploração dos aquíferos garante a segurança hídrica de milhões de pessoas no Brasil, desde pequenos vilarejos a grandes centros urbanos; as águas subterrâneas representam o principal recurso disponível para as populações vulneráveis, principalmente nas regiões áridas e semiáridas (ANA, 2020).

Nas regiões semiáridas a água subterrânea é um recurso local e regional vital e com alta demanda de uso e consumo humano (KHAIR et al., 2019; LAVOIE et al., 2015), o qual vem sendo contaminado pelo processo crescente de urbanização, desenvolvimento industrial, e atividades agropecuárias (WANG et al., 2012; REGO et al., 2021), decorrente do derramamento ou vazamento de substâncias tóxicas (óleos e gorduras, esgotos, hidrocarbonetos, resíduos químicos, etc.) que se infiltram, a sobre-exploração dos aquíferos, colocando em risco a sua recarga e funcionamento normal, a manutenção inadequada dos sistemas de extração de poços, a contaminação biológica de águas subterrâneas por mau funcionamento de sistemas sépticos ou vazamentos na rede de esgoto, a eliminação, impermeabilização ou urbanização nas zonas de recarga dos aquíferos, a deficiência no sistema de saneamento, expansão urbana e principalmente a contaminação por nitratos das águas domésticas (VASCONCELOS et al., 2018); esta última é agravada pela expansão das fronteiras agrícolas, a utilização de agroquímicos e a descarga de água doméstica não tratada no solo (REGO et al., 2021). Tudo isto gera sobrecarga dos sistemas de esgoto (PALMIOTTO et al., 2018), além de afetar a maneira como as populações sustentam-se e agravar a problemática de saúde da população (BANA E COSTA et al., 2014; FORMAN, 2008; DE ASSIS et al., 2020).

Uma das regiões do nordeste brasileiro que vem apresentando os problemas mencionados anteriormente é a Região Metropolitana de Natal (ANA, 2012). Na referida região, o

aquífero Barreiras, em conjunto com o aquífero Dunas, responde por cerca de 65% do abastecimento da população para usos públicos e privados em função da necessidade de uma fonte de água, imposta pelas suas condições climáticas (CPRM, 2003; PINHEIRO et al., 2018). No combate aos efeitos da seca, esse aumento do uso não foi conduzido através de planejamentos calcados no conhecimento territorial (ANA, 2012; GARCIA et al., 2018), tendo por resultado consecutivas contaminações por nitratos e emergências sanitárias nas regiões urbanas e periurbanas (ANA, 2012; PINHEIRO et al., 2018; SANTOS et al., 2018). Infelizmente a contaminação do recurso hídrico é um processo imperceptível e, em alguns casos, irreversível que, para os países em desenvolvimento, tem custos altos e exigências de tempo que podem limitar os esforços para melhorar suas condições (YU et al., 2010).

Na luta para reduzir efetivamente a contaminação das águas subterrâneas, a avaliação da vulnerabilidade dos aquíferos constitui um dos pilares importantes na gestão do recurso hídrico subterrâneo em uma região; além disso, os mapas de vulnerabilidade de contaminação das águas subterrâneas vêm sendo cada vez mais utilizados para dar suporte aos planos de gestão ambiental dos órgãos governamentais e não-governamentais (BAALOUSHA, 2011; LINHARES et al., 2014). A vulnerabilidade do aquífero à contaminação representa as características intrínsecas que determinam sua suscetibilidade de ser adversamente afetado por uma carga poluente imposta (MITJAVILA; BRUNO, 2011). A avaliação da vulnerabilidade das águas subterrâneas é uma ferramenta útil que pode ajudar a rastrear áreas sensíveis, as quais podem ser afetadas por fontes potencialmente prejudiciais (LI et al., 2016), além de representar uma ferramenta preventiva que permite determinar, a priori, a capacidade de proteção natural dos aquíferos e distinguir quais áreas necessitam de medidas mitigatórias e/ou reducionistas ao perigo de contaminação diante da intervenção antrópica (REGO et al., 2021).

As práticas de avaliação da vulnerabilidade podem ser baseadas em análise de sobreposição de camadas de informação geológicas e hidrogeológicas em Sistema de Informação Geográficas – SIG (CHEN et al., 2006; WANG, 2012; ZHANG et al., 2012; LI et al., 2016). A eficácia destes métodos depende diretamente da qualidade dos dados necessários para definição dos parâmetros envolvidos (MATZEU, 2017). Porém, existem alternativas inovadoras que, na ausência de informação preliminar, e devido à simplificação dos parâmetros, funcionam muito

bem na sistematização do mapeamento da vulnerabilidade dos aquíferos (PIZZOL et al., 2015). Isto pode ser uma base importante para a tomada de decisões, como planejamento territorial e monitoramento das águas subterrâneas (WANG et al., 2012).

Sem dúvida, uma alternativa viável para o estudo da vulnerabilidade dos aquíferos é a metodologia GODS, nome que tem por suas siglas (Grau de confinamento, a Ocorrência de substrato litológico, a Distância da superfície do terreno ao nível da água subterrânea e tipo de Só) idealizado por (FOSTER et al., 2002), a qual é, amplamente utilizada na América Latina, devido ao seu bom desempenho, menor custo e maior facilidade de obtenção das informações necessárias (GAVIRIA; BETANCUR, 2010); esta metodologia avalia, basicamente, dois componentes de vulnerabilidade: a inacessibilidade hidráulica do poluente e a capacidade de autopurificação da zona não saturada. Nesta avaliação são feitas a sobreposição de camadas de informação, em um modelo de Sistema de Informações Geográficas, de quatro parâmetros geológicos e hidrológicos, os quais são: grau de confinamento hidráulico, ocorrência do substrato subjacente, distância ao nível da água subterrânea e o tipo de solo.

Diante do exposto, o objetivo desta pesquisa é avaliar a vulnerabilidade à poluição antropogênica nos aquíferos da Região Metropolitana de Natal – RN, por meio da sobreposição de camadas de informação geológicas e hidrogeológicas em um modelo de Sistema de Informações Geográficas - SIG, obtendo o mapa de vulnerabilidade do aquífero à contaminação. Isto objetiva a obtenção de um diagnóstico inicial da vulnerabilidade para melhorar o planejamento e ordenamento territorial, neste caso, com ênfase na proteção dos aquíferos. Diante do exposto, partiu-se da seguinte hipótese: se existem condições geológicas e hidrogeológicas na área de estudo

que favorecem a entrada de poluentes antrópicos, existe uma vulnerabilidade intrínseca elevada de contaminação das águas subterrâneas.

