



Estimativa da Vulnerabilidade à Contaminação das Águas Subterrâneas na Região Metropolitana de Aracaju (Se)

Rayane Oliveira Andrade; Paulo Sérgio de Rezende Nascimento¹

✉ psrn.geologia@gmail.com

1. Universidade Federal de Sergipe.

Histórico do Artigo: O autor detém os direitos autorais deste artigo.

Recebido em: 11 de janeiro de 2024

Aceito em: 31 de março de 2025

Publicado em: 30 de abril de 2025

Resumo: As águas subterrâneas desempenham um papel fundamental para a manutenção do equilíbrio ambiental e crescimento socioeconômico nas áreas urbanas e rurais. O estudo desse recurso hídrico é de extrema importância, visto que a exploração intensa e as atividades antrópicas impactam na quantidade e qualidade das águas subterrâneas. A avaliação da vulnerabilidade auxilia na identificação das áreas mais suscetíveis à contaminação do lençol freático, além de fomentar a gestão sustentável das águas subterrâneas. Neste sentido, este trabalho mapeia e espacializa a vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas na região metropolitana de Aracaju, utilizando os métodos GOD e IDW. Para isso foram utilizados os dados litológicos, grau de confinamento do aquífero e profundidade do nível d'água de 123 poços cadastrados no Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS) para obtenção da vulnerabilidade pelo método GOD e o mapa de vulnerabilidade através da interpolação IDW. Os poços com vulnerabilidades baixa e média representam 46,34% e 12,19%, respectivamente e 41,46% dos poços apresentam vulnerabilidade alta à contaminação. Estes, além das características geológicas e hidrogeológicas intrinsecamente consideradas no método, estão localizados principalmente nas áreas urbanizadas e de agricultura e pastagem, classes que potencializam o risco à contaminação. Diante disso, ressalta-se a importância do planejamento ambiental no processo de uso e ocupação do solo. Nessa seara, os resultados apresentados podem ser utilizados como ferramenta no licenciamento de empreendimentos que apresentam potencial de geração de contaminantes.

Palavras-chave: Geoprocessamento, Método GOD, Interpolação IDW, Hidrogeologia.

Modeling Vulnerability to Desertification in the Alto Sertão of the State of Sergipe by Multicriterial Analysis

Abstract: Groundwater plays a fundamental role in maintaining environmental balance and socioeconomic growth in urban and rural areas. The study of this water resource is extremely important, since intense exploitation and human activities impact the quantity and quality of groundwater. Vulnerability assessment helps identify areas most susceptible to groundwater contamination, in addition to promoting sustainable groundwater management. In this sense, this work aimed to map and spatialize vulnerability to groundwater contamination in the metropolitan region of Aracaju, using the GOD and IDW methods. For this, lithological data, degree of aquifer confinement and water level depth from 123 wells registered in the Groundwater Information System (SIAGAS) were used to obtain vulnerability using the GOD method and the vulnerability map through IDW interpolation. Wells with low and medium vulnerabilities represent 46.34% and 12.19%, respectively, and 41.46% of wells have high vulnerability to contamination. These, in addition to the geological and hydrogeological characteristics intrinsically considered in the method, are located mainly in urbanized areas and agricultural and pasture areas, classes that increase the risk of contamination. In view of this, the importance of environmental planning in the process of land use and occupation is highlighted. In this sense, the results presented can be used as a tool in the licensing of projects that have the potential to generate contaminants.

Keywords: Geoprocessing, GOD Method, IDW Interpolation, Hydrogeology.

Modelación de Vulnerabilidad a la Desertificación en el Alto Sertão del Estado de Sergipe Mediante Análisis Multicriterial

Resumen: El agua subterránea juega un papel fundamental en el mantenimiento del equilibrio ambiental y el crecimiento socioeconómico en áreas urbanas y rurales. El estudio de este recurso hídrico es de suma importancia, ya que la intensa explotación y las actividades humanas impactan la cantidad y calidad del agua subterránea. La evaluación de la vulnerabilidad ayuda a identificar las áreas más susceptibles a la contaminación de las aguas subterráneas, además de promover la gestión sostenible de las aguas subterráneas. En este sentido, este trabajo tuvo como objetivo mapear y espacializar la vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas en la región metropolitana de Aracaju, utilizando los métodos GOD e IDW. Para esto se utilizaron datos litológicos, grado de confinamiento del acuífero y profundidad del nivel del agua de 123 pozos registrados en el Sistema de Información de Aguas Subterráneas (SIAGAS) para obtener la vulnerabilidad mediante el método GOD y el mapa de vulnerabilidad mediante interpolación IDW. Los pozos con vulnerabilidades bajas y medias representan el 46,34% y el 12,19%, respectivamente, y el 41,46% de los pozos tienen vulnerabilidad alta a la contaminación. Éstos, además de las características geológicas e hidrogeológicas intrínsecamente consideradas en el método, se ubican principalmente en zonas urbanizadas y zonas agrícolas y de pastoreo, clases que aumentan el riesgo de contaminación. Ante esto, se resalta la importancia de la planificación ambiental en el proceso de uso y ocupación del suelo. En este sentido, los resultados presentados pueden ser utilizados como herramienta en el licenciamiento de proyectos que tengan potencial para generar contaminantes.

Palabras clave: Degradación Ambiental, Sergipe Semiárido, Teledetección, Geoprocesamiento.

INTRODUÇÃO

As águas subterrâneas são fundamentais para o desenvolvimento socioeconômico urbano e rural, assim como para a sustentação dos biomas. A natureza velada desse recurso subterrâneo dificulta o diagnóstico sobre sua situação e a consolidação de políticas públicas específicas, comprometendo sua gestão (HIRATA *et al.*, 2019). Torna-se mais agravante nas capitais e regiões metropolitanas, onde ocorre o aumento da extração dos recursos hídricos subterrâneos para atender as diversas necessidades (WOOD; CHERRY, 2021; SILVA *et al.*, 2024).

No Brasil, os usos da água subterrânea abrangem o abastecimento doméstico (30%), agropecuário (24%), abastecimento público urbano (18%) e abastecimento múltiplo (14%) (HIRATA *et al.*, 2019). No Estado de Sergipe, os usos da água subterrânea abrangem o abastecimento humano (6%), irrigação (4%), abastecimento público (32%), abastecimento industrial (48%), na dessedentação animal (1%) e outros usos (16%) (SERHMA, 2022). Na região metropolitana de Aracaju, as águas subterrâneas são utilizadas principalmente para o consumo humano, abastecimento público e privado, como os hotéis e indústrias (SERHMA, 2022).

Ao contrário das águas superficiais, o uso múltiplo das águas subterrâneas, geralmente, dispensa qualquer tipo de tratamento após sua extração, no entanto, para o consumo humano,

a água captada dos poços tubulares é submetida a tratamento por simples desinfecção, como cloração (SILVA *et al.*, 2021). A concentração natural de elementos químicos está relacionada com processos geológicos, como intemperismo e dissolução de minerais nas rochas (NASCIMENTO; SILVA, 2019). No entanto, a contaminação das águas subterrâneas, decorrente da intensificação das atividades antrópicas urbanas e rurais, tornou-se uma preocupação crescente e tem sido alvo de diversos estudos científicos, como os trabalhos de Madroñero *et al.* (2022);

Alguns aquíferos são mais propensos do que outros a serem contaminados, ou seja, há uma tendência ou probabilidade de contaminantes atingirem o aquífero em decorrência do uso e ocupação do solo. Neste contexto, foi desenvolvida a terminologia vulnerabilidade da água subterrânea à contaminação. A vulnerabilidade à contaminação pode ser interpretada como a capacidade do aquífero suportar, em menor ou maior grau, determinada carga contaminante (FOSTER; HIRATA, 1988; MADROÑERO *et al.*, 2022). A vulnerabilidade pode ser intrínseca, quando são avaliadas somente as características geológicas e hidrogeológicas da área, sem levar em consideração a natureza dos contaminantes; ou específica, quando é analisado o efeito de um ou mais contaminantes no aquífero (VILLANUEVA *et al.*, 2015). A análise da vulnerabilidade intrínseca do aquífero depende das condições geológicas, geomorfológicas, escoamento superficial, espessura da camada insaturada e exploração da água (RUSSO, 2009).

