

Publicado em 10 de agosto de 2023
REVISTA SOCIEDADE CIENTÍFICA, VOLUME 6, NÚMERO 1, ANO 2023

MÉTODOS DE ANÁLISE DA VULNERABILIDADE DE AQUÍFEROS ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Glorgia Barbosa de Lima de Farias ¹; Luiz Fernando Scheibe ²

¹Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará

glorgia.farias@gmail.com

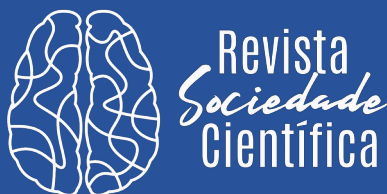
²Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil

scheibe2@gmail.com

RESUMO

O conceito de vulnerabilidade contempla diferentes entendimentos dependendo do objeto foco de análise e nesta pesquisa é abordada a análise da vulnerabilidade das águas subterrâneas aos impactos das mudanças climáticas. A vulnerabilidade às mudanças climáticas considera o grau a que um sistema é suscetível aos efeitos adversos das mudanças climáticas, ou incapaz de lidar com os mesmos. Objetiva evidenciar as diferentes abordagens acerca da vulnerabilidade das águas subterrâneas diante das mudanças climáticas e destaca os principais métodos utilizados para analisar a vulnerabilidade de aquíferos. Para tal, foi utilizada a revisão sistemática da bibliografia como método de pesquisa. A análise das fontes deixou evidente que os métodos de análise da vulnerabilidade de aquíferos não contemplam de forma explícita, em sua maioria, o componente ‘mudanças climáticas’, e considerando o atual cenário mundial de intensificação dos eventos extremos e de pressão sobre as águas subterrâneas, entende-se necessário o desenvolvimento de pesquisas e métodos que sejam capazes de fazer essa avaliação integrada mais efetiva.

Palavras-chave: Águas subterrâneas, Aquíferos, Mudanças climáticas, Métodos de análise.



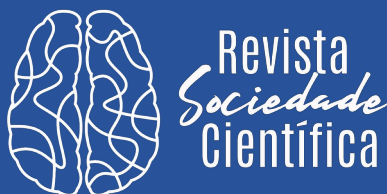
1 INTRODUÇÃO

O conceito de vulnerabilidade compreende diferentes entendimentos dependendo do objeto foco de análise. Do ponto de vista da vulnerabilidade dos sistemas humanos às mudanças climáticas, ou seja, da população enquanto principais atingidos por essas mudanças, a vulnerabilidade é compreendida como a capacidade que comunidades e os sistemas humanos têm para lidar e se adaptar às mudanças climáticas. Por outro lado, quando se fala de um aquífero o que se analisa é a vulnerabilidade física do mesmo. Isso porque o aquífero não tem capacidade para se adaptar, mas apresenta uma estrutura própria que lhe permite, ou não, ‘resistir’ à contaminação por ações antrópicas e aos impactos diretos das Mudanças Climáticas, como as secas mais intensas e prolongadas.

Um cenário que ilustra essas diferentes abordagens é o de uma ilha inabitada pelo homem, a qual, devido ao aumento do nível do mar, é submergida: a única análise de vulnerabilidade adotada é referente às características físicas e talvez ecológicas da mesma. De outro lado, um país insular, cuja população, economia e estruturas sociais em constante ameaça pelo mesmo aumento do nível do mar - mas que por meio de ações antrópicas (construção de mecanismos de adaptação) seja capaz de se adaptar e mitigar os impactos das inundações, apresenta uma análise de vulnerabilidade que compreende os seres humanos e seus meios de vida como vulneráveis.

Dessa forma, não há vulnerabilidade social, econômica e cultural se não há ser humano que venha a ser atingido. Por outro lado, a vulnerabilidade física dos sistemas naturais pode ser intrínseca (própria desses sistemas), mas também construída, ou seja, a partir da inserção do homem enquanto parte da natureza e utilizador dos recursos naturais. Assim, é possível afirmar que em um sistema natural, com características físicas que o tornam menos vulnerável às ameaças climáticas, existe a possibilidade de esse sistema ser afetado e tornar-se mais vulnerável devido às pressões indiretas que as Mudanças Climáticas podem causar.

O artigo está estruturado com uma Introdução; seis capítulos principais: Metodologia; Vulnerabilidade dos sistemas antrópicos às mudanças climáticas;



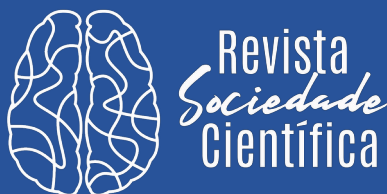
Vulnerabilidade dos sistemas de águas subterrâneas; Vulnerabilidade das águas subterrâneas a partir dos impactos secundários das mudanças climáticas; Métodos para análise de vulnerabilidade de aquíferos; e Aplicações dos métodos em pesquisas sobre a vulnerabilidade das águas subterrâneas; e as Considerações Finais. Objetiva evidenciar as diferentes abordagens acerca da vulnerabilidade das águas subterrâneas diante das mudanças climáticas e destaca os principais métodos utilizados para analisar a vulnerabilidade de aquíferos.

2 METODOLOGIA

A revisão sistemática teve o intuito de selecionar documentos que pudessem auxiliar no objetivo da pesquisa. De acordo com Vieira (2017) [32] “a revisão sistemática busca elaborar uma síntese dos trabalhos existentes e codificá-los de forma qualitativa com o uso de algum critério”, em que são demonstradas as diferenças entre os estudos, os métodos, as definições de variáveis e outros elementos. Assim, objetiva realizar uma busca e análise qualitativa e interpretativa dos textos.

A busca sistemática foi feita inicialmente na base de Periódicos CAPES, uma vez que o tema da pesquisa é de caráter regional e local. Dessa forma, a utilização do Portal de Periódicos CAPES se justifica ao retornar mais resultados interessantes à pesquisa, relacionados diretamente com a área de estudo e no idioma português. Embora tenham retornado resultados de pesquisa em outros idiomas, o foco não coincidia com a área e objeto de estudo proposto. Por esses motivos ficou evidente o prevailecimento da base de dados CAPES em detrimento da base de dados SCOPUS.

No portal de Periódicos CAPES o mecanismo de busca contém as definições “qualquer”, “no título”, “como autor” e “no assunto” para a definição dos termos ou descritores. Além disso, os operadores são os seguintes:



Publicado em 10 de agosto de 2023
REVISTA SOCIEDADE CIENTÍFICA, VOLUME 6, NÚMERO 1, ANO 2023

- contém: atende a parte do termo, ou seja, palavras derivadas ou que contenham parte do termo definido podem ser incluídas nos resultados, exemplo: “aquifer” pode retornar “aquífero”;

- é (exato): busca exatamente o termo na base de dados, por exemplo, o termo “Mudança Climática” retornará apenas documentos que contenham esse termo;

- começa com: busca como inicia o termo pesquisado, ou seja, o termo utilizado deverá aparecer no início do título dos documentos.