MATERIAL E MÉTODOS

A presente pesquisa foi desenvolvida no sistema aquífero Dunas – Barreiras, considerado um sistema único, pois apresenta uma conexão hidráulica por drenança vertical descendente. Constitui um aquífero de extensão geralmente contínua, de comportamento hidráulico livre, de idade quaternária e terciária, podendo localmente apresentar-se semiconfinado. Também é constituído por sedimentos não consolidados a semiconsolidados, de areno-argilosos a silto-argilosos e arenitos de granulação fina a grossa na cobertura dunar, localmente com frações conglomeráticas, de cor variegada (CPRM; 2003). Este sistema abrange a maior parte da superfície da Região Metropolitana de Natal (RMN) que se situa na microrregião do Litoral Oriental do Estado do Rio Grande do Norte. Possui uma superfície de 2.724 km² e inclui integralmente o município de Natal, capital do Estado, e outros treze municípios, que são Ceará-Mirim, Extremoz, São Gonçalo do Amarante, Macaíba, Parnamirim, Monte Alegre, São José de Mipibu, Nísia Floresta, Monte Alegre, Vera Cruz, Maxaranguape, Ielmo Marinho, Bom Jesus, Arês e Goianinha (PREFEITURA MUNICIPAL DE NATAL, 2019) (Figura 1). A população da RMN totaliza mais de 1,3 milhão de habitantes, sendo que 90% residem em áreas urbanas (IBGE, 2010). Por uma questão de insuficiência de dados os municípios de Vera Cruz, Maxaranguape, Ielmo Marinho, Bom Jesus, Arês e Goianinha, foram excluídos da pesquisa.

Tabela 01 - Parâmetros do método GODS

<i>Parâmetro</i>	<i>Significado</i>	<i>Baseado em</i>
G	Grau de confinamento hidráulico	Tipo de aquífero (estrutura).
O	Ocorrência do substrato subjacente	Características litológicas: consolidação, fratura, porosidade e permeabilidade.
D	Distância ao nível da água subterrânea	Profundidade do nível da água em aquíferos livres ou profundidade para teto de aquífero confinado.
S	Tipo de solo	Textura e conteúdo de matéria Orgânica

Fonte: Foster e Hirata (1988).

Além disso, foi preciso obter o cadastro de poços na RMN. As informações necessárias foram obtidas da Agência Nacional de Águas em seu relatório de “Estudos hidrogeológicos para a orientação do manejo das águas subterrâneas da Região Metropolitana de Natal (2012)”; os dados geológicos e hidrogeológicos foram obtidos no Serviço Geológico do Brasil – CPRM e no Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

Este sistema permitiu estimar o índice final de vulnerabilidade aquífero integrado do GODS (IVGODS), aplicando a seguinte equação.

$$IVGODS = G * O * D * S \text{ (Equação 1)}$$

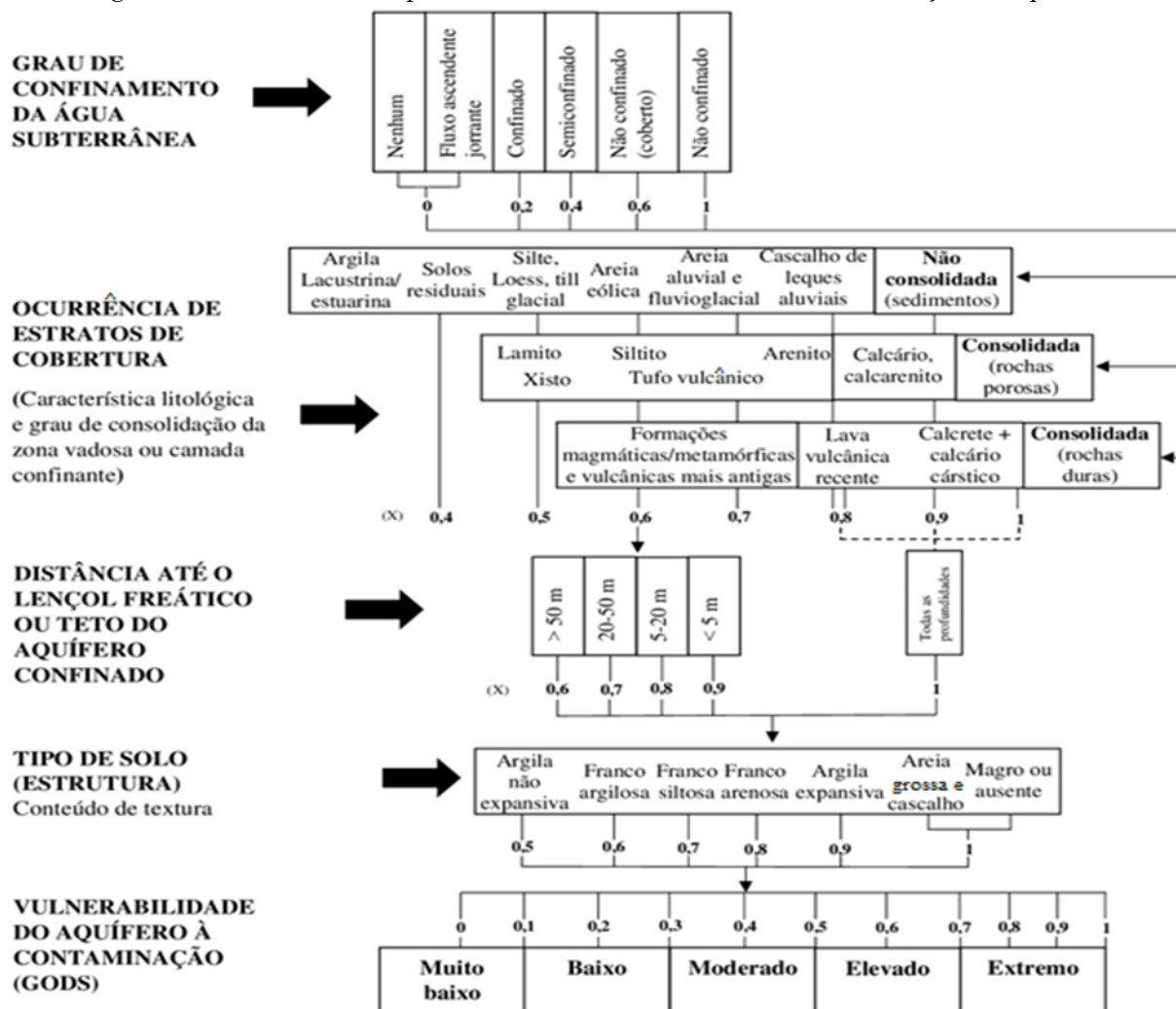
Com base nesta equação, uma série de etapas estabelecidas por (FOSTER; HIRATA, 1988) foram executadas para encontrar a vulnerabilidade do aquífero de estudo, as quais

são as seguintes:

- Identificar o grau de confinamento hidráulico do aquífero e atribuir a ele um índice em uma escala de 0,0 a 1,0.
- Especificar as características do substrato que recobre a zona saturada do aquífero e atribuir um índice de 0,4 a 1,0.
- Estimar a distância até o nível da água em aquíferos livres ou a profundidade até o teto em aquíferos confinados e atribuir um índice entre 0,6 e 1,0.
- Determinar o tipo de solo e atribuir um índice em uma escala de 0,5 a 1,0.