Borges, Athayde e Reginato (2017) ressaltam que não existe método de análise de vulnerabilidade ideal e recomendam que a escolha do método esteja associada à disponibilidade de informações sobre a área, devendo optar pelos modelos mais simples quando tiver poucos dados disponíveis.

Nesse sentido, o método GOD (*Groundwater confinement, Overlying strata, Depth to groundwater*) proposto por Foster, Hirata e Rocha (1988) e adaptado por Foster *et al.* (2006) é mais simples que o método DRASTIC (*Depth to water, Recharge, Aquifer media, Soil media, Topography, Impact the vadose zone, hydraulic Conductivity of the aquifer*) – padrão internacional de referência–, devido à menor quantidade de parâmetros utilizados no cálculo, os quais são mais facilmente encontrados em países poucos desenvolvidos. O método GOD utiliza 3 parâmetros básicos em estudo hidrogeológico – grau de confinamento do aquífero, ocorrência de estratos de cobertura e distância até o lençol freático – (ZANETTI, 2012).

É consenso na literatura científica, que os métodos supracitados utilizados na estimativa da vulnerabilidade natural do aquífero à contaminação são uma importante ferramenta para auxiliar na gestão ambiental, facilitando no processo de tomada de decisão

(KEMERICH *et al.*, 2020; BRITO *et al.* 2020; FANNAKH; FARSANG, 2022; CARRIÓN *et al.* 2024; ARRUDA; LUCENA, 2024)

Neste estudo foi utilizado o método GOD, tendo em vista a sua difusão pelo país, resultado eficiente e fácil aplicação. A análise da vulnerabilidade dos recursos hídricos subterrâneos, utilizando essa metodologia, pode ser encontrada nos estudos como os de Zanetti (2012), Medeiros *et al.* (2011), Teixeira *et al.* (2019), Trindade (2022). Diante do que foi apresentado e considerando a importância de produtos que subsidiem a gestão adequada dos recursos hídricos subterrâneos, o presente trabalho visa mapear e espacializar a vulnerabilidade das águas subterrâneas à contaminação na região metropolitana de Aracaju pelos métodos GOD e IDW, respectivamente.

Contextualização

As técnicas de mapeamento de vulnerabilidade têm sido difundidas ao longo dos anos como um instrumento de proteção dos aquíferos, uma vez que se torna mais fácil proteger do que remediar (HIRATA; FERNANDES, 2008). Uma das maneiras mais eficaz e rápida de realizar a representação da vulnerabilidade à contaminação do aquífero é por meio da análise espacial a partir de técnicas de geoprocessamento. Nesse sentido, o Sistema de Informações Geográficas (SIG) tem se mostrado uma ferramenta importante para esse tipo de estudo hidrogeológico (HERNANDEZ; ATHAYDE; ATHAYDE, 2018), pois além de ser útil na elaboração de produtos cartográficos, permite o armazenamento das informações geoespaciais em um banco de dados, que pode ser disponibilizado eletronicamente, facilitando o acesso e o uso posterior para o gerenciamento adequado do solo e da água (NASCIMENTO FILHO; NASCIMENTO, 2022).

Para a utilização da metodologia GOD em um ambiente SIG, visando obter um produto representativo, a partir de dados pontuais, é necessário recorrer ao uso de interpoladores. A interpolação espacial consiste em estimar os valores de pontos desconhecidos em uma área preenchida por dados amostrais. É suposto que os objetos mais próximos possuem uma semelhança maior se comparados com os objetos que estão mais distantes (HUANG *et al.*, 2011; SETIANTO; TRIANDINI, 2013).

Existem diversos métodos de interpolação de dados, desde análise global a local, determinísticos e estocásticos e gradual e abrupto (LANDIM, 2006; LI; HEAP, 2008). Dentre os métodos de interpolação determinísticos mais utilizados, está a ponderação pelo inverso da distância ou - *Inverse Distance Weighting* - IDW - (OHMER *et al.*, 2017; NISTOR *et al.*, 2020). Como qualquer outro método de interpolação, há vantagens e desvantagens, principalmente na

interpretação dos resultados. Destaca-se que sua principal limitação é a geração de contornos concêntricos em pequenos picos e vales interpretados como tendenciosos. Por outro lado, a fidelidade aos valores amostrais originais não estima valores maiores e menores que seus máximos e mínimos (LANDIM, 2011), evitando falsas expectativas na espacialização das variáveis. É importante ressaltar que não existe um método de interpolação universal aplicável indistintamente a qualquer situação (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989; LI; HEAP, 2008; SUN *et al.*, 2009; OHMER *et al.*, 2017).

O método IDW (*Inverse Distance Weighted*) prediz um valor para algum local não medido utilizando-se os valores amostrados à sua volta. Estes terão maior peso do que os valores mais distantes, pois a influência no novo ponto diminui com o aumento da distância. Desta forma, a influência de cada ponto é proporcional ao inverso da distância e é um método ideal para dados regularmente espaçados. No entanto, autores como Gholipor; Shahbazi e Behnia (2013); Setianto e Triandini (2013) consideram o método adequado para dados espaçados irregularmente. Por ser determinístico, ao estimar a influência entre os pontos não associa as incertezas aos valores previstos e não incorpora os erros aleatórios.

O método IDW é um interpolador de rápida velocidade de processamento e que não estima valores do ponto vizinho amostrado maiores ou menores que os quantitativos máximos e mínimos dos dados informados (LI; HEAP, 2008; LANDIM, 2011). De acordo com esses autores apresenta efeito gradual com superfície suave, exatidão com estimativa semelhante aos dados globais amostrados de tendência geral.

No método IDW, o valor de cada célula a ser estimada é obtido através da combinação ponderada dos pontos de amostragem. Admite-se a proporcionalidade das correlações e semelhanças entre os pontos vizinhos e a distância entre eles. Nesse sentido, a superfície interpolada representa uma variável localmente dependente (NISTOR *et al.*, 2020). É importante ressaltar que a interferência de um dado amostral com relação ao outro diminui com o aumento da distância (SILVA, 2003; SETIANTO; TRIANDINI, 2013).

METODOLOGIA

Área de estudo

A região metropolitana de Aracaju está delimitada pelos paralelos 10° 44' 37" e 11° 9' 38" de latitude Sul e meridianos 36° 51' 24" e 37° 9' 21" de longitude Oeste, e os principais acessos à

área são as BR-101 e BR-235 (Figura 1). Esta figura também apresenta a distribuição dos 123 poços em aquíferos livres e confinados.

Segundo a classificação climática de Köppen-Geiger, o clima da região é do tipo As (clima tropical com chuvas de inverno). Apresenta precipitação média anual de 1.222 mm e umidade relativa média anual de 78%, temperatura média de 25°C e a evaporação que pode chegar a níveis acima de 1.000 mm/ano no verão (SUDEN, 2014).