Foram também realizadas buscas sistemáticas na base de dados do Google Acadêmico, o qual, da mesma forma que a CAPES, disponibiliza definições para a busca dos termos:

- com todas as palavras: localiza documentos que contenham todas as palavras definidas na busca.

- com a frase exata: busca documentos que apresentem a frase ou termos na sequência em que foram definidos na busca.

- com no mínimo uma das palavras: encontra documentos com pelo menos um dos termos definidos na busca.

- sem as palavras: exclui os documentos que apresentem as palavras selecionadas.

Os termos localizados podem ser combinados utilizando-se os operadores booleanos "AND", "OR" ou "NOT", para compor a estratégia de busca. Entre termos distintos, o "AND" é usado para localizar estudos sobre os dois temas (intersecção); entre os sinônimos de um componente da busca, utiliza-se o "OR", recuperando-se artigos que abordam um ou outro tema (soma); e o operador "NOT" é utilizado para excluir um assunto da busca. Exemplo de termo de busca sistemática realizada no Google Acadêmico:

"Variabilidade climática" AND "Santa Catarina" AND "Oeste de Santa Catarina" AND "Pluviosidade" AND "Temperatura"

3 A VULNERABILIDADE DOS SISTEMAS ANTRÓPICOS ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

A vulnerabilidade às mudanças climáticas corresponde ao grau em que um sistema é suscetível a efeitos adversos das mudanças climáticas, ou incapaz de lidar com os mesmos, incluindo variabilidade climática e extremos [15]. Nesse sentido, a comunidade acadêmica compreende a vulnerabilidade às mudanças climáticas a partir de três fatores: a exposição, a sensibilidade e a capacidade adaptativa - sendo que na capacidade adaptativa estão inseridos componentes tangíveis, que correspondem aos ativos estruturais e à infraestrutura física que gerencia riscos, as estratégias de engenharia, abrigos, além de instituições de apoio psicológico e de saúde para a população afetada durante e após desastres; e os componentes intangíveis, que compreendem a capacidade adaptativa das pessoas, suas atitudes e crenças, que influenciam sua ação, sua percepção de risco e a ação coletiva [1]; [20] (Figura 1 e Figura 2).

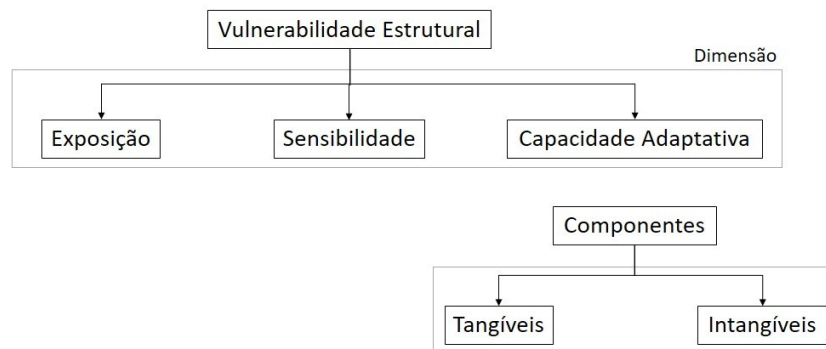


Figura 1 - Estrutura da vulnerabilidade às mudanças climáticas, incluindo componentes tangíveis e intangíveis. Fonte: Adaptado de Andrade e Szlafsztein, 2018 [1].

Observa-se, portanto, que a vulnerabilidade às mudanças climáticas pode variar de acordo com: o grau de exposição do sistema a determinado risco, o nível de sensibilidade ao mesmo, e de acordo com a sua capacidade para se adaptar [15]; [24]. Dessa forma, é possível afirmar que quanto maior for a capacidade adaptativa, menor será o grau de vulnerabilidade relacionado à ameaça. Importante destacar que embora os

conceitos de capacidade adaptativa e resiliência sejam utilizados algumas vezes como sinônimos, existem diferenças importantes entre os mesmos. Gallopín (2006) [13] mostra que a resiliência deve ser entendida como um subconjunto da capacidade adaptativa, uma vez que é definida em termos de mudanças de estado entre domínios, sendo uma propriedade interna do sistema, que não inclui a exposição às perturbações. Já a capacidade adaptativa compreende a capacidade de um sistema de ajustar-se às mudanças climáticas para moderar danos potenciais, aproveitar oportunidades ou lidar com as consequências.

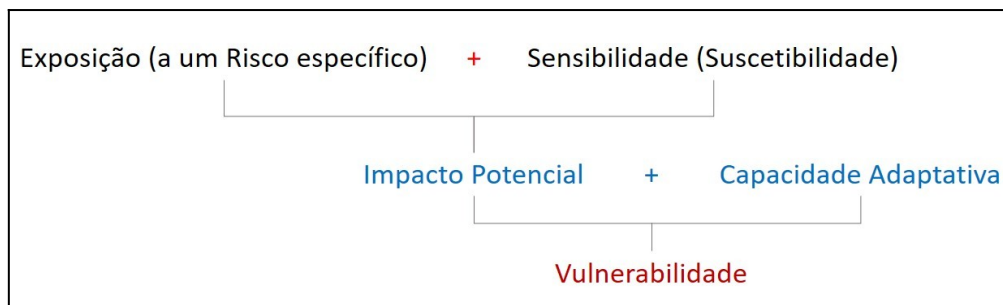
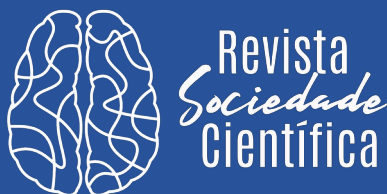


Figura 2 - Estrutura de impactos das mudanças climáticas. Fonte: Adaptado de Myers et al., 2011 [20].

4 VULNERABILIDADE DOS SISTEMAS DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

No que se refere à vulnerabilidade de um aquífero, ela pode ser intrínseca (ou natural), que corresponde à vulnerabilidade das águas subterrâneas aos contaminantes gerados pelas atividades antrópicas, considerando as características geológicas, hidrológicas, hidrogeológicas e hidrogeoquímicas inerentes da área; e específica (ou integrada), que corresponde à vulnerabilidade das águas subterrâneas a contaminantes em particular, considerando as propriedades do contaminante e sua relação com vários componentes da vulnerabilidade intrínseca [28]. Para Ribeiro et al. (2011) [26], a vulnerabilidade à contaminação de aquíferos compreende uma série de atributos ou características do meio, que correspondem ao solo, à zona não saturada, aos parâmetros hidráulicos do aquífero e à recarga, os quais controlam a habilidade do aquífero para resistir aos impactos, bem como determinam a sua capacidade de auto restauração.