Para dar peso aos parâmetros que compõem a equação, foi utilizado o esquema modificado proposto por (FOSTER et al., 2002) (Figura 2), onde a ponderação dos índices de cada parâmetro é encontrada de acordo com as características da área de estudo.

Figura 02 - Método GODS para avaliar a vulnerabilidade a contaminação de aquíferos.

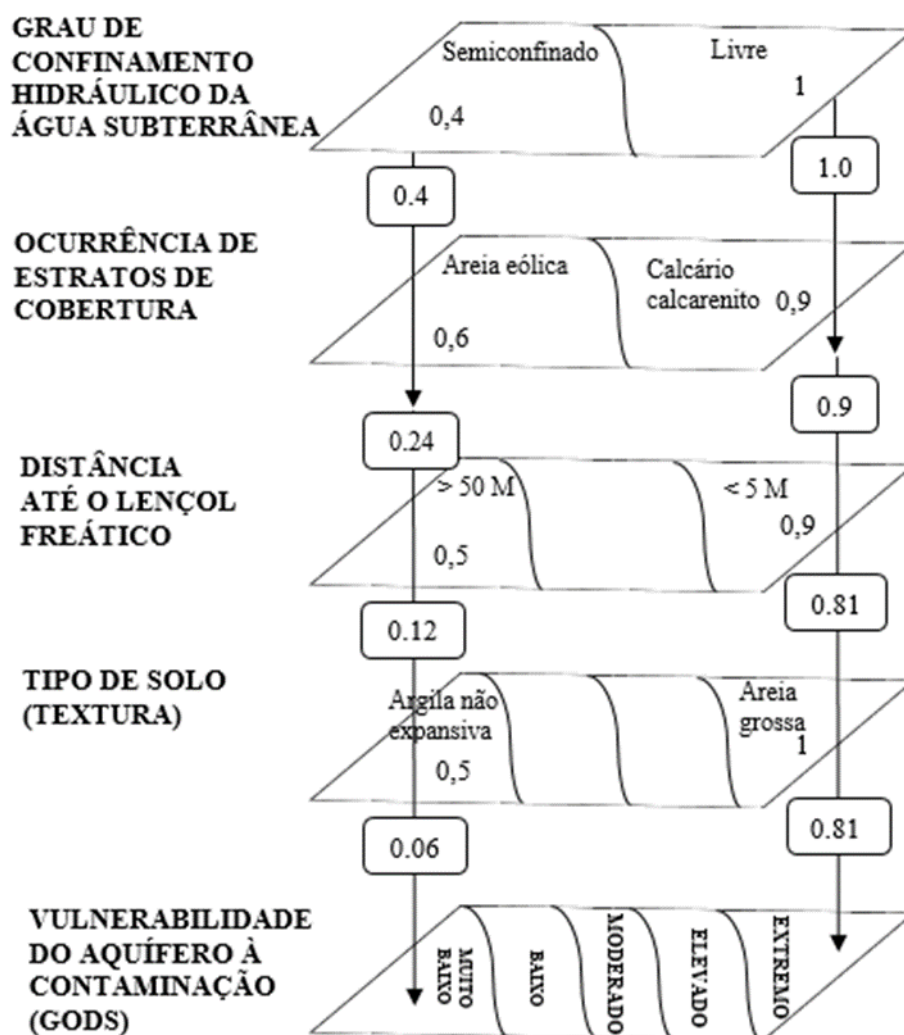


Fonte: Adaptado de Jarrín et al. (2017).

Finalmente para converter a equação 1 em uma expressão algébrica de mapas foi necessário um ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG) utilizando o software ArcGis

10.5 (Licença de estudante) da empresa ESRI e criar uma sobreposição das camadas de informações geológicas e hidrogeológicas (Figura 3).

Figura 03 - Procedimentos adotados na construção do mapa de vulnerabilidade com base no método GODS.



Fonte: Os autores (2022).

Por meio do software ArcGis 10.5, uma ferramenta de geotecnologia muito eficiente na área de geoprocessamento e processamento digital de imagens (PDI), foi feita a criação de uma tabela com os dados obtidos e se definiram as informações necessárias para a análise do índice de vulnerabilidade pelo método de GODS. Essas informações foram inseridas em formato vetorial de extensão *shapefile*. Para tanto, foi necessária a realização de um processamento de conversão para transformar esses shapes em

arquivos raster; as tipologias das camadas de informação de cada parâmetro foram convertidas de dados alfanuméricos para vetoriais e, posteriormente, em matriz; para isto foi necessário o princípio da álgebra de mapas. Uma vez obtido cada parâmetro em um arquivo raster, foi preciso uma análise final, que consistiu em utilizar a calculadora raster (Raster Calculator) para gerar uma classificação nova de vulnerabilidade (Tabela 2) em nula, desprezível, baixa, média, alta e extrema. O mapa foi feito na escala de 1: 600.000.

Tabela 02 - Classes de vulnerabilidade da metodologia GODS.

<i>Classe de Vulnerabilidade</i>	<i>Definição Correspondente</i>	<i>Índice de Vulnerabilidade</i>
Insignificante	Presença de camadas confinantes em fluxo vertical significativo de água subterrânea (percolação).	0,0 - 0,1
Baixa	Vulnerável somente a contaminantes conservadores, em longo prazo, quando contínua e amplamente lançados ou lixiviados.	0,1 - 0,3
Média	Vulnerável a alguns contaminantes, mas somente quando continuamente lançados ou lixiviados.	0,3 - 0,5
Alta	Vulnerável a muitos contaminantes (exceto os que são fortemente adsorvidos ou rapidamente transformados) em muitas condições de contaminação.	0,5 - 0,7
Extrema	Vulnerável à maioria dos contaminantes com impacto rápido em muitos cenários de contaminação.	0,7 - 1,0

Fonte: Adaptado de Foster et al. (2002)