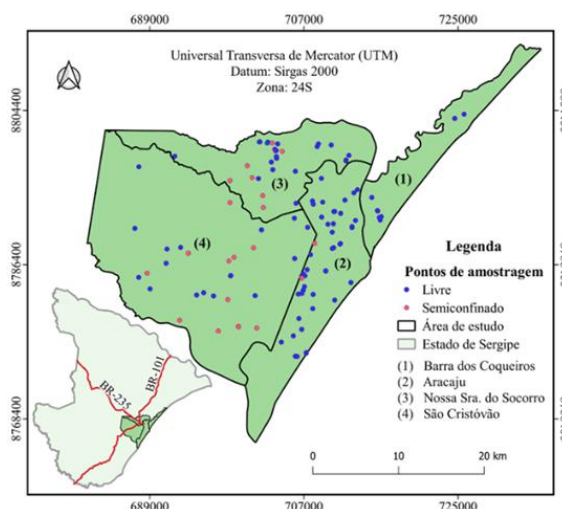


Figura 1. Mapa de localização da Grande Aracaju com destaque dos pontos de amostragem
Fonte: Os autores.

A geologia é composta por arenito, argilito arenoso e siltito, calcilutito e calcário recobertos por sedimentos arenosos e argilosos inconsolidados. Os argilitos arenosos são da Formação Calumbi e os calcilutitos e calcários são das formações Cotinguiba e Riachuelo. Os arenitos e os argilitos arenosos do Grupo Barreiras e os sedimentos argilo-arenosos pertencem à Coberturas Superficiais Cenozoicas da faixa litorânea (SANTOS *et al.*, 1998). A geomorfologia é composta pelos relevos de Tabuleiros Costeiros Dissecados e Conservados e Planícies Costeiras, cujos tipos pedológicos são os argissolos, espodossolos, gleissolos, neossolos e vertissolos (BOMFIM; COSTA; BENVENUTI, 2002). Os tipos de aquíferos são compostos, majoritariamente, pelo aquífero granular de alta porosidade e permeabilidade, que possibilita um potencial hidrogeológico elevado, e secundariamente pelo aquífero cárstico, formado pela dissolução das rochas calcárias (OLIVEIRA; SANTOS; NASCIMENTO, 2019) (Figura 2).

Estimativa da Vulnerabilidade à Contaminação das Águas Subterrâneas na Região Metropolitana de Aracaju (Se)

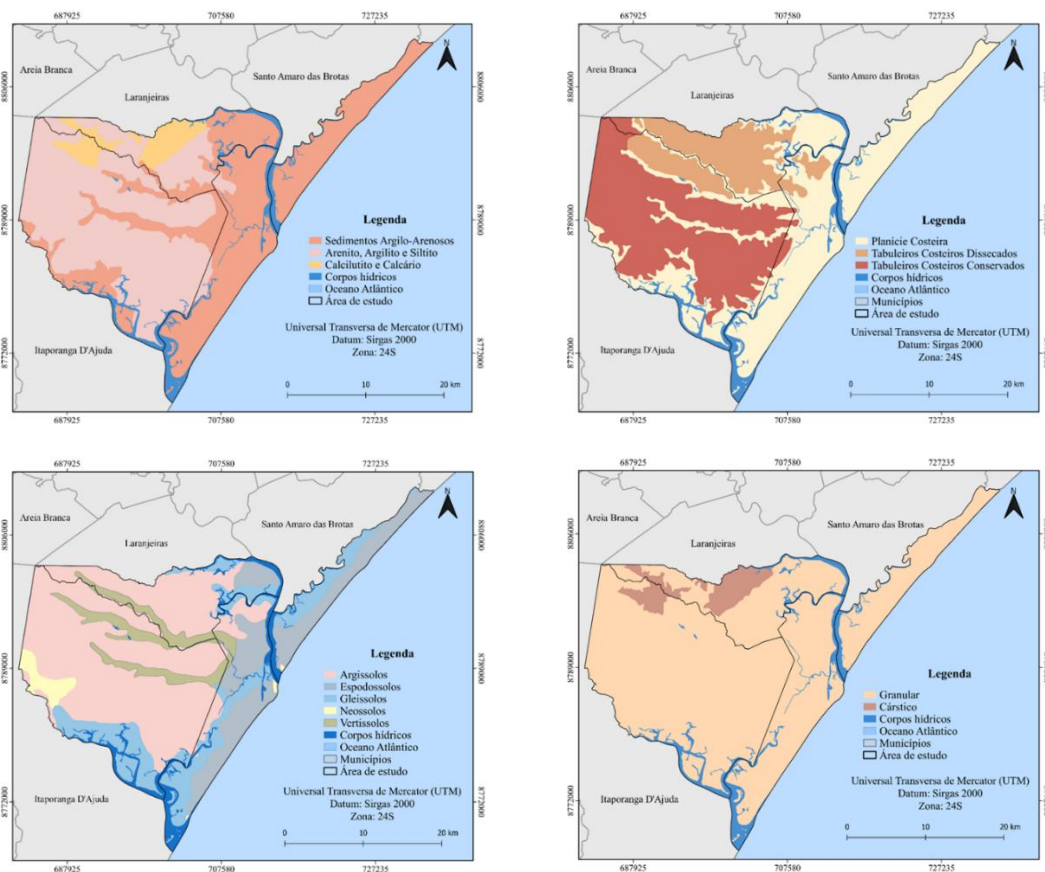


Figura 2. Mapas de geologia, geomorfologia, pedologia e tipos de aquíferos da Grande Aracaju
Fonte: Adaptado de SEDURBS (2016).

A cobertura da terra possui 6 (seis) classes, a saber: (i) área urbanizada; (ii) formação natural não florestal, que engloba os territórios formados por apicum, área pantanosa e área campestre; (iii) agricultura e pastagem; (iv) floresta natural; (v) corpos hídricos; e (vi) silvicultura (Figura 3).

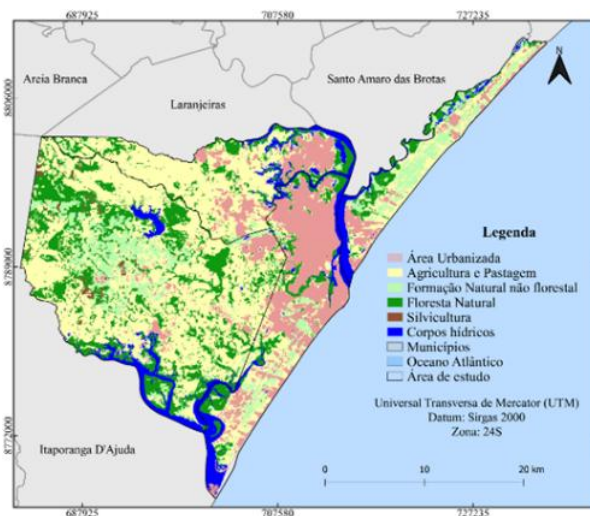


Figura 3. Mapa de cobertura da terra
Fonte: Adaptado de Mapbiomas (2022).

Procedimentos técnicos

Para a realização deste estudo foram extraídas informações de 123 poços: 52, 32, 31 e 8 poços pertencentes aos municípios de Aracaju, Nossa Senhora do Socorro, São Cristóvão e Barra dos Coqueiros, respectivamente (Figura 1), os quais contêm os dados necessários para a aplicação do método GOD. Os dados foram extraídos do banco de dados do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS), desenvolvido pelo Serviço Geológico do Brasil (SGB, 2000).