A vulnerabilidade do aquífero, de acordo com FOSTER et al. (2006) [11], é determinada pelo contexto hidrogeológico natural, ou seja, a partir das características intrínsecas, muito estáveis; e o risco só ocorre quando há uma carga que represente perigo, ou seja, uma carga com algum tipo de poluição e/ou contaminação, uma vez que as atividades poluidoras representam um fator dinâmico que, inicialmente, pode ser controlado [18] [25]. Nesse contexto, Lopes (2012) [18] afirma que a vulnerabilidade das águas subterrâneas pode ser definida como “o grau da potencial suscetibilidade da água subterrânea a uma fonte de poluição tópica ou difusa”.

A crescente degradação da qualidade das águas superficiais pode fazer com que as águas subterrâneas assumam maior importância, tanto do ponto de vista socioeconômico como ambiental; ademais, já é perceptível o crescimento no uso das águas subterrâneas nas últimas décadas, em comparação às águas superficiais [3] [16]. As águas subterrâneas são a fonte mais importante de água em regiões áridas e semiáridas, devido ao grande volume disponível e à baixa vulnerabilidade à poluição, se comparadas com as águas superficiais [28] [16]. Dessa forma, a “maior ou menor suscetibilidade de um aquífero à contaminação e poluição é chamada de vulnerabilidade” [3].

De acordo com REDE GUARANI/SERRA GERAL (2020) [25], é possível a existência de um aquífero com alto índice de vulnerabilidade, mas que não tenha risco de poluição caso inexista carga poluente. Por outro lado, é possível a existência de um risco de poluição excepcional, embora o índice de vulnerabilidade seja baixo.

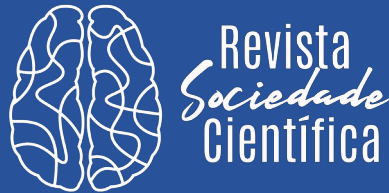
Entretanto, é importante analisar a vulnerabilidade do aquífero também do ponto de vista da diminuição da sua disponibilidade ou exaustão. Ou seja, por meio das mudanças climáticas, com secas mais intensas, frequentes e/ou duradouras, e consequente aumento da retirada da água subterrânea, o aquífero se torna vulnerável à intensificação da demanda de água pelas atividades antrópicas, que podem causar o desequilíbrio ou exaustão do aquífero. Aslam et al. (2018) [2] afirmam que a vulnerabilidade das águas subterrâneas aumentará se as mudanças climáticas

continuarem com a tendência atual. Os fatores não-climáticos como crescimento populacional, urbanização, desmatamento, industrialização, além das demandas crescentes dos setores doméstico e agrícola, têm a propensão de estressar as águas subterrâneas e serem amplificados pelas mudanças climáticas.

Assim, a vulnerabilidade das águas subterrâneas às mudanças climáticas está relacionada com a sua sensibilidade às ameaças atuais, bem como com os potenciais estressores climáticos. Na Figura 3 fica evidente a relação entre a exposição, a sensibilidade, a capacidade adaptativa e os impactos das mudanças climáticas.



Figura 3 - Vulnerabilidade das Águas Subterrâneas aos impactos das Mudanças Climáticas. Fonte: Adaptado de Aslam et al. (2018) [2].



Publicado em 10 de agosto de 2023
REVISTA SOCIEDADE CIENTÍFICA, VOLUME 6, NÚMERO 1, ANO 2023

Nesse sentido, observa-se que a exposição, ou seja, os estímulos climáticos a que um sistema é exposto, somada à sensibilidade (propriedade intrínseca), por um lado, e a capacidade do sistema de se adaptar aos impactos prejudiciais das mudanças climáticas, por outro, são os fatores que implicarão na definição do grau de vulnerabilidade de um sistema aquífero.

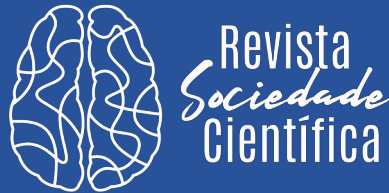
Compreende-se que a vulnerabilidade de sistemas de águas subterrâneas não poderia, neste caso, ser analisada apenas do ponto de vista das características intrínsecas dos mesmos para repelir ou suportar uma carga poluidora. Essa análise deve contemplar a percepção de que parâmetros meteorológicos, como precipitação e temperatura, influenciam nos níveis de armazenamento das águas subterrâneas, seja de maneira direta pela menor infiltração e conseqüente diminuição da recarga dos aquíferos; seja de forma indireta por meio do aumento na demanda de água por fatores não-climáticos. Ambos os casos são influenciados pelas mudanças climáticas, conforme visto anteriormente.

5 VULNERABILIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS A PARTIR DOS IMPACTOS SECUNDÁRIOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

No que se refere à vulnerabilidade das águas subterrâneas às mudanças climáticas, há uma relação direta, em que as alterações nas variáveis climáticas (temperatura, evaporação e precipitação) podem influenciar diretamente sobre a dinâmica do aquífero; e uma indireta, no caso dos impactos das mudanças climáticas sobre a dinâmica da população, da economia e do ambiente - e desses impactos sobre o aquífero (impactos secundários).

Em relação aos impactos das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos subterrâneos, Turrall et al. (2011) [31] destacam que existem três possibilidades básicas:

- Se houver um aumento da frequência e extensão das inundações ocorrerá um aumento da recarga do aquífero,



Publicado em 10 de agosto de 2023

REVISTA SOCIEDADE CIENTÍFICA, VOLUME 6, NÚMERO 1, ANO 2023

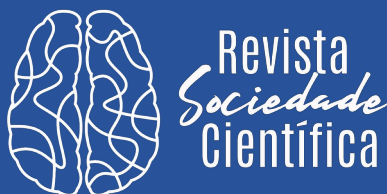
- Se ocorrer o aumento de frequência, duração e severidade das secas, o tempo do ciclo aumentará e a exploração exigirá melhor equilíbrio. Dessa forma, em anos mais secos (em que a demanda seria maior) deverá ser dada maior atenção à retirada da água subterrânea, de modo a evitar que o consumo ultrapasse a recarga e, em anos mais chuvosos, esse uso poderá ser maior, uma vez que o ciclo de recarga do aquífero ocorrerá com mais eficiência.

- Se acontecer um aumento do derretimento da neve, as taxas de recarga do aquífero deverão aumentar, mas isso dependerá do comportamento do permafrost (gelo eterno) e dos padrões de recarga (específico para regiões frias).