RESULTADOS E DISCUSSÃO

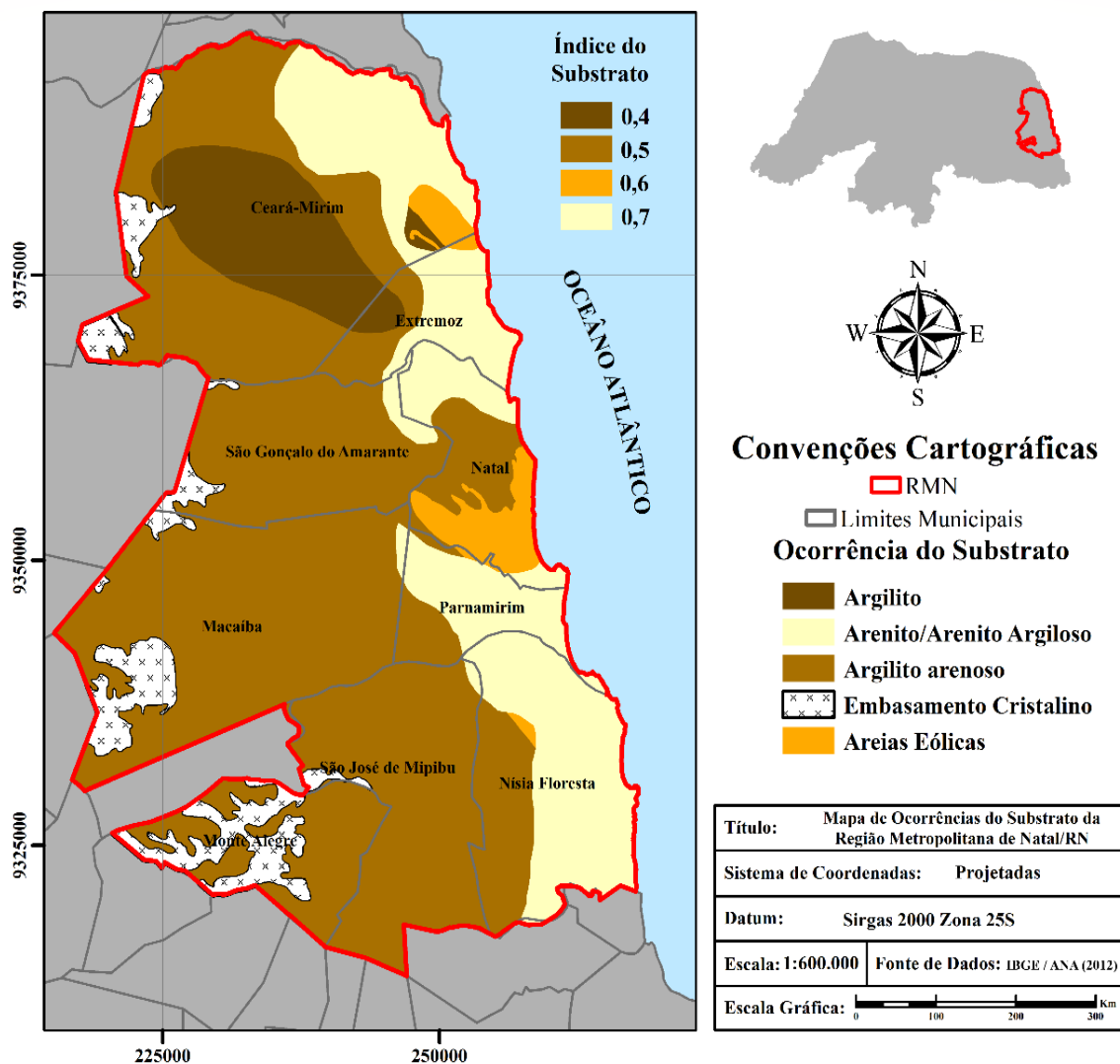
Vulnerabilidade intrínseca nos aquíferos da Região Metropolitana de Natal

Em relação ao cálculo da vulnerabilidade intrínseca nos aquíferos da Região Metropolitana de Natal, por meio da metodologia GODS, o parâmetro G (grau de confinamento) foi tomado para todo o território como não confinado, por ser a categoria predominante; no entanto, foram encontrados em algumas áreas, sedimentos semi-consolidados, o que expressa mudanças nas condições de armazenamento e permeabilidade.

O parâmetro O (ocorrência de estratos subjacentes) (Figura 4) foi tomado com base nos dados da (ANA, 2012); os perfis dos poços da área de estudo foram divididos em 04 (quatro) tipos distintos: arenito/arenito argiloso, areia eólica não consolidada, argila arenosa e argila. Tal procedimento inova na interpretação e permite identificar nuances da característica do parâmetro “O”, com predominância de uma litologia consolidada (97,01%) e uma litologia

não consolidada (2,99%). Em relação à litologia não consolidada, 2,99% são areias eólicas não consolidadas presentes na zona leste da área em estudo (dunas ou paleodunas). Por outro lado, na litologia consolidada encontramos predominância de rochas porosas tipo argilito com 60,7%, presentes principalmente na zona oeste; e rochas porosas tipo arenito/arenito argiloso com 21,72%, em menor proporção rochas porosas tipo argilito arenoso com 7,66% e rochas duras metamórficas do embasamento cristalino com 6,93%. A classificação mais conservadora dos estratos da zona não saturada na área de ocorrência das dunas foi adotada devido às características hidrodinâmicas desses depósitos (como alta condutividade hidráulica), os quais são importantes componentes para a recarga do aquífero Barreiras, o qual da mesma maneira que auxilia na recarga do aquífero, é extremamente vulnerável à infiltração de contaminantes. A heterogeneidade dos sedimentos da Formação Barreiras, principalmente em sua porção superior, condiciona também a ocorrência de semiconfinamento em determinados locais, como na zona sul de Natal e Nísia Floresta.