Como supracitado, o sistema GOD emprega três parâmetros para a caracterização da vulnerabilidade natural à contaminação das águas subterrâneas: grau de confinamento do aquífero (parâmetro G); ocorrência de estratos de cobertura (parâmetro O); e distância até o lençol freático (parâmetro D).

O parâmetro G foi obtido pela análise do perfil construtivo de cada poço, por meio dos dados de litologia associados à profundidade de cada material. Em seguida, foram atribuídos os pesos específicos para cada condição do aquífero, conforme preconizados por Foster e Hirata (1988) e Foster *et al.* (2006): 0,4 para aquíferos semiconfinados, 0,6 para aquíferos não confinados cobertos e 1,0 para aquíferos não confinados expostos.

É importante mencionar que os aquíferos não confinados cobertos foram definidos pela presença de camadas com espessuras métricas de sedimentos argilosos na camada superior, enquanto os aquíferos não confinados expostos, pela presença de camadas métricas de sedimentos arenosos, com maior permeabilidade, sem uma camada limitante, conforme adotado por Duarte *et al.* (2016).

O parâmetro O foi definido pelas litologias, adotando a recomendação em que para uma área onde há uma sequência variável de depósitos, utiliza-se a litologia em predominância na zona vadosa ou a que limita em termos de permeabilidade. Desse modo, cada poço foi analisado e foram atribuídos os pesos específicos para as camadas predominantes na zona vadosa formadas por sedimentos inconsolidados argilosos (0,4), sedimentos inconsolidados arenosos (0,6), rochas areníticas (0,75) e rochas calcárias (0,85), de acordo com a maior ou menor facilidade do contaminante atingir o lençol freático (FOSTER; HIRATA, 1988; FOSTER *et al.*, 2006).

O parâmetro D foi determinado pela profundidade do nível estático, e a distribuição dos pesos seguiu a metodologia de Foster e Hirata (1988) e Foster *et al.* (2006): 0,9 para profundidade menor que 5m, 0,8 para profundidade entre 5 e 20 m, e 0,7 para profundidade entre 20 e 50 m. A distância até o lençol freático pode ser entendida como o nível estático, pois este corresponde

à distância (profundidade) obtida desde a boca do poço até o nível d'água, quando não está ocorrendo bombeamento.

Em seguida, os parâmetros foram multiplicados para a obtenção do índice de vulnerabilidade (IV) supracitado, definindo três classes de vulnerabilidade: baixa, média e alta. Para apresentação espacial dos resultados obtidos, os três parâmetros e o índice de vulnerabilidade foram espacializados pelo método de interpolação IDW no *software* QGIS (versão 3.30.0) (QGIS, 2022). Para a aplicação do método IDW, alguns parâmetros de interpolação devem ser inseridos. O valor do expoente permite controlar o significado dos pontos conhecidos nos valores interpolados com base na distância do ponto de saída. Foi definido o valor 2, indicado por Landim (2011) como o padrão.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Parâmetro Grau de Confinamento (G)

Referente à espacialização do parâmetro G (Figura 4), verifica-se o predomínio do aquífero livre, representando aproximadamente 93% da área de estudo. Este aquífero possui 99 poços, dos quais 38 foram definidos como aquífero não confinado coberto e 61, como aquífero não confinado exposto. Este último, apresentando camada sobrejacente de sedimentos predominantemente arenosos inconsolidados porosos e permeáveis, está distribuído em praticamente toda a área dos municípios de Aracaju e Barra dos Coqueiros, representado por 34 e oito poços, respectivamente. Por outro lado, o aquífero não confinado coberto, com camada superior argilosa de maior impermeabilidade, que retarda a percolação do contaminante, encontra-se amplamente distribuídos nos municípios de Nossa Senhora do Socorro e São Cristóvão, representado por 13 e 10 poços, respectivamente. Nestes dois municípios, tem-se o aquífero semiconfinado, distribuído em pequenas porções limitados pelo aquífero não confinado coberto predominante.

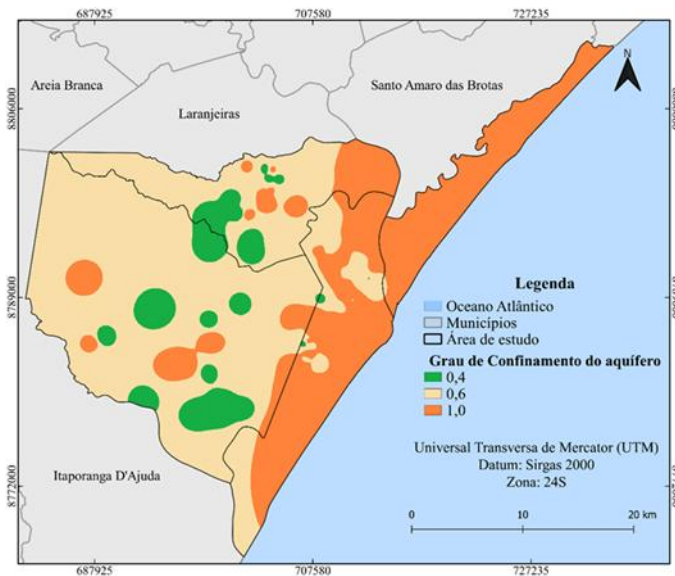


Figura 4: Espacialização do grau de confinamento

Fonte: Os autores.

Parâmetro Ocorrência de Cobertura (0)

Referente a espacialização do parâmetro 0 (Figura 5), é perceptível a predominância dos sedimentos arenosos e silte-argilosos inconsolidados, o que é justificável devido às características geológicas e litológicas da área de estudo, formada principalmente por depósitos litorâneos, depósitos aluvionares, depósitos de pântanos e mangues, entre outros (SANTOS *et al.*, 1998). Os sedimentos arenosos presentes em todos os municípios da região são mais vulneráveis à contaminação por causa da facilidade em perfurar os poços, do nível d'água em baixa profundidade e da alta permeabilidade e porosidade. Em Aracaju, Barra dos Coqueiros e Nossa Senhora do Socorro, há predominância dos sedimentos arenosos inconsolidados em 35, oito e nove poços, respectivamente. Em São Cristóvão destaca-se os sedimentos argilosos inconsolidados em 23 poços.

Estimativa da Vulnerabilidade à Contaminação das Águas Subterrâneas na Região Metropolitana de Aracaju (Se)

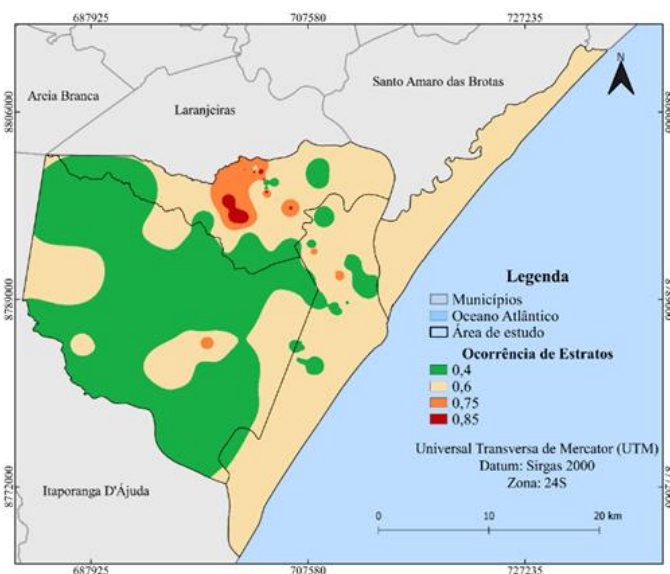


Figura 5: Espacialização da ocorrência de estratos de cobertura

Fonte: Os autores.