As mudanças climáticas afetam as águas subterrâneas de forma direta, principalmente com relação a sua recarga por meio do aumento na temperatura média, da variabilidade da precipitação e do aumento do nível do mar [16]. Já Huang et al. (2017) [14] destacam que as mudanças climáticas afetariam, também diretamente, a vulnerabilidade das águas subterrâneas por meio da interação dos recursos hídricos superficiais, da malha de recarga e do nível das águas subterrâneas.

Além disso, existe a tendência de aumento na demanda por água e consequente aumento da extração de água subterrânea. Ademais, os recursos hídricos subterrâneos são impactados pelas alterações no uso e cobertura do solo. Huang et al. (2017) [14] ressaltam que as atividades antropogênicas, tais como a extração para consumo humano e irrigação, as emissões de poluentes e a urbanização podem exacerbar as alterações nessas águas.

Turrall et al. (2011) [31] afirmam que nos aquíferos nas regiões áridas e semiáridas, onde o escoamento diminuirá, é esperada uma severa redução no reabastecimento dos aquíferos. Importante destacar que a vulnerabilidade das águas subterrâneas é fortemente dependente dos fatores profundidade do aquífero, recarga, uso e cobertura do solo. Assim, é esperado que a qualidade das águas subterrâneas seja influenciada pelas mudanças climáticas e pelas atividades antrópicas, devido



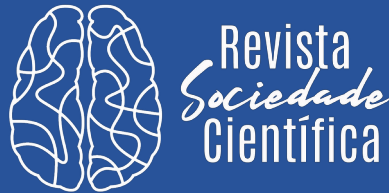
Publicado em 10 de agosto de 2023
REVISTA SOCIEDADE CIENTÍFICA, VOLUME 6, NÚMERO 1, ANO 2023

principalmente às influências da recarga e uso do solo nos sistemas de águas subterrâneas [17].

Nesse sentido, são vários os fatores que podem causar pressão sobre os aquíferos e aumentar o fator de poluição desses. Entre estes se destacam: a agricultura, a industrialização, e o crescimento populacional (e sua concentração em áreas urbanas). Com relação à agricultura, no caso de as mudanças climáticas levarem a uma diminuição da disponibilidade de recursos hídricos superficiais, há a tendência de que as águas subterrâneas passem a ser o principal recurso a ser utilizado na irrigação (no caso de locais em que há possibilidade de perfuração de poços); entretanto, em locais onde a perfuração de poços é inviável ou em quantidade menor que a necessária para produção, existe a possibilidade de uma diminuição da produção. Essa diminuição da produção agrícola pode levar as comunidades mais próximas a migrarem para outras regiões mais propícias ao desenvolvimento da prática agrícola [33]. Por outro lado, é possível que ocorra uma expansão das áreas utilizadas para cultivo, aumentando assim a possibilidade de contaminação do aquífero por agrotóxicos.

No que se refere à industrialização, a menor disponibilidade de recursos hídricos superficiais também levará à necessidade de perfuração de poços e ao despejo de efluentes (muitas vezes não tratados) no ambiente, o que poderá causar prejuízos às águas subterrâneas. Nesse sentido, Comasseto et al. (2015) [4] e Costa et al. (2007) [6] afirmam que a poluição da água superficial com conseqüente comprometimento de sua qualidade, tem levado ao aumento do uso de águas subterrâneas.

A industrialização e o conseqüente desenvolvimento promovem a demanda por alimentos, lazer, equipamentos eletrônicos, entre outros bens de consumo, que demandam água e energia de forma interdependente para serem produzidos, ou seja, ao longo de todo o processo de produção de um bem, há necessidade de água e energia [34] [30]. Assim, Cominola et al. (2015) [5] ressaltam a relação direta entre o desenvolvimento econômico e a demanda por recurso hídrico; ou seja, o consumo de



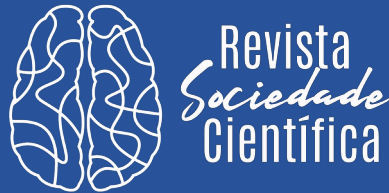
água tende a ser maior à medida que o poder aquisitivo aumenta, pressionando o sistema integrado de água e energia a suprir tal demanda [27].

Já o crescimento populacional, por si só, implica em maior demanda por recursos hídricos para consumo. Concentração populacional, decorrente muitas vezes de migração devido ao estresse hídrico, pode levar a maior demanda por recursos hídricos subterrâneos para consumo humano, tratamento de efluentes, e produção de alimentos, com conseqüente extração deste recurso além da sua capacidade de recarga. Observa-se que com o crescimento populacional e a industrialização, maiores quantidades de efluentes domésticos e industriais são despejados e levam à poluição das águas subterrâneas [28], construindo, portanto outro fator de vulnerabilidade.

Huang et al. (2017) [14] destacam que muitos estudos avaliam a vulnerabilidade das águas subterrâneas, porém são mais focados nos cenários presentes ou em cenários de mudanças climáticas sem considerar a urbanização. Dessa forma, afirmam que pouco se sabe acerca da vulnerabilidade futura das águas subterrâneas combinada com os efeitos das mudanças climáticas e mudanças no uso do solo sob o conjunto de cenários de mudanças climáticas.

Entretanto, é fundamental que sejam implementadas políticas de adaptação voltadas para a gestão de recursos hídricos, independentemente da precisão das previsões climáticas. Gondim et al. (2010) [12], afirmam que esse tipo de política é definida pelo Banco Mundial como uma política ‘sem arrependimentos’ (no regrets), que corresponde às políticas direcionadas à solução de problemas associados com a variabilidade climática existente, enquanto, ao mesmo tempo, é construída maior ‘capacidade adaptativa’ às mudanças climáticas futuras.

Pettengell (2010) [24] destaca que a adaptação deve ser compreendida como uma combinação entre a redução da vulnerabilidade e a preparação para lidar com riscos específicos como as secas ou inundações, por exemplo. Esse autor destaca ainda que uma abordagem de adaptação que funciona, mesmo com a incerteza de eventos climáticos futuros, é a combinação de atividades que: abordem os perigos atuais, a



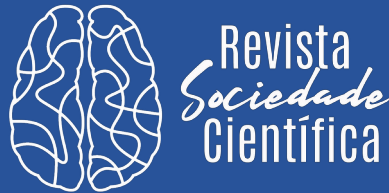
maior variabilidade climática e as tendências emergentes; que gerenciem os riscos e incertezas; e que construam a capacidade adaptativa.