Figura 04 - Parâmetro O. Ocorrência de estratos subjacentes nos aquíferos da RMN

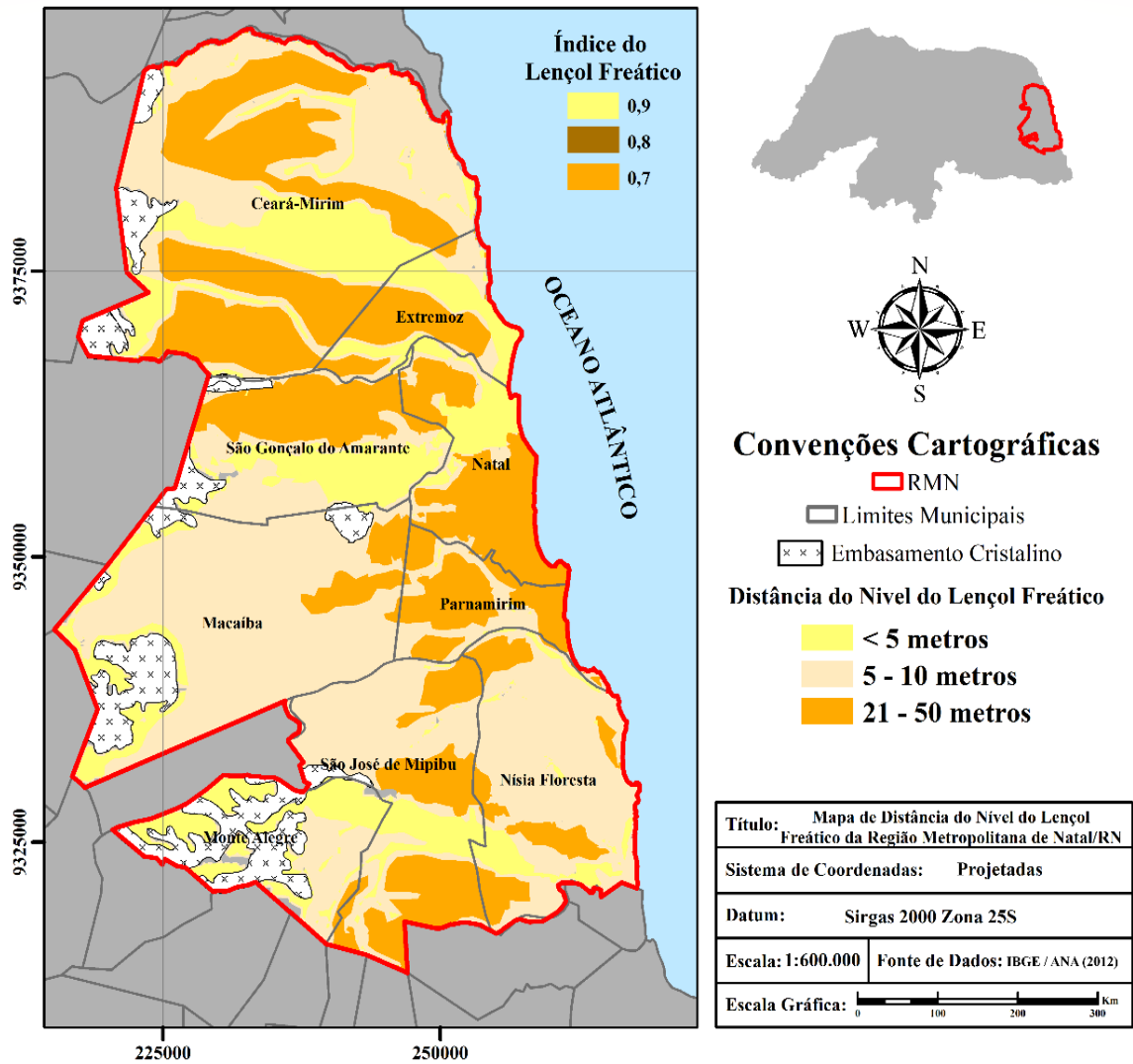


Fonte: Os Autores (2022).

Para o parâmetro D (distância ao nível do lençol freático) (Figura 5), verificou-se que o maior percentual de água subterrânea está na profundidade de 5 - 20 metros com 45,26%, seguido por profundidades de 20 a 50 metros com 29,3%, < 5 metros 14,67% e 10,76% com profundidade desconhecida. Sendo um sistema aquífero livre, verifica-se que a espessura da zona não saturada diminui dos altos topográficos em direção aos vales das principais drenagens da área, principalmente nos cursos baixo e médio, constituindo-se em locais de descarga. Há uma diminuição da espessura da zona não saturada também próxima ao limite

oeste da área de estudo, que coincide com o limite da própria bacia e onde afloram os sedimentos cretáceos ou o embasamento cristalino. Nos vales dos principais rios e próximo à costa a profundidade da zona não saturada é entre 5 e 20 metros, análoga à parte oeste, principalmente na região central, onde a espessura da formação Barreiras é reduzida. Na zona sul de Natal, no litoral do município de Parnamirim, onde ficam os campos de dunas, e na zona central de Macaíba, a profundidade da zona não saturada tem valores acima de 20 a 50 metros, similar à parte norte do município de Ceará-Mirim.

Figura 05 - Parâmetro D. Distância ao nível do lençol freático nos aquíferos da RMN