Distância até o Lençol Freático (D)

Referente a espacialização do parâmetro D (Figura 6), em Aracaju e na Barra dos Coqueiros há predominância da classe de menor profundidade, representados por 30 e sete poços, respectivamente, os quais apresentam maiores proximidades do lençol freático com a superfície terrestre e consequentemente, favorecendo a vulnerabilidade do aquífero. Enquanto em São Cristóvão e em Nossa Senhora do Socorro, observa-se a predominância de poços com profundidade intermediária, entre 5 e 20 m, representados por 17 e 19 poços, respectivamente, que apresentam menores riscos de contaminação. As baixas profundidades dos poços são decorrentes da geologia da área, composta pelas Formações Superficiais do Cenozoico formadas pelas coberturas pleistocênicas e holocênicas nas quais se encontram os municípios de Aracaju e Barra dos Coqueiros e pelos sedimentos terciários e arenitos do Grupo Barreiras, onde se encontram os municípios de São Cristóvão e Nossa Senhora do Socorro (SANTOS *et al.*, 1998).

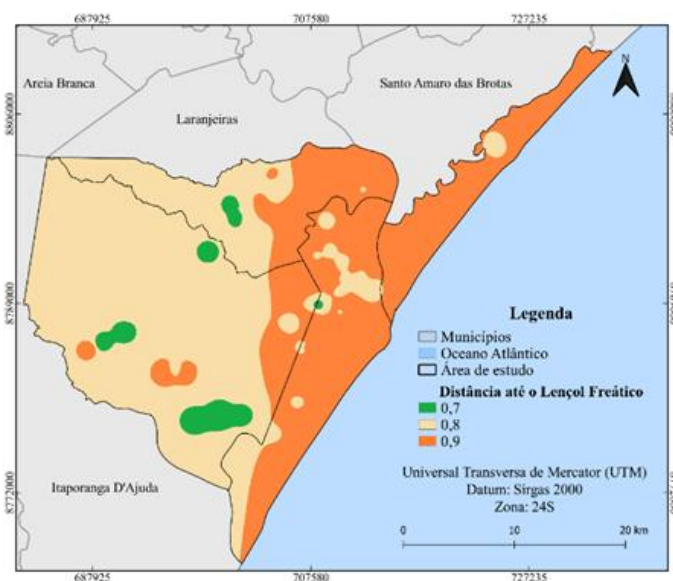


Figura 6: Espacialização da distância até o lençol freático

Fonte: Os autores.

Espacialização da vulnerabilidade

A aplicação da metodologia GOD resultou em três classes de vulnerabilidade: baixa, média e alta (Figura 7). A vulnerabilidade baixa, que varia entre 0,1 e 0,3, apresenta 57 poços (46,34%) e, segundo Foster *et al.* (2006), significa que o aquífero é vulnerável somente quando há lançamentos contínuos a longo prazo e na presença de contaminantes conservativos, como sais e nitrato.

O valor médio, que varia de 0,3 a 0,5, corresponde a 15 poços (12,19%) e expressa vulnerabilidade a alguns contaminantes (hidrocarbonetos clorados e não clorados), principalmente quando há lançamento contínuo (DUDA; ZDECHLIK, 2020). Quanto à vulnerabilidade alta, que varia de 0,5 a 0,7, ocorre em 51 poços (41,46%) e indica suscetibilidade a vários contaminantes, exceto aos que apresentam mobilidade baixa (pesticidas, metais pesados, compostos aromáticos, entre outros) (BAKHTIARIZADEH *et al.*, 2024).

Estimativa da Vulnerabilidade à Contaminação das Águas Subterrâneas na Região Metropolitana de Aracaju (Se)

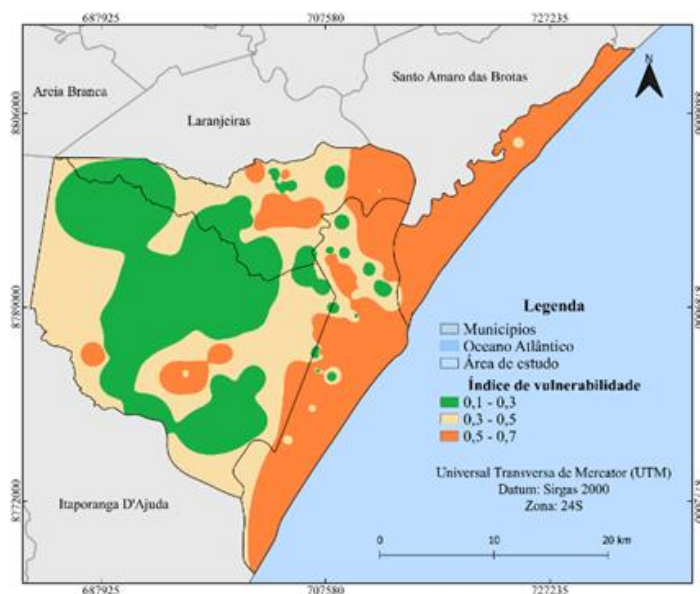


Figura 7: Espacialização da vulnerabilidade

Fonte: Os autores.

A vulnerabilidade alta está concentrada nos municípios de Aracaju e Barra dos Coqueiros, com 27 e sete poços, respectivamente. Nos municípios de São Cristóvão e em Nossa Senhora do Socorro, a classe baixa foi a mais representativa, sendo identificada em 23 e 17 poços, respectivamente.

Ressalta-se a vulnerabilidade baixa nos municípios de São Cristóvão e Nossa Senhora do Socorro devido à predominância dos sedimentos argilosos inconsolidados, que apresentam baixa permeabilidade e tendem a limitar e retardar o tempo de infiltração dos contaminantes (FEITOSA *et al.*, 2008). Enquanto nos demais municípios tem-se a vulnerabilidade alta, em decorrência dos sedimentos arenosos inconsolidados que apresentam elevada permeabilidade, favorecendo a infiltração dos contaminantes no subsolo (CUSTODIA; LLAMAS, 1983, ULIANA, 2025).

O valor máximo de vulnerabilidade identificado na análise foi 0,68, em três poços localizados em Nossa Senhora do Socorro, que apresentaram o mesmo material na zona vadosa (calcário), a mesma condição do aquífero (livre) e a profundidade até o lençol freático variando de 5 a 20 m. O potencial de contaminação do aquífero em rochas calcárias está associado à dissolução pelo intemperismo químico (FEITOSA *et al.*, 2008, ULIANA, 2025).

Ao associar o resultado da vulnerabilidade com os solos de maior ocorrência na área de estudo, percebe-se que o tipo de solo também condiciona a vulnerabilidade à contaminação do aquífero. Os argissolos, por exemplo, possuem baixa facilidade de percolação e oferecem proteção às águas subterrâneas, pois o tempo que o contaminante leva para atingir o aquífero

é maior e pode ser atenuado pelos processos de adsorção. Enquanto os espodosolos apresentam fragilidade média, devido à correlação com os terraços marinhos pleistocênicos e planícies marinhas holocênicas.

A partir da correlação entre o mapa de cobertura do solo (Figura 3) e o mapa de vulnerabilidade (Figura 7) foi possível constatar que os poços classificados com vulnerabilidade alta estão distribuídos na área urbanizada (33 poços) e de agricultura e pastagem (18 poços). As demais classes do mapa apresentam poços com vulnerabilidade variando entre baixa e média.