6 MÉTODOS PARA ANÁLISE DE VULNERABILIDADE DE AQUÍFEROS

De acordo com Aslam et al. (2018) [2], existem substanciais variações na abordagem e nos métodos utilizados para medir a vulnerabilidade de aquíferos, principalmente porque a vulnerabilidade às mudanças climáticas é altamente dependente do contexto e da escala, variando amplamente entre os sistemas. Existem, portanto, diversos métodos que são utilizados para a determinação da vulnerabilidade intrínseca e específica de aquíferos. Entre esses se destacam: DRASTIC, GOD, TPE, Sintacs, Modified Sintacs, e DART e GALDIT [2] [26].

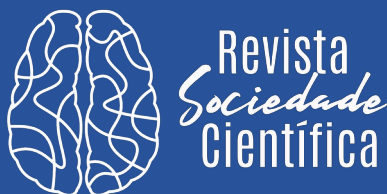
Segundo Sener e Davraz (2013) [28], os métodos de avaliação da vulnerabilidade de um aquífero dividem uma determinada área geográfica em subáreas, considerando a sua suscetibilidade à contaminação das águas subterrâneas, para que posteriormente sejam definidas medidas de proteção das mesmas. Ribeiro et al. (2011) [26] afirmam que a utilização de metodologia para determinação da vulnerabilidade de aquíferos atua como uma ferramenta de auxílio para as propostas de proteção de águas subterrâneas, de atividades de gestão de recursos hídricos e de planejamento e ordenamento territorial.

A vulnerabilidade dos aquíferos pode ser determinada a partir de parâmetros intrínsecos aos mesmos, como: nível estático, condutividade hidráulica, transmissividade, grau de confinamento ou não confinamento do aquífero, tipo de aquífero (meio cárstico, intersticial e fissural), tipo de litologia, grau de fraturamento das rochas; como, também, a partir de atributos naturais extrínsecos ao aquífero, como: tipo de solo, topografia do terreno, além da quantificação da recarga [23]. Segundo diversos autores [2] [26] [14], os métodos DRASTIC e GOD são os mais utilizados para avaliar a vulnerabilidade intrínseca de aquíferos, uma vez que são de fácil utilização e aplicação em diferentes áreas.



O método DRASTIC é amplamente utilizado por pesquisadores em função de sua explicação distinta, requisitos de dados e fácil flexibilização do método às necessidades da área estudada, ou seja, é possível incorporar outros fatores além dos previamente definidos pelo método. O DRASTIC utiliza sete parâmetros: distância do nível da água subterrânea (D – depth to water table); recarga líquida (R - net recharge); tipo de aquífero (A – aquifer type); tipo de solo (S – soil type); topografia (T – topography); impacto da zona vadosa (I – impact of vadose zone); e condutividade (C – conductivity) [14] [17] [8]. Entretanto, os mapas de vulnerabilidade de aquíferos apresentam limitações em decorrência da ausência de informações e dados necessários para a aplicação de metodologias detalhistas. Dessa forma, quando os dados são escassos e apresentam incertezas ou não abrangem completamente o território, a aplicação do DRASTIC torna-se inviável [26]. Ademais, O método DRASTIC original, possibilita definir o índice de vulnerabilidade intrínseca, mas não a vulnerabilidade específica. Para que seja possível avaliar a vulnerabilidade específica, como é o caso da vulnerabilidade às mudanças climáticas, o modelo DRASTIC deve ser modificado, de modo a incluir parâmetros que reflitam o impacto antropogênico [29]. Nesse sentido, Aslam et al. (2018) [2], indicam que o método Modified-DRASTIC-AHP pode ser uma alternativa convincente, já que envolve a atribuição de pesos para desenvolver uma hierarquia dos indicadores baseada na experiência.

Outro método bastante utilizado na avaliação de vulnerabilidade de aquíferos devido à simplicidade de conceitos e aplicações é o método GOD [10] [9]. Três fatores básicos são utilizados para determinar a vulnerabilidade do aquífero à poluição: 1. O nível de inacessibilidade hidráulica da zona saturada do aquífero; 2. A capacidade de atenuação dos contaminantes dos estratos que cobrem a zona saturada do aquífero [26]; e 3. A distância até o lençol freático. Dessa forma, o índice de vulnerabilidade GOD caracteriza a poluição do aquífero com base nos parâmetros: Grau de confinamento hidráulico das águas subterrâneas, no aquífero estudado; Ocorrência de estratos sobrepostos (leitões confinantes), em termos de caráter litológico e o grau de



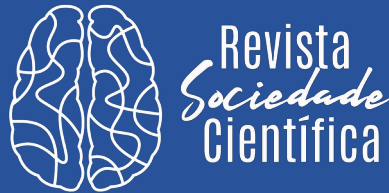
consolidação que determinam sua capacidade de atenuação de contaminantes; e a Distância ou profundidade do lençol freático, que corresponderia à “zona vadosa [10]. Esse método define, também, apenas a vulnerabilidade intrínseca ao aquífero.

Na pesquisa desenvolvida por Lopes (2012) [18] [19], foi feita a complementação às análises possibilitadas pelo método GOD, e assim foi inserido o parâmetro solo (S) na análise de vulnerabilidade intrínseca do aquífero. Originalmente o método GOD não inclui um estudo explícito do solo (S), entretanto, Foster et al. (2002) [10] destacam que a maioria dos processos que provocam a atenuação e/ou eliminação dos contaminantes no subsolo ocorrem com muito mais frequência na zona biologicamente ativa do solo, o que justifica sua consideração. Ademais, Foster et al. (2006) [11] destacam que os perfis naturais de solo atenuam ativamente muitos poluentes resultantes das atividades humanas. Assim, foi utilizado no estudo, como descritores, o GODS, em que o parâmetro solo (S) avalia os valores de um índice do solo de acordo com o tipo de solo, sua textura e espessura.

7 APLICAÇÕES DOS MÉTODOS EM PESQUISAS SOBRE A VULNERABILIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

A pesquisa realizada por Nistor et al. (2016) [22] desenvolveu uma análise acerca dos índices climáticos locais e da evapotranspiração em cultivos do distrito de Belis, Oeste da cadeia de montanhas Cárpatos. O estudo baseou-se principalmente sobre a precipitação, dados de temperatura e imagens de satélite, e teve a abordagem focada no clima e em estudos hidrológicos. Utilizou a combinação do método de status do índice climático com a precipitação efetiva, com o objetivo de avaliar os efeitos das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos subterrâneos.

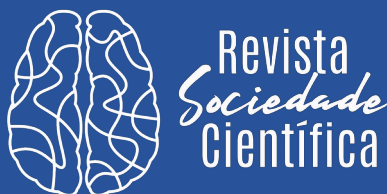
Já a pesquisa desenvolvida por Nistor (2019) [21] objetivou avaliar a vulnerabilidade das águas subterrâneas na escala espacial da Europa. Para isso, foi utilizada uma abordagem espacial por meio de sistema de informações geográficas (SIG) para determinar a vulnerabilidade das águas subterrâneas. Nesse sentido, foram



combinadas camadas de indicadores de quantidade e qualidade e o cálculo da vulnerabilidade das águas subterrâneas foi feito através do índice NISTOR-GWV (New Implemented Spatial-Temporal On Regions–Groundwater Vulnerability).