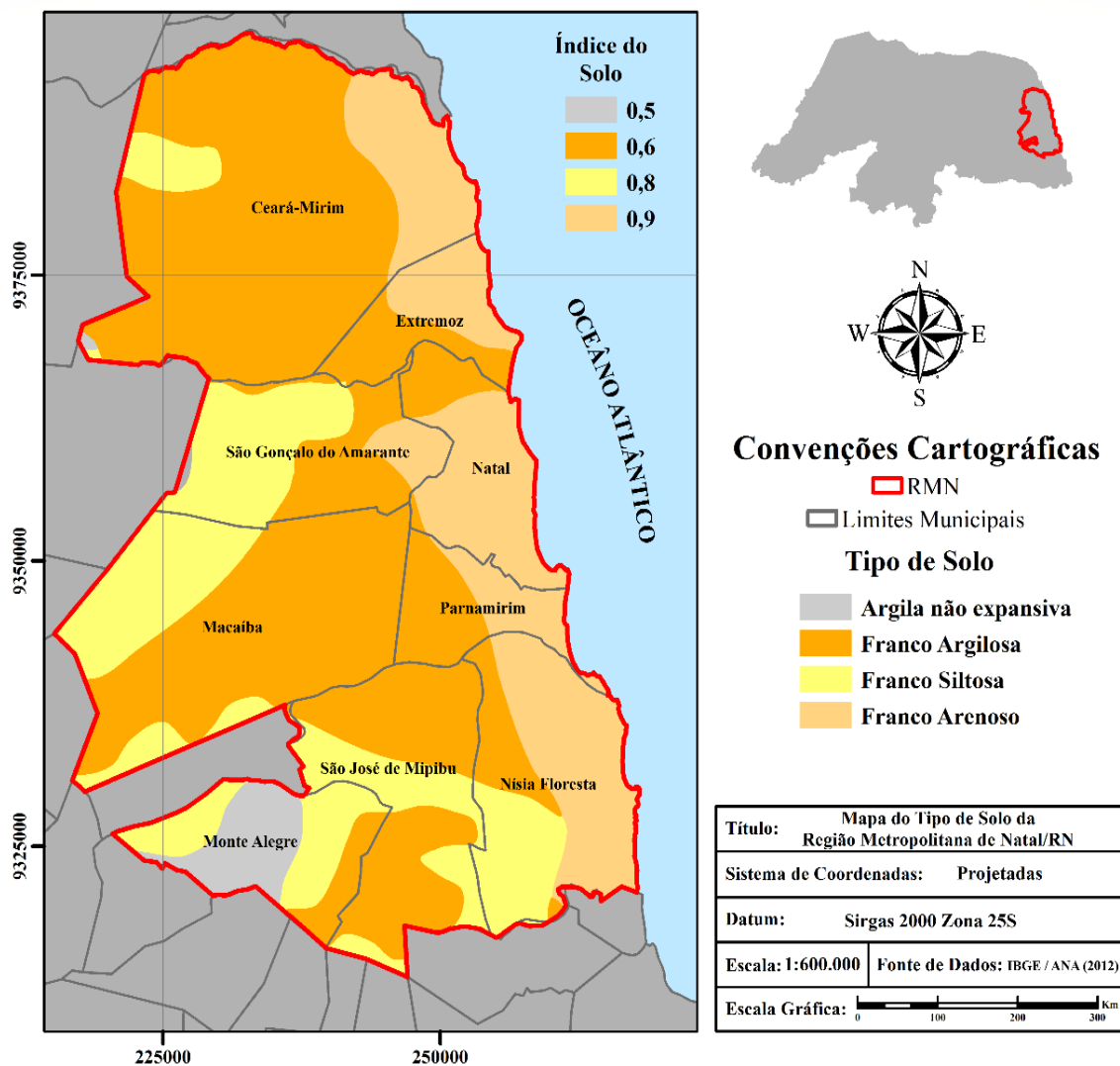


Fonte: Os Autores (2022).

Por fim, o parâmetro S (tipo de solo) (Figura 6), mostra que a maior percentagem de área de solo apresenta textura franco-argilosa com

54,05%, seguida de textura franco-siltosa com 21,93%, franco-arenosa com 21,19%, e argila não expansiva com 2,83%.

Figura 06 - Parâmetro S. Tipo de solo (textura) nos aquíferos da RMN



Fonte: Os Autores (2022).

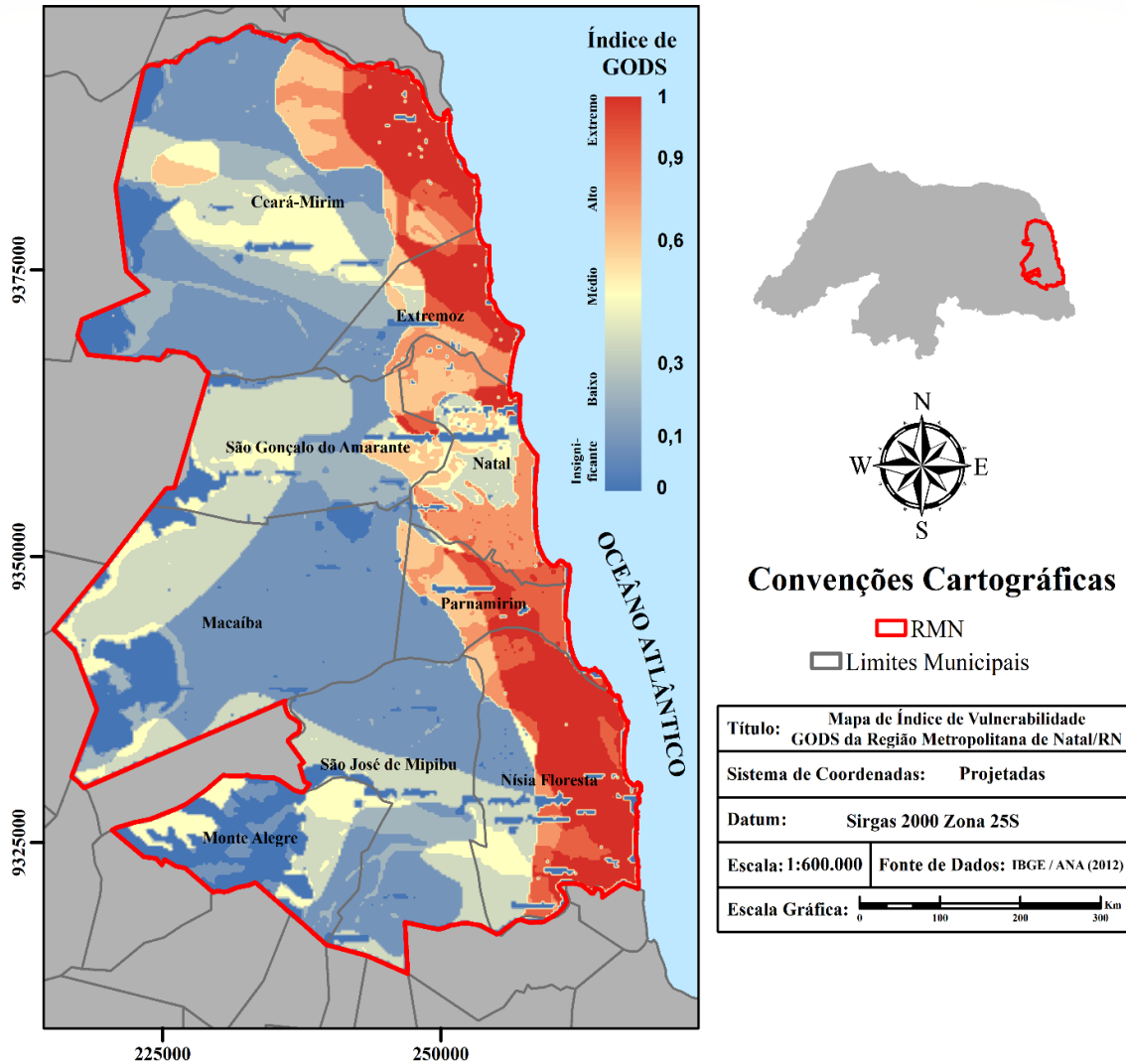
+

A partir do produto desses 04 (quatro) parâmetros, foi possível gerar o mapa de vulnerabilidade intrínseca à contaminação dos aquíferos na RMN, conforme mostrado na Figura 7. Na maior parte da área de estudo determinou-se que a vulnerabilidade fica em um nível baixo com 39,75% e nível médio com 24,26%, seguido de um nível de vulnerabilidade extrema com 14,7%, alto com 10,68% e insignificante com 10,61%. Os maiores índices de vulnerabilidade extrema e alta estão associados à ocorrência de estratos predominantemente arenosos e areno-argilosos, com profundidade da zona não saturada menor que 5 metros. Essas situações ocorrem principalmente ao longo da costa, na frente de escoamento para o oceano e nas porções baixas das bacias hidrográficas. Ratificando o que foi

dito pelo REGO et al (2021), as zonas costeiras são altamente vulneráveis porque contêm áreas onde o aquífero está livre, ou seja, onde a camada imediatamente acima do aquífero é formada por uma zona de aeração com uma textura predominantemente arenosa, que se destina a armazenar água temporariamente, mas onde os poluentes se infiltram a um ritmo mais rápido. Nestes aquíferos existem também níveis estáticos que não excedem uma profundidade de cinco metros.

Os índices de vulnerabilidade média e baixa estão associados principalmente aos altos topográficos, e à porção média e alta das bacias hidrográficas, onde o nível de água é mais profundo em relação à superfície e, conseqüentemente, a espessura da zona não saturada é maior.