A classe agricultura e pastagem ocupa a maior distribuição espacial nos municípios de São Cristóvão e Nossa Senhora do Socorro. Em relação à vulnerabilidade, Foster *et al.* (2006) destacam que as cargas contaminantes geradas por esse tipo de atividade são preocupantes em áreas extensas, no entanto em menor escala apresentam menos probabilidade de gerar carga contaminante no subsolo.

A área urbanizada representa um potencial perigo à contaminação das águas subterrâneas, visto que nesse espaço são desenvolvidas atividades que possuem elevada propensão para a geração de contaminantes no subsolo como, por exemplo, as oficinas mecânicas, os postos de combustíveis, os cemitérios, as indústrias, lançamento de efluentes, descarte irregular de resíduos, entre outros (FOSTER *et al.*, 2006). Além disso, por causa do adensamento populacional característico da região metropolitana, a distribuição desses estabelecimentos tende a ser abundante.

As oficinas mecânicas possuem elevado potencial em gerar contaminantes no aquífero, pois nesses locais é comum o uso de produtos químicos, como óleos, graxas, solventes e lubrificantes, que em contato com o solo podem infiltrar e atingir o lençol freático (HIRATA *et al.*, 2019). Em alguns casos não é possível fiscalizar esses empreendimentos porque muitos operam sem licenciamento e os proprietários, na maioria das vezes, desconhecem os impactos do uso e descarte inadequado desses produtos.

Os postos de combustíveis são constituídos por tanques subterrâneos que armazenam níveis consideráveis de hidrocarbonetos e apresentam potencial de gerar carga contaminante no solo e na água subterrânea, em decorrência de possíveis vazamentos (WOOD; CHERRY, 2017).

As indústrias apresentam perigo à contaminação das águas subterrâneas, pois o volume e a variedade de resíduos químicos gerados por esses estabelecimentos são elevados e, em contato com o solo, podem percolar e contaminar o lençol freático (OHMER *et al.*, 2017). Em ambientes industriais, como é o caso do polo localizado em Nossa Senhora do Socorro, as águas

subterrâneas podem se tornar mais frágeis em decorrência da superexploração ou contaminação.

O lançamento inadequado de efluentes pode contaminar as águas subterrâneas, principalmente em áreas onde o nível estático não é profundo (SUN *et al.*, 2009). Segundo as informações obtidas na plataforma Água e Saneamento (2022), em média, 50% da população de Aracaju e Barra dos Coqueiros são atendidas pelo esgotamento sanitário, enquanto nos demais municípios o valor é inferior a 40%.

A disposição irregular de resíduos apresenta perigo à contaminação do solo e das águas subterrâneas, pois o lixiviado gerado pode infiltrar, atingir o lençol freático e contaminar o aquífero (HIRATA *et al.*, 2019). Nos municípios da área de estudo, apenas Aracaju e Nossa Senhora do Socorro possuem atendimento pleno à coleta de resíduos, enquanto na Barra dos Coqueiros e em São Cristóvão 930 e 15.093 habitantes não são atendidos pela coleta (ÁGUA E SANEAMENTO, 2022). Ao aplicar a metodologia GOD em áreas de disposição irregular de resíduos, Bastos, Belotti e Laurindo (2021) constataram que a vulnerabilidade baixa foi predominante em quase todas as áreas, e apenas um local apresentou vulnerabilidade alta.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A aplicação dos métodos GOD e IDW possibilitou espacializar e analisar a vulnerabilidade de 123 poços de água subterrânea da região metropolitana de Aracaju. A espacialização pelo método de interpolação IDW mostrou-se de simples aplicação e eficiente na análise da distribuição espacial das classes de vulnerabilidade à contaminação dos aquíferos.

O mapa de vulnerabilidade proporcionou uma visualização do potencial perigo de contaminação das águas subterrâneas. Deve ser utilizado como suporte para pesquisadores, profissionais de planejamento, desenvolvimento territorial e ambiental, que desejam avaliar novas propostas de desenvolvimento e prioridades no controle da contaminação das áreas mais vulneráveis.

O maior parâmetro de vulnerabilidade (0,68) foi identificado em 3 poços. A classe baixa de vulnerabilidade predominou na análise, sendo encontrada em 57 poços. A classe alta apresentou um valor próximo, sendo identificada em 51 poços. A classe média apresentou apenas 15 poços.

Os altos níveis de vulnerabilidade ocorreram principalmente em poços classificados com a condição do aquífero como não confinado exposto, estratos de cobertura formados por

sedimentos arenosos inconsolidados e a profundidade do nível d'água próxima da superfície. Enquanto os níveis mais baixos de vulnerabilidade ocorreram nas áreas de domínio do aquífero semiconfinado, dos sedimentos argilosos inconsolidados e da alta profundidade do nível d'água.

Ressalta-se que a principal dificuldade para a realização deste estudo foi a obtenção de dados para a aplicação da metodologia GOD, uma vez que nem todas as informações necessárias estavam disponíveis no SIAGAS. Apesar disso, o resultado corresponde ao esperado, pois condiz com as características geológicas e hidrogeológicas da área, evidenciando eficácia do método.

A representação da cobertura do solo possibilitou analisar as fontes potenciais de contaminação do aquífero. Ao associar este mapa com o mapa de vulnerabilidade, foi possível identificar que todos os poços classificados com alta vulnerabilidade (51), estão inseridos na área urbanizada e de agricultura e pastagem.

Diante do que foi apresentado, percebe-se a importância do planejamento ambiental no processo de uso e ocupação do solo, principalmente nas áreas mais vulneráveis, como é o caso de Aracaju e Barra dos Coqueiros. Os resultados contribuíram para identificação das áreas vulneráveis à contaminação e podem ser utilizados pelos gestores públicos para a gestão adequada das águas subterrâneas e no licenciamento de empreendimentos que apresentam potencial de geração de contaminantes. As técnicas empregadas permitiram reduzir as incertezas de utilização de dados secundários disponíveis gratuitamente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ÁGUA E SANEAMENTO. **Avaliação da cobertura dos domicílios com acesso ao saneamento básico.** Municípios e Saneamento. Disponível em: <https://www.aguaesaneamento.org.br/municipios-e-saneamento>. Acessado em: out 2022.

ARRUDA, R. S. A.; LUCENA, L. R. F. Análise de vulnerabilidade intrínseca de um aquífero não confinado a partir de dados hidrogeofísicos - comparação entre índices GOD, AVI e Condutância Longitudinal. **Geoambiente On-Line**, n. 48, p. 20-46, 2024. Disponível em: <https://revistasufj.emnuvens.com.br/geoambiente/article/view/76843>. Acessado em: mar 2025.

BAKHTIARIZADEH, A.; MOHAMMAD NAJAFZADEH, M.; MOHAMADI, S. Enhancement of groundwater resources quality prediction by machine learning models on the basis of an improved DRASTIC method. **Scientific Reports**, v. 14, p. 1-24, 2020. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-024-78812-6>. Acessado em: mar 2025.

BASTOS, L. R.; BELOTTI, F. M.; LAURINDO, E. A. Contaminação do solo e água subterrânea em áreas de disposição dos resíduos sólidos urbanos no estado de Minas Gerais. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, v.12, n.8, p.259-273, 2021.

BEZERRA, A. V. S.; CASTRO, V. L. L.; DI LOLLO, J. A.; LORANDI, R.; COSTA, C. W. Potencial Risco de Contaminação do Sistema Aquífero Dunas-Barreiras por Atividades Antrópicas em Área de Manancial no Nordeste brasileiro. **Revista de Geociências do Nordeste**, v.9, n.2, p.1-20, 2023. Disponível em: <https://periodicos.ufrn.br/revistadoregne/article/view/31625>. Acessado em: mar 2025.