Huang et al. (2017) [14] desenvolveram o mapa de vulnerabilidade para a província de Hunan, China, a partir do modelo DRASTIC. Porém, adicionaram o parâmetro de uso urbano da terra, uma vez que a pesquisa teve como objetivos estimar a vulnerabilidade futura das águas subterrâneas da área de estudo diante de um conjunto de cenários de mudanças climáticas e urbanização intensiva; e analisar o fator primário a afetar a vulnerabilidade das águas subterrâneas. De acordo com os autores, a profundidade do lençol freático é o fator mais importante na análise de vulnerabilidade, uma vez que é ela que determina a espessura do material através do qual a água infiltrada deve viajar antes de chegar à zona saturada do aquífero. E reconhecem que a gestão dos recursos hídricos subterrâneos deve ser baseada em uma avaliação da vulnerabilidade das águas subterrâneas sob a ótica de uma variedade de possíveis mudanças no clima e mudanças no uso do solo.

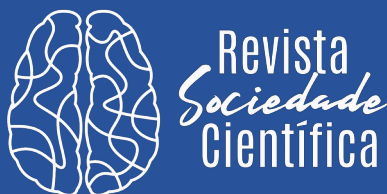
Li e Merchant (2013) [17], em seu estudo utilizaram o modelo DRASTIC modificado, em que tinham como objetivo determinar se, como e onde a vulnerabilidade das águas subterrâneas nessa área pode ser afetada pelas mudanças futuras no uso da terra, impulsionadas pelas mudanças climáticas e pelas crescentes demandas por biocombustíveis em North Dakota, EUA. O modelo DRASTIC revisado (DRSTIL) considerou a distância do nível da água subterrânea (D – depth to water table); a recarga líquida (R - net recharge); o tipo de solo (S - soil type); topografia (T – topography); impacto da zona vadosa (I - impact of vadose zone); e uso do solo (L – land use). Nessa pesquisa foi utilizada uma abordagem de modelagem que integra a vulnerabilidade das águas subterrâneas, cenários de mudanças climáticas e cenários modelados de uso e cobertura do solo.



Já na pesquisa desenvolvida por Ribeiro et al. (2011) [26], foi aplicado o método GOD com o objetivo de obter o mapa de vulnerabilidade à contaminação de aquíferos da sub-bacia do rio Siriri, em Sergipe. A aplicação do método mostrou-se interessante, uma vez que permite, com o auxílio de sistema de informação geográfica (SIG), delimitar as áreas mais susceptíveis a contaminação. Peixoto e Cavalcante (2019) [23] também utilizaram o método GOD em sua pesquisa, a qual desenvolveu um Índice de Risco de Contaminação da Água Subterrânea (IRCAS) aplicado aos aquíferos em ambiente urbano no município de Fortaleza, Ceará. A construção desse índice ocorreu a partir da metodologia GOD e anexando a esta o Índice de Saneamento Ambiental (ISA), em que os dados foram gerenciados em Sistema de Informação Geográfica (SIG) e validados com amostras de água subterrânea em 212 poços. Entretanto, nessas duas pesquisas não foram considerados fatores relacionados às mudanças climáticas, acredita-se que em função das limitações que o método GOD apresenta, pois utiliza apenas as características intrínsecas do aquífero [26].

No que se refere ao método GODS, destacam-se as pesquisas realizadas por Lopes (2012) [18] [19], Facco (2018) [7] e REDE GUARANI/SERRA GERAL (2020) [25] no âmbito do Sistema Aquífero Integrado Guarani/Serra Geral no Brasil. A pesquisa realizada por Lopes (2012) [18] desenvolveu o mapeamento da vulnerabilidade intrínseca e permitiu espacializar e identificar as áreas mais vulneráveis do Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) à contaminação das águas subterrâneas na Bacia do Rio do Peixe em Santa Catarina.

Por meio do cruzamento do mapa de Densidade de lineamentos com o mapa de Vulnerabilidade dos solos, Lopes (2012) [18] [19] formularam, assim, o mapa de vulnerabilidade intrínseca, o qual mostrou que as áreas com maior densidade de fraturas, falhas ou diques coincidem com as áreas de solos menos profundos (de característica menos argilosa). Essas áreas podem se constituir em faixas de maior vulnerabilidade do SASG, podendo inclusive chegar ao SAG. Com relação ao mapa de Risco de Contaminação das Águas Subterrâneas na Bacia do Rio do Peixe/SC, o mesmo



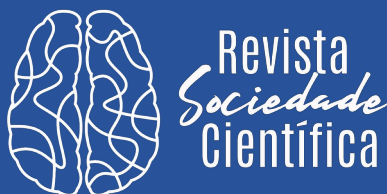
foi desenvolvido a partir da combinação do mapa de vulnerabilidade intrínseca e do mapa de risco de contaminação dos recursos hídricos, em que foram considerados os principais tipos de cobertura e uso da terra. Os resultados obtidos possibilitaram dar orientações referentes ao uso e ocupação da terra, considerando aspectos de proteção das águas subterrâneas do SASG.

Já a pesquisa realizada por Facco (2018) [7], utilizou o método GODS para determinar a vulnerabilidade do SASG no município de Chapecó/SC. E a pesquisa de REDE GUARANI/SERRA GERAL (2020) [25] utilizou esse método para determinar a vulnerabilidade intrínseca do SAIG/SG em toda sua área de abrangência em Santa Catarina. Destaca-se que as informações obtidas com esse método podem ser utilizadas como subsídio às discussões acerca das formas de utilização mais sustentáveis de uso da terra, com vistas à preservação da qualidade dos recursos hídricos. Entretanto, não é considerada, de forma explícita, nessas pesquisas, a utilização de fatores relacionados às mudanças climáticas.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Temáticas aparentemente tão distantes, como é o caso das Mudanças Climáticas e das Águas Subterrâneas, necessitam ser aproximadas para que os governantes tenham embasamento para definir as melhores estratégias de mitigação dos impactos que as mudanças climáticas poderão ocasionar às águas subterrâneas. Estas são, geralmente, consideradas como reservas estratégicas em relação às mudanças, cujos efeitos levariam um tempo maior para se manifestar, principalmente no caso de aquíferos mais profundos.

Nesse sentido, para que sejam postas em prática não apenas políticas de uso sustentável da terra como também medidas para minimizar os possíveis impactos (diretos ou indiretos) das mudanças climáticas sobre os aquíferos, é fundamental que os estudos de vulnerabilidade das águas subterrâneas também considerem as variações climáticas e suas projeções futuras.