Figura 06 - Mapa de índice de vulnerabilidade intrínseca a contaminação nos aquíferos da RMN - RN



Fonte: Os Autores (2022).

Também foi possível determinar o nível de vulnerabilidade de cada município conforme apresentado na Tabela 3. Os maiores níveis de vulnerabilidade ocorrem nos municípios de Nísia Floresta, Extremoz, Natal, Parnamirim e Ceará Mirim, devido principalmente à grande quantidade de areia na composição do solo, em que as características físicas como boa capacidade de infiltração e baixa compactação das partículas sólidas colaboram no processo de condução dos contaminantes até o lençol freático. Outro fator de vulnerabilidade alta destas regiões é a altura da superfície freática em relação ao nível do solo, uma vez que os poços são considerados rasos, com profundidades inferiores a 20 metros; também se indica que estes locais são vulneráveis a muitos contaminantes, exceto aqueles fortemente

absorvidos ou transformados. Os menores níveis de vulnerabilidade são encontrados nos municípios de Monte Alegre, Macaíba, São José do Mipibu, e algumas áreas do município de Parnamirim já que possuem solos tanto arenosos como argilosos, além de uma profundidade da água subterrânea superior a 20 metros; isto aumenta a inacessibilidade hidráulica do aquífero e os poluentes levam um tempo maior para passar da zona insaturada para a zona saturada. Esta vulnerabilidade indica que nestes locais somente alguns contaminantes podem alcançar a zona saturada do aquífero quando são lançados continuamente. Por outro lado, os municípios que apresentam uma vulnerabilidade média são Macaíba, Monte Alegre, São José do Mipibu e algumas áreas de São Gonçalo do Amarante.

Tabela 03 - Resultados de nível de vulnerabilidade nos municípios da RMN.

<i>Município</i>	<i>% Nível de vulnerabilidade</i>				
	Insignificante	Baixa	Média	Alta	Extrema
Ceará Mirim	7,33	48,78	17,95	12,07	13,88
Extremoz	4,14	27,09	4,92	22,01	41,83
Natal	7,13	1,31	26,74	53,72	11,10
São Gonçalo do Amarante	8,63	30,31	51,45	7,68	1,94
Parnamirim	4,72	25,83	1,47	29,59	38,38
Nísia floresta	6,72	10,16	18,27	6,27	58,58
São José do Mipibu	5,54	66,72	26,93	0,81	0
Macaíba	14,85	57,01	27,44	0,70	0
Monte Alegre	39,57	27,01	33,41	0	0

Fonte: Os Autores (2022).

As características intrínsecas do sistema aquífero Dunas-Barreiras mostram que o nível de vulnerabilidade de algumas áreas está em um nível extremo, pois suas condições geológicas e hidrogeológicas podem permitir o transporte de poluentes até o lençol freático, como é o caso na zona costeira e nas porções mais baixas das bacias hidrográficas. Acrescente-se ainda que nessas áreas, e principalmente nos municípios de Natal, Nísia Floresta, Parnamirim, Extremoz e Ceará Mirim, ocorrem as maiores atividades antrópicas como turismo, agricultura, desenvolvimento urbano e periurbano, pecuária dentre outros, o que permitiria um maior risco de contaminação das águas subterrâneas.

Os poços mal construídos ou abandonados são importantes focos de contaminação do aquífero, pois permitem a infiltração direta de contaminantes da superfície até a zona saturada.

Nas zonas de recarga regional a contaminação do aquífero pode causar grandes impactos pois, dependendo das características do fluxo subterrâneo e do contaminante, este pode ser conduzido para porções profundas do aquífero.

Confirmando o que Linhares et al. (2014) disseram, as avaliações de vulnerabilidade permitem o estabelecimento de protocolos para a criação de condições favoráveis à proteção das águas subterrâneas e ao uso apropriado do solo, dando prioridade a áreas específicas de proteção e estratégias de monitorização para o aquífero livre local. Desta forma, contribui para a tomada de decisões sobre a utilização e ocupação do solo para a preservação do ambiente, e manutenção da qualidade de vida da população que depende das águas subterrâneas.

CONCLUSÕES

As características naturais intrínsecas nos aquíferos da RMN conferem-lhe, na maior parte, uma vulnerabilidade média com 63,48% e nível alto com 11,87%. No entanto, também há uma cobertura importante de vulnerabilidade extrema com 11,75%, localizada principalmente ao longo da costa, na frente de escoamento para o oceano e nas porções baixas das bacias hidrográficas.

Os índices de vulnerabilidade média e baixa estão associados principalmente aos altos topográficos, e na porção média e alta das bacias hidrográficas, onde o nível de água é mais profundo em relação à superfície e, conseqüentemente o transporte de poluentes pode ser absorvido antes de chegar ao lençol freático.

Os corpos de água não podem ser classificados dentro de uma classificação de vulnerabilidade (por não serem formações geológicas), mas é possível determinar a qualidade química de suas águas, de forma que a carga poluente imposta será aquela que predominar no perigo de contaminação dos aquíferos.

O processo de integração de dados hidrológicos e geológicos associado ao mapa de vulnerabilidade dos aquíferos através do método GODS, em um Sistema de Informações Geográficas, mostra-se um mecanismo que se tem uma resposta positiva para contribuir com o conhecimento dos recursos hídricos subterrâneos na Região Metropolitana de Natal.

Existem várias metodologias para qualificar a vulnerabilidade e permitir seu mapeamento em diferentes escalas, a grande maioria desenvolvida para aquíferos livres. A escolha de um ou outro

método depende de vários fatores, entre os quais se destacam: divulgação e abrangência da metodologia, informações disponíveis, sua avaliação e validação dos resultados.

O método GODS tem como maiores vantagens a simplicidade de seu funcionamento e o pequeno número de parâmetros necessários para seu uso; por isso sua aplicação é ótima nos países em desenvolvimento onde a coleta de informações é cara.

FINANCIAMENTO

Este estudo foi financiado em parte pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código Financeiro 001.