Estimativa da Vulnerabilidade à Contaminação das Águas Subterrâneas na Região Metropolitana de Aracaju (Se)

BOMFIM, L. F. C.; COSTA, I. V. G.; BENVENUTI, S. M. P. **Projeto Cadastro da Infraestrutura Hídrica do Nordeste: diagnóstico do Município de São Cristóvão**. Aracaju: CPRM, 2002, 29p.

BORGES, B. M.; ATHAYDE, G. B.; REGINATO, P. A. R. Avaliação da vulnerabilidade natural à contaminação do sistema aquífero Serra Geral no Estado do Paraná – Brasil. **Águas Subterrâneas**, v.31, n.4, p.327-337, 2017. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/28857>. Acessado em: out 2022.

BRITO, A. P. M.; SILVA, R. M.; SANTOS, I. M. M. **Revista Homem, Espaço e Tempo**, n. 14, v. 1, p. 145-163, 2020. Disponível em: <https://rhet.uvanet.br/index.php/rhet/article/view/434/284>. Acessado em: mar 2025.

CARRIÓN, R.; GASTMANS, D.; VEROSLAVSKY, G. Evaluación de la vulnerabilidad del Sistema Acuífero Guaraní (SAG) en los alrededores de la ciudad de Tacuarembó, Uruguay: aplicación de los métodos GOD y DRASTIC. **Derbyana**, v. 45, p. 1-19, 2024. Disponível em: <https://revistaig.emnuvens.com.br/derbyana/article/view/820/810>. Acesso em: mar 2025.

CUSTODIO, E; LLAMAS, M.R. **Hidrologia Subterrânea**. 2.ed. Barcelona: Omega, 1983.

DUARTE, M. L.; ZANCHI, F. B.; NEVES, J. R. D.; COSTA, E. S.; JORDÃO, W. H. C. Vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas no município de Humaitá, Amazonas, Brasil. **Revista Ambiente & Água**, v. 11, n. 2, p. 402 - 413, jun. 2016. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ambiagua/a/6HhdSmJ4Nrg8ZzTZPhTQnGh/abstract/?lang=pt>. Acessado em: out 2022.

DUDA, R.; ZDECHLIK, R. Groundwater pollution risk assessment based on vulnerability to pollution and potential impact of land use forms. **Polish Journal of Environmental Studies**, v. 29, n. 1, p. 87-99, 2020.

FANNAKH, A.; FARSANG, A. DRASTIC, GOD, and SI approaches for assessing groundwater vulnerability to pollution: a review. **Environmental Sciences Europe**, v. 34, n. 77, p. 1-16, 2022. Disponível em: <https://enveurope.springeropen.com/articles/10.1186/s12302-022-00646-8>. Acessado em: mar 2025.

FEITOSA, F. A.C.; FILHO, J. M.; FEITOSA, E. C.; DEMETRIO, J. G. A. **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. 3. ed. Rio de Janeiro: CPRM, 2008.

FOSTER, S.; HIRATA, R. C.; ROCHA, G. A. Riscos de poluição das águas subterrâneas: uma proposta metodológica da avaliação regional. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 5, São Paulo, 1988. **Anais...** São Paulo: ABAS, p. 175-185. 1988. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/22664>. Acessado em: out 2022.

FOSTER, S.; HIRATA, R. **Groundwater pollution risk evaluation: a methodology based on available data**. CEPIS/PAHO Technical Report: Lima/Peru, 1998, 78p.

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, 114p.

GOELZER, D. P.; CARVALHO, T. S. Contaminação de águas subterrâneas por necrochorume. **Revista Foco**, v. 16 n. 6, p. 1-16, 2023. Disponível em: <https://ojs.focopublicacoes.com.br/foco/article/view/2231>. Acessado em: mar, 2025.

GHOLIPOR, Y.; SHAHBAZI, M. M.; BEHNIA, A. An improved version of inverse distance weighting metamodel assisted Harmony Search algorithm for truss design optimization. **Latin American Journal of Solid Sand Structures**, v. 10, p. 283-300, 2013. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/lajss/a/qnthBSyW5dY4nG5WQsTQptj/?lang=en>. Acessado em: out 2022.

HERNANDEZ, P. G. L.; ATHAYDE, G. B.; ATHAYDE, C. V. M. Técnicas de espacialização de parâmetros hidrogeológicos: estudo de caso em aquíferos sedimentares no estado do Paraná. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 20, Campinas, 2018. **Anais...** São Paulo: ABAS, p. 1 - 4, 2018. Disponível em: <https://docplayer.com.br/148146373-Tecnicas-de-espacializacao-de-parametros-hidrogeologicos-estudo-de-caso-em-aquiferos-sedimentares-no-estado-do-parana.html>. Acessado em: out 2023.

HIRATA, R. FERNANDES, A. J. Vulnerabilidade à poluição de aquíferos. In: FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; DEMETRIO, J. G. A. (Eds). **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. Rio de Janeiro: CPRM, p. 405-424, 2008.

HIRATA, R.; SUHOGUSOFF, A. V.; MARCELLINI, S. S.; VILLAR, P. C.; MARCELLINI, L. A revolução silenciosa das águas subterrâneas no Brasil: uma análise da importância do recurso e os riscos pela falta de saneamento. **Instituto Trata Brasil**. São Paulo, [S.l: v., n.], p. 1- 36, 2019. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/002928658>. Acessado em: out 2023.

HUANG, F.; LIU, D.; TAN, X.; WANG, J.; CHEN, Y.; HE, B. Explorations of the implementation of a parallel IDW interpolation algorithm in a Linux cluster-based parallel GIS. **Computers & Geosciences**, v.37, n.4, p.426-434, 2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0098300410003225>. Acessado em: out 2023.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **Applied Geostatistics**. New York: Oxford University Press, 1989, 561p.

KEMERICH, P. D. C.; MARTINS, S. R.; KOBAYAMA, M.; DESCOVI FILHO, L. L. V.; BORBA, W. F.; SOUZA, E. E. B.; FERNANDES, G. D. Análise da vulnerabilidade natural à contaminação da água subterrânea: comparativo entre a metodologia GOD e DRASTIC. **Revista Geociências do Nordeste**, v.6, n.2, p.45-53, 2020. Disponível em: <https://periodicos.ufrn.br/revistadoregne/article/view/19080/13103>. Acesso em: mar 2025.

LANDIM, P. M. B. Sobre geoestatísticas e mapas. **Terra e Didática**, v. 2, n. 1, p. 19 – 31, 2006. Disponível em: https://www.fca.unesp.br/Home/Instituicao/Departamentos/CienciadoSolo/gepag/t.didatica_2006_v02n01_p019-033_landim.pdf. Acessado em: out 2023.

LANDIM, P. M. B. **Análise estatística de dados geológicos multivariados**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011, 208p.

LI, J.; HEAP, A.D. **Review of spatial interpolation methods for environmental scientists**. Canberra: Geoscience Australia, 2008, 137p. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/246546630_A_Review_of_Spatial_Interpolation_Methods_for_Environmental_Scientists. Acessado em: out 2023.

MADROÑERO, F. D. R.; OLIVEIRA, F. S.; SOUZA, R. F.; NAVONI, J. A. Vulnerabilidade à poluição antropogênica no Sistema Aquífero Dunas/Barreiras da Região Metropolitana de Natal. **Sociedade & Natureza**, v. 34, p.1-15, 2022. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/sn/a/YKNYGjvw39rc7yTqh4PZfwd/?format=pdf&lang=pt>. Acessado em: mar.2025.