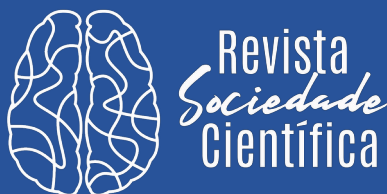
Publicado em 10 de agosto de 2023
REVISTA SOCIEDADE CIENTÍFICA, VOLUME 6, NÚMERO 1, ANO 2023

É fato que as águas subterrâneas, pela sua característica intrínseca, se apresentam com melhor qualidade para suprir as demandas básicas dos seres humanos. Entretanto, é também verdade que outras atividades antrópicas, juntamente com as mudanças climáticas, têm interferido nessa qualidade. Dessa forma, é fundamental a utilização de métodos de análise da vulnerabilidade de aquíferos que sejam capazes de indicar o grau de vulnerabilidade dos mesmos de acordo com as suas características intrínsecas.

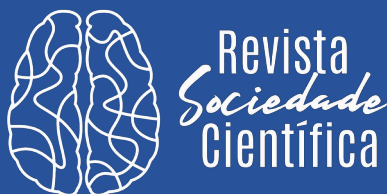
Desse modo, monitorar a qualidade das águas subterrâneas, entender sua dinâmica, capacitar técnicos para aplicar esses métodos, estimular a pesquisa e investir em políticas de proteção das águas subterrâneas são ações fundamentais para se manter a função original dos sistemas aquíferos. Enquanto recursos estratégicos, essa função original pode ser aproveitada nos momentos de crise, as quais têm o potencial de se intensificar em decorrência das mudanças climáticas globais.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

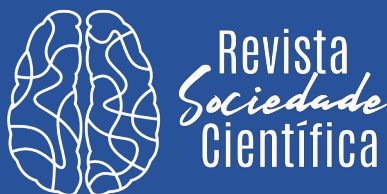
- [1] ANDRADE, M. M. N.; SZLAFSZTEIN, C. F. **Vulnerability assessment including tangible and intangible components in the index composition: An Amazon case study of flooding and flash flooding**. Elsevier: Science of the Total Environment, ISSN: 1879-1026, v. 630, p. 903–912, 2018.
- [2] ASLAM, Rana Ammar; SHRESTHA, Sangam; PANDEY, Vishnu Prasad. **Groundwater vulnerability to climate change: A review of the assessment methodology**. Elsevier: Science of the Total Environment, ISSN: 1879-1026, v. 612, p. 853–875, 2018.
- [3] BRASIL. Ministério do Meio Ambiente - MMA. Associação Brasileira de Águas Subterrâneas. Petrobras. **Águas Subterrâneas um recurso a ser conhecido e protegido**. Brasília, 40 p., 2007. Disponível em <http://www.mma.gov.br/estruturas/167/_publicacao/167_publicacao28012009044356.pdf> Acesso em 12 de setembro de 2019.



- [4] COMASSETTO, Vilmar; MATTHIENSEN, Alexandre; ALVES, Jonatas; FAVASSA, Celí Teresinha Araldi; WASKIEWIC, Maikon Eduardo; BÓLICO, Jackson. **Diagnóstico dos poços tubulares profundos e da qualidade das águas subterrâneas no município de Jaborá (SC)**. Brasília: XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 22 a 27, 8 p., Nov., 2015. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/28278>
- [5] COMINOLA, A.; GIULIANI, M.; PIGA, D.; CASTELLETTI, A.; RIZZOLI, A. E. **Benefits and challenges of using smart meter for advancing residential water demand modeling and management: A review**. Environmental Modelling & Software, ISSN: 1873-6726, v.72, p. 198-214, 2015.
- [6] COSTA, Marcelo Pires da; ZOBY, José Luiz Gomes. (Coords.) **Panorama do enquadramento dos corpos d'água do Brasil [e] Panorama da qualidade das águas subterrâneas no Brasil**. Brasília: ANA, Cadernos de recursos hídricos, 5, ISBN 9788589629294, 123 p., 2007. Disponível em: <http://biblioteca.ana.gov.br/index.asp?codigo_sophia=63346> Acesso em: 18 Set. 2019.
- [7] FACCO, Janete. **Os Usos e a Qualidade das Águas do Sistema Aquífero Integrado Guarani/Serra Geral – SAIG/SG no município de Chapecó-SC**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Florianópolis, 314 p., 2018.
- [8] FERNANDES, Luís Filipe Sanches; CARDOSO, Leila Vanessa Rodrigues Queirós; PACHECO, Fernando António Leal; LEITÃO, Sérgio; MOURA, Joao Paulo. **DRASTIC and GOD vulnerability maps of the Cabril River Basin, Portugal**. Rem: Revista Escola de Minas, ISSN 1807-0353, v. 67, p. 133-142, 2014.

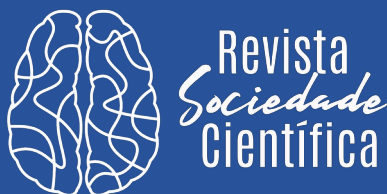


- [9] FOSTER, Stephen; HIRATA, Ricardo; ROCHA, Gerônimo Albuquerque. **Riscos de Poluição de Águas Subterrâneas: uma proposta metodológica de avaliação regional**. Águas Subterrâneas, ISSN 2179-9784, p. 175-185, 1988.
- [10] FOSTER, Stephen; HIRATA, Ricardo; GOMES, Daniel; D'ELIA, Mônica; PARIS, Marta. **Proteção da qualidade da água subterrânea: um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências ambientais**. São Paulo: Edição brasileira: Servmar – Serviços Técnicos Ambientais Ltda. Banco Mundial, ISBN 0-8213-4951, 114 p., 2006.
- [11] FOSTER, Stephen; HIRATA, Ricardo; GOMES, Daniel; D'ELIA, Mônica; PARIS, Marta. **Groundwater Quality Protection: a guide for water utilities, municipal authorities and environment agencies**. The World Bank: Washington, D.C., ISBN 0-8213-4951-1, 114 p., 2002.
- [12] GONDIM, Joaquim; MARANHÃO, Ney; COIMBRA, Márcia Regina Silva Cerqueira; TRÖGER, Flávio Hadler; FIOREZE, Ana Paula; AMORIM, Brandina de. **Os efeitos das Mudanças Climáticas sobre os recursos hídricos: desafios para a gestão**. Grupo de Trabalho sobre Mudanças Climáticas (Portaria ANA nº 36, 26/01/2010). Agência Nacional de Águas (ANA), 20 p., 2010.
- [13] GALLOPÍN, Gilberto C. **Linkages between vulnerability, resilience, and adaptive capacity**. Global environmental change, ISSN 1872-9495, v. 16, n. 3, p. 293-303, 2006.
- [14] HUANG, Lu; ZENG, Guangming; LIANG, Jie; HUA, Shanshan; YUAN, Yujie; LI, Xiaodong; DONG, Haoran; LIU, Jiayu; NIE, Shuang; LIU, Junfeng. **Combined impacts of land use and climate change in the modeling of future groundwater vulnerability**. Journal of Hydrogeological Engineering, ISSN 1943-5584, 22(7), 11 p., 2017.