REFERÊNCIAS

- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Estudos Hidrogeológicos Para A Orientação Do Manejo Das Águas Subterrâneas Da Região Metropolitana De Natal (RMN)**. Vol 1. ed. Brasil: Ministério do Meio Ambiente, 2012.
- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: Informe 2010**. 2010.
- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. **Direito de águas à luz da governança - Volume 4**. v. 4, p. 55, 2020.
- BAALOUSHA, H. M. Mapping groundwater contamination risk using gis and groundwater modelling. A case study from the gaza strip, palestine. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 4, n. 3-4, p. 483-494, 2011. <https://doi.org/10.1007/s12517-010-0135-0>
- BANA E COSTA, C. A. et al. A Socio-technical Approach for Group Decision Support in Public Strategic Planning: The Pernambuco PPA Case. **Group Decision and Negotiation**, v. 23, n. 1, p. 5-29, 2014. <https://doi.org/10.1007/s10726-012-9326-2>
- CHEN, W. et al. Sorption, degradation and mobility of microcystins in Chinese agriculture soils: risk assessment for groundwater protection. **Environmental Pollution**, v. 144, n. 3, p. 752-758, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.02.023>
- CPRM; MINISTERIO DE MINAS E ENERGIA. **Programa de Água Subterrânea Para o Semi-Árido Brasileiro**. p. 1-36, 2003.
- DE ASSIS, E. M. et al. A vulnerabilidade de populações indígenas: qualidade da água consumida pela comunidade Maxakali, Minas Gerais, Brasil. **Sociedade & Natureza**, v. 32, p. 279-290, 2020. <https://doi.org/10.14393/SN-v32-2020-43436>
- FORMAN, R. T. T. **Urban Regions: Ecology and Planning beyond the City**. Cambridge, UK; New York: [s.n.]. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511754982>
- FOSTER, S. et al. **Protección de la calidad del agua subterránea. Guia para empresas de agua, autoridades municipales y agencias ambientales**. Washington DC: Banco Mundial, 2002.
- FOSTER, S. S. D.; HIRATA, R. C. A. **Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data**. [s.l.] Pan American Center for Sanitary Engineering and Environmental Sciences, 1988.
- GARCIA, J. M. et al. Degradação ambiental e qualidade da água em nascentes de rios urbanos. **Sociedade & Natureza**, v. 30, n. 1, p. 228-254, 2018. <https://doi.org/10.14393/SN-v30n1-2018-10>
- GAVIRIA, J. I.; BETANCUR, T. Avances metodológicos para evaluar el riesgo de contaminación de aguas subterráneas. p. 1-8, 2010.
- HIRATA, R. et al. **A revolução silenciosa das águas subterrâneas no Brasil. Uma análise da importância do recurso e os riscos pela falta de saneamento**. Trata Bras ed. Brasil. 2019.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Censo demográfico**. Ministério ed. Brasil: [s.n.].
- JARRÍN, A. E. et al. A tecnologia de remoção de fósforo: Gerenciamento do elemento em resíduos industriais. **Revista Ambiente e Agua**, v. 9, n. 3, p. 445-458, 2017. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1403>
- KHAIR, S. M. et al. Diverse drivers of unsustainable groundwater extraction behaviour operate in an unregulated water scarce region. **Journal of Environmental Management**, v. 236, n. February, p. 340-350, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2018.10.004>
- LAVOIE, R. et al. Integrating groundwater into land planning: A risk assessment methodology. **Journal of Environmental Management**, v. 154, p. 358-371, 2015.

- <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.02.020>
LI, X. et al. Screening and health risk of organic micropollutants in rural groundwater of Liaodong Peninsula, China. **Environmental Pollution**, v. 218, p. 739–748, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.07.070>
- LINHARES, F. M. et al. Avaliação da vulnerabilidade e do risco à contaminação das águas subterrâneas da bacia hidrográfica do rio Gramame (PB). **Sociedade & Natureza**, v. 26, n. 1, p. 139–157, 2014. <https://doi.org/10.1590/1982-451320140110>
- MATZEU, A.; SECCI, R.; URAS, G. Methodological approach to assessment of groundwater contamination risk in an agricultural area. **Agricultural Water Management**, v. 184, p. 46–58, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.01.003>
- MITJAVILA, M. R.; BRUNO, G. A ideia de risco nos estudos sobre a problemática da água no Brasil. **Ambiente e Sociedade**, v. 14, n. 1414753X, p. 139;151, 2011. <https://doi.org/10.1590/S1414-753X2011000200010>
- PALMIOTTO, M. et al. Personal care products in surface, ground and wastewater of a complex aquifer system, a potential planning tool for contemporary urban settings. **Journal of Environmental Management**, v. 214, p. 76–85, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.10.069>
- PINHEIRO, L. G. et al. Avaliação da sustentabilidade do processo de dessalinização de água no semiárido potiguar: Estudo da comunidade Caatinga Grande. **Sociedade & Natureza**, v. 30, n. 1, p. 132–157, 2018. <https://doi.org/10.14393/SN-v30n1-2018-6>
- PIZZOL, L. et al. Risk-based prioritization methodology for the classification of groundwater pollution sources. **Science of the Total Environment**, v. 506–507, p. 505–517, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.11.014>
- PREFEITURA DO NATAL. **Conheça Melhor Natal e Região Metropolitana**. Revisão Pl ed. Natal - Brasil: [s.n.].
- REGO, N et al. Vulnerabilidade intrínseca à contaminação natural do aquífero na região metropolitana de Salvador – Estado da Bahia, Brasil. **Revista de Geociências do Nordeste**, v. 7, n° 2. 2021. <https://doi.org/10.21680/2447-3359.2021v7n2ID23210>
- SANTOS, S. et al. Qualidade da água na bacia hidrográfica urbana Cancela Tamandaí, Santa Maria/RS. **Sociedade & Natureza**, v. 30, n. 2, p. 23–44, 2018. <https://doi.org/10.14393/SN-v30n2-2018-2>
- VASCONCELOS, M. et al. Avaliação do Potencial Risco de Contaminação das Águas Subterrâneas na Zona Norte de Natal, RN. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, v. 15, n. 1, p. 13–13, 2018. <https://doi.org/10.21168/rega.v15e13>
- WANG, J.; HE, J.; CHEN, H. Assessment of groundwater contamination risk using hazard quantification, a modified DRASTIC model and groundwater value, Beijing Plain, China. **Science of the Total Environment**, v. 432, p. 216–226, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.06.005>
- YU, C. et al. Quantitative assessment of groundwater vulnerability using index system and transport simulation, Huangshuihe catchment, China. **The Science of the total environment**, v. 408, p. 6108–6116, 1 set. 2010. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.09.002>
- ZHANG, Q. et al. Predicting the risk of arsenic contaminated groundwater in Shanxi Province, Northern China. **Environmental Pollution**, v. 165, p. 118–123, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2012.02>

CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Felix David Rivera Madroñero é o autor principal, compilou as informações necessárias para o desenvolvimento dos resultados da pesquisa, analisou os dados obtidos, concluiu o trabalho e redigiu o artigo. Felipe Silva de Oliveira processou os dados em Sistemas de Informação Geográfica. Raquel Franco de Souza e Júlio Alejandro Navoni redigiram e corrigiram o artigo.



Este é um artigo de acesso aberto distribuído nos termos da Licença de Atribuição Creative Commons, que permite o uso irrestrito, distribuição e reprodução em qualquer meio, desde que o trabalho original seja devidamente citado.