MEDEIROS, C. M.; RIBEIRO, M. A.F.M.; RUFINO, I. A. A.; BARBOSA, D. L. Mapeamento da vulnerabilidade de parte da Bacia Sedimentar do Baixo Curso do rio Paraíba utilizando o método GOD. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15, Curitiba, 2011. **Anais...** Curitiba: INPE, p. 3819 – 3826. Disponível em: <http://marte.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/marte/2011/07.11.16.42/doc/thisInformationItemHomePage.html>. Acessado em: out 2023.

NASCIMENTO FILHO, J. C. B.; NASCIMENTO, P. S. R. Combinação linear ponderada na determinação da capacidade de armazenamento de água subterrânea. **Revista Internacional de Ciências**, v. 12, n. 1, p. 6 – 25, 2022. Disponível em: <https://www.e-publicacoes.uerj.br/ric/article/view/57525>. Acessado em: mar 2025.

NASCIMENTO, P. S. R.; SILVA, N. P. C. Aplicação de sensoriamento remoto e análise espacial em alinhamentos geológicos como indicador da potencialidade de acumulação de águas subterrâneas. **Revista Brasileira de Geomática**, v. 7, n. 4, p. 204-222, out/dez. 2019.

NISTOR, M. M.; RAHARDJO, H.; SATYANAGA, A.; HAO, K. Z.; XIAOSHENG, Q.; SHAM, A. W. L. Investigation of ground water table distribution using boreholepiezometer data interpolation: Case study of Singapore. **Engineering Geology**, v.271, n. 105590, p. 1-13, 2020.

OHMER, M.; LIESCH, T.; GOEPPERT, N.; GOLDSCHIEDER, N. On the optimal selection of interpolation methods for ground water contouring: na example of propagation of uncertainty regarding inter-aquifer exchange. **Advances in Water Resources**, v. 109, p. 121-132, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0309170817306140>. Acessado em: out 2022.

Estimativa da Vulnerabilidade à Contaminação das Águas Subterrâneas na Região Metropolitana de Aracaju (Se)

OLIVEIRA, K. S.; SANTOS, T. L.; NASCIMENTO, P. S. R. Espacialização por interpolador Kernel da potencialidade de armazenamento de água subterrânea na região Leste do Estado de Sergipe In: SILVA, H. C. (Org.). **Gestão de recursos hídricos e sustentabilidade**, ed. Ponta Grossa: Atena Editora, 2019, v.3, p. 97-107.

RUSSO, A. S. **Estimativa da vulnerabilidade de aquíferos utilizando sistemas de informações geográficas e geostatística – UGRHI – PCJ. 2009. 75f.** Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44138/1de-04032009-100534/pt-br.php>. Acessado em: out 2022.

SANTOS, R. A. dos; MARTINS, A. A.; NEVES, J. P.; LEAL R.A.(Orgs.) **Geologia e Recursos Minerais do Estado de Sergipe**. Texto Explicativo do Mapa Geológico do Estado de Sergipe. Brasília: CPRM, 1998. 156 p. il. Mapa color., escala 1:250.000. Convênio CPRM – CODISE.

SGB. Serviço Geológico do Brasil – CPRM. **Sistema de Informações de Águas Subterrâneas – SIAGAS**. Rio de Janeiro: SGB/CPRM, 2000. Disponível em: <http://siagas.cprm.gov.br/>. Acessado em: dez 2023.

SERHMA. Superintendência Especial de Recursos Hídricos e Meio Ambiente. **Boletim de Gestão nº 4: uso dos recursos hídricos autorizados em Sergipe**. SERHMA: Aracaju, 2022.

SETIANTO, A.; TRIANDINI, T. Comparison of kriging and inverse distance weighted (IDW) interpolation methods in lineament extraction and analysis. **Journal of Southeast Asian Applied Geology**, Yogyakarta, v. 5, n. 1, p. 21-29. 2013.

SILVA, A. B. **Sistemas de informações geo-referenciadas: conceitos e fundamentos**. Campinas: Editora Unicamp, 2003. 236 p.

SILVA, M. V. G.; LOPES, F. A.; COTA, G. E. M.; MAGALHÃES JÚNIOR, A. P. Panorama das outorgas de uso de águas subterrâneas na área de abrangência da Supram Central Metropolitana, Minas Gerais. **Caderno de Geografia**, v.34, n.78, p. 872-892, 2024. Disponível em: <https://periodicos.pucminas.br/geografia/article/view/32881/22564>. Acessado em: mar 2025.

SILVA, L. R.; PIZZOLATTI, B. S.; SOARES, M.; MARTINS, M.; LUNARDI, S. Produção de solução clorada em reator eletrolítico com vistas à desinfecção de água para abastecimento. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v.12 n.8, p. 1-8, 2021. Disponível em: <https://www.sustenere.inf.br/index.php/rica/article/view/5979>. Acessado em: mar 2025.

SUDEN. Subsecretaria de Estado do Desenvolvimento Energético Sustentável. **Panorama Energético de Sergipe 2014 – ano base 2012**. Aracaju: SUDEN/SE, 2014, 83p.

SUN, Y.; KANG, S.; LI, F.; ZHANG, L. Comparison of interpolation methods for depth to groundwater and its temporal and spatial variations in the Minqin oasis of northwest China. **Environmental Modelling & Software**, v. 24, p. 1163-1170, 2009. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364815209000796>. Acessado em: out 2022.

TEIXEIRA, T. O.; VEDANA, L. A.; STEFANO, P. H. P.; SIQUEIRA, J. B.; LINHARES, S. S.; CRISTO, S. A.; SANTOS, M. M. N.; GOMES, I. P.; FRAGA, I. M. Análise da vulnerabilidade de aquíferos em Aracaju, utilizando o método GOD. In: ENCONTRO DE RECURSOS HÍDRICOS EM SERGIPE, 12, 2019. Aracaju. **Anais...** Aracaju, 2019, p. 1-5. Disponível em: <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=4742>. Acessado em: dez 2022.

TRINDADE, S. **Análise da vulnerabilidade e do risco potencial de contaminação das águas subterrâneas do Sistema Aquífero Costeiro na região de Cidreira e Balneário Pinhal, RS**. 2022. Monografia (Graduação em Geologia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/247619>. Acessado em: set 2023.

ULIANA, M. M. **Basic hydrogeology – an introduction to the fundamentals of groundwater Science**. Ontario: The Project Groundwater, 2025.

VILLANUEVA, T. C. B.; BASTOS, L. L. R.; ZUCCHI, M. R.; AZEVEDO, A. E. G.; VILLANUEVA, P. R. Aplicação do método COP para avaliação da vulnerabilidade intrínseca à contaminação do aquífero cárstico salitre, Irecê-BA, Brasil. **Brazilian**

Journal of Aquatic Science and Technology, v.1, n.19, p.55-65, 2015. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/16606>. Acessado em: set 2023.

WOOD, W. W.; CHERRY, J. A. Food Security and Inaccurate Quantification of Groundwater Irrigation Use. **Groundwater Journal**. v.59, n.6, p. 782-783, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/gwat.13122>. Acessado em: mar 2025.

ZANETTI, N. **Estimativa da vulnerabilidade natural do aquífero livre no município de Rio Claro/SP**. 2012. 110f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 2012. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/28528/18532>. Acessado em: out 2023.