Publicado em 10 de agosto de 2023
REVISTA SOCIEDADE CIENTÍFICA, VOLUME 6, NÚMERO 1, ANO 2023

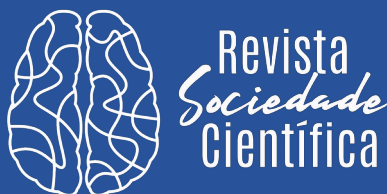
- [15] IPCC. **Climate Change 2007: Synthesis Report**. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, ISBN 92-9169-122-4, 104 p., 2007.
- [16] KUNDZEWICZ, Zbigniew W. e DÖLL, Petra. **Will groundwater ease freshwater stress under climate change?** Hydrological Sciences Journal, ISSN 2626667, 54:4, p. 665-675, 2009.
- [17] LI, Roupu; MERCHANT, James W. **Modeling vulnerability of groundwater to pollution under future scenarios of climate change and biofuels-related land use change: a case study in North Dakota, USA**. Elsevier: Science of the total environment, ISSN: 1879-1026, p. 32-45, 2013.
- [18] LOPES, Andréa Regina de Britto Costa. **Recursos hídricos e uso da terra na bacia do Rio do Peixe/SC, mapeamento das áreas de vulnerabilidade e risco de contaminação do Sistema Aquífero Serra Geral**. 317 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Filosofia e Ciências Humanas. Programa de Pós-Graduação em Geografia. 2012.
- [19] LOPES, A. R. DE B. C.; SCHEIBE, L. F. **Vulnerabilidade e risco de contaminação das águas do Sistema Aquífero Serra Geral na Bacia do Rio do Peixe/SC**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, ISSN 2318-0331, v. 30, n. 3, p. 560-570, 2015.
- [20] MYERS, B., FISHER, R., PAUL, T., WURM. P., CAMPBELL, A. **The vulnerability of groundwater resources to climate change in Timor-Lest**. Prepared by Research Institute for the Environment and Livelihoods. Charles Darwin University for the Australian Government, Department of Climate Change and Energy Efficiency, Canberra. 74 p., 2011. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/273767119_The_Vulnerability_of_Groundwater_Resources_to_Climate_Change_in_Timor-Leste



Publicado em 10 de agosto de 2023

REVISTA SOCIEDADE CIENTÍFICA, VOLUME 6, NÚMERO 1, ANO 2023

- [21] NISTOR, Margarit-Mircea. **Groundwater vulnerability in Europe under climate change**. Elsevier: Quaternary International, ISSN 1040-6182, p. 12, Abr., 2019.
- [22] NISTOR, Margarit-Mircea; DEZSI, Stefan; CHEVAL, Sorin; BACIU, Madalina. **Climate change effects on groundwater resources: a new assessment method through climate indices and effective precipitation in Belis district, Western Carpathins**. Meteorological Applications, ISSN 1469-8080, 23:554-561, 2016.
- [23] PEIXOTO, Filipe da Silva; CAVALCANTE, Itabaraci Nazareno. **Vulnerabilidade aquífera e risco de contaminação da água subterrânea em meio urbano**. São Paulo, Geologia USP, Série Científica, ISSN 2316-9095, v. 19, n. 2, p. 29-40, Jun. 2019.
- [24] PETTENGELL, Catherine. **Climate Change Adaptation: Enabling people living in poverty to adapt**. Oxfam Research Report, p. 48, 2010.
- [25] REDE GUARANI/SERRA GERAL (RGSG). **Blocos hidrogeológicos, vulnerabilidade natural e risco à contaminação do Sistema Aquífero Integrado Guarani/Serra Geral em Santa Catarina**. Laboratório de Análise Ambiental e Laboratório de Hidrogeologia da UFSC. Nota Técnica. 2020. 155p. il. mapas. Disponível em: <<https://hidrogeologia.ufsc.br/saigsg/>>.
- [26] RIBEIRO, Daniela Menezes; ROCHA, Washington Franca, GARCIA, Antonio Jorge Vasconcellos. **Vulnerabilidade natural à contaminação dos aquíferos da subbacia do rio Siriri, Sergipe**. Águas Subterrâneas, ISSN 2179-9784, v.25, n.1, p.91-102, 2011.
- [27] SCHMITZ, Arno; BITTENCOURT, Mauricio V. L. **Crescimento econômico e pressão sobre recursos hídricos**. São Paulo: Estudos Econômicos, ISSN 1980-5357, v. 47, n. 2, 2017.



- [28] SENER, E.; DAVRAZ, A. **Assessment of groundwater vulnerability based on a modified DRASTIC model, GIS and an analytic hierarchy process (AHP) method: the case of Egirdir Lake basin (Isparta, Turkey)**. Hydrogeology Journal, ISSN 1435-0157, v. 21, p. 701-714, 2013.
- [29] THIRUMALAIVASAN, D.; KARMEGAM, M.; VENUGOPAL, K. **AHP-DRASTIC: software for specific aquifer vulnerability assessment using DRASTIC model and GIS**. Environmental Modelling & Software, ISSN 1873-6726, v. 18, n. 7, p. 645-656, 2003.
- [30] TORCELLINI, Paul; LONG, Nicholas; JUDKOFF, Ron. **Consumptive water use for US power production**. National Renewable Energy Lab., Golden, CO (US), 2003. Disponível em: <https://www.osti.gov/servlets/purl/15005918>.
- [31] TURRAL, Hugh; BURKE, Jacob; FAURÈS, Jean-Marc. **Climate Change, Water and Food Security**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations – FAO, ISSN 1020-1203, 200 p., 2011.
- [32] VIEIRA, Valter Afonso. **Meta-Análise: metodologia, pesquisa e análise de dados**. Florianópolis: Ed. da UFSC, ISBN 9786558050070, 111p., 2017.
- [33] WRATHALL, David J.; HOEK, Jamon Van Den; WALTERS, Alex; DEVENISH, Alan. **Water stress and human migration: a global, georeferenced review of empirical research**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Global water paternship, ISSN 1729-0554, 27 p., 2018.
- [34] YANG, Jin; CHEN, Bin. **Energy–water nexus of wind power generation systems**. Applied Energy, ISSN 1872-9118, v. 169, p. 1-13, 2016.