

ESTUDO DA VULNERABILIDADE À CONTAMINAÇÃO DE UM SISTEMA AQUÍFERO CRISTALINO NO MUNICÍPIO DE VÁRZEA ALEGRE-CE

STUDY OF THE VULNERABILITY TO CONTAMINATION OF A CRYSTALLINE AQUIFER SYSTEM IN THE MUNICIPALITY OF VÁRZEA ALEGRE-CE

ESTUDIO DE LA VULNERABILIDAD A LA CONTAMINACIÓN DE UN SISTEMA ACUÍFERO CRISTALINO EN EL MUNICIPIO DE VÁRZEA ALEGRE-CE

José Laécio de Moraes¹
Sandra Regina da Silva Galvão²
José Vinícius Leite Lima³
Adriana de Carvalho Figueiredo Rodrigues⁴
Celme Torres Ferreira da Costa⁵
Christianne Farias da Fonseca⁶
Francisco Evanildo Simão da Silva⁷
Wyldevânio Vieira da Silva⁸

RESUMO: Ao longo da história da humanidade, a água tem sido considerada a base para fixação de civilizações no território, fonte para manutenção de vida e matéria-prima para diversas atividades, local de abrigo e reprodução de diversas espécies de seres vivos, motivo de conflitos, moeda de uso e troca, via de transporte, dentre tantos outros usos. O presente trabalho trata de um estudo de caso que objetiva analisar vulnerabilidade à contaminação de um sistema aquífero cristalino no município de Várzea Alegre, no Estado do Ceará. Por meio de visita de campo, avaliação de impactos ambientais e aplicação de metodologia GOD, analisou a vulnerabilidade natural do aquífero a partir do estudo de área de nascentes localizadas no Sítio Riacho Verde, na zona rural de Várzea Alegre. Quanto aos usos da água das nascentes, foi preponderante o uso ecológico para manutenção das espécies do habitat na área. Em relação aos impactos ambientais nas nascentes foram identificados: ausência ou degradação da vegetação na área de preservação permanente (APP); desmatamento e queimadas nas áreas de recarga; ausência de proteção e fácil acesso às nascentes; e alteração na coloração e odor na água. O grau de preservação variou de péssimo a razoável. Já em relação à vulnerabilidade à contaminação do aquífero presente na área das nascentes foi insignificante ou desprezível, a potencialidade da carga contaminante é reduzida ou inexistente, sendo identificado Grau I de risco à

¹ Doutor em Geografia - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sertão Pernambucano (IFSertãoPE).

² Doutora em Tecnologias Energéticas e Nucleares - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sertão Pernambucano (IFSertãoPE).

³ Doutor em Ecologia e Recursos Naturais - Universidade Regional do Cariri (URCA).

⁴ Doutora em Engenharia Agrícola - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sertão Pernambucano (IFSertãoPE).

⁵ Doutora em Engenharia Civil (Recursos Hídricos) - Universidade Federal do Cariri (UFCA).

⁶ Doutora em Geografia - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sertão Pernambucano (IFSertãoPE).

⁷ Doutor em Agroecologia e Desenvolvimento Territorial - Universidade do Estado da Bahia (UNEB).

⁸ Mestre em Desenvolvimento Regional Sustentável - Universidade Federal do Cariri (UFCA).

contaminação da água subterrânea dentro da classificação de Foster (2003). A fim de mitigar os impactos identificados nas nascentes, recomendou-se a limpeza e manutenção das áreas de afloramento de água, cercamento de todo o raio da APP e reflorestamento da mesma com espécies nativas; recuperação das áreas degradadas na área de recarga do sistema aquífero e controle do uso das áreas a fim de evitar impactos futuros.

Palavras-chave: Águas subterrâneas. Olho d'água. Gestão de recursos hídricos. Área de preservação permanente.

ABSTRACT: Throughout the history of humanity, water has been considered the basis for the establishment of civilizations in the territory, a source for the maintenance of life and raw material for various activities, a place of shelter and reproduction for various species of living beings, a reason for conflicts, a currency for use and exchange, among many other aspects. This paper deals with a case study that aims to analyze the vulnerability to contamination of a crystalline aquifer system in the municipality of Várzea Alegre, in the State of Ceará. Through a field visit, environmental impact assessment and application of the GOD methodology, the natural vulnerability of the aquifer was assessed based on the analysis of the area of the springs located in Sitio Riacho Verde, in the rural area of the Várzea Alegre. Regarding the uses of water from the springs, the ecological use for the maintenance of the species of the habitat present in the area was predominant. Regarding the environmental impacts present in the springs, the following were identified: absence or degradation of vegetation in the permanent preservation area (APP); deforestation and burning in the recharge areas of the springs; lack of protection and easy access to the springs; and changes in the color and odor of the water. The degree of preservation varied from poor to reasonable. Regarding vulnerability, the contamination of the aquifer in the spring area was insignificant or negligible, the potential for contaminant load was reduced or non-existent, and the risk of groundwater contamination was Grade I according to the Foster (2003) classification. In order to mitigate the impacts identified in the springs, it was recommended to clean and maintain the water outcrop areas, fence the entire radius of the APP and reforest it with native species; recover degraded areas in the aquifer system recharge area and control the use of the areas in order to avoid future impacts.

Keywords: Groundwater. Water source. Water resources management. Permanent preservation area.

RESUMEN: A lo largo de la historia de la humanidad, el agua ha sido considerada la base para la fijación de civilizaciones en el territorio, fuente para el mantenimiento de la vida y materia prima para diversas actividades, lugar de refugio y reproducción de diversas especies de seres vivos, motivo de conflictos, moneda de uso e intercambio, vía de transporte, entre tantos otros usos. El presente trabajo trata de un estudio de caso que tiene como objetivo analizar la vulnerabilidad a la contaminación de un sistema acuífero cristalino en el municipio de Várzea Alegre, en el Estado de Ceará. A través de visita de campo, evaluación de impactos ambientales y aplicación de la metodología GOD, se analizó la vulnerabilidad natural del acuífero a partir del estudio del área de nacientes ubicadas en el Sitio Riacho Verde, en la zona rural de Várzea Alegre. En cuanto a los usos del agua de los manantiales, fue predominante el uso ecológico para el mantenimiento de las especies del hábitat en el área. En relación con los impactos ambientales en los manantiales se identificaron: ausencia o degradación de la vegetación en el

área de preservación permanente (APP); deforestación y quemas en las áreas de recarga; ausencia de protección y fácil acceso a los manantiales; y alteración en la coloración y olor del agua. El grado de preservación varió de pésimo a razonable. En cuanto a la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero presente en el área de los manantiales fue insignificante o despreciable, la potencialidad de la carga contaminante es reducida o inexistente, siendo identificado el Grado I de riesgo de contaminación del agua subterránea dentro de la clasificación de Foster (2003). Con el fin de mitigar los impactos identificados en los manantiales, se recomendó la limpieza y mantenimiento de las áreas de afloramiento de agua, el cercado de todo el radio de la APP y la reforestación de la misma con especies nativas; recuperación de las áreas degradadas en la zona de recarga del sistema acuífero y control del uso de las áreas con el fin de evitar impactos futuros.

Palabras clave: Aguas subterráneas. Manantial. Gestión de recursos hídricos. Área de preservación permanente.

I. INTRODUÇÃO

As mudanças ocasionadas pelas ações humanas, em decorrência do desenvolvimento socioeconômico, têm se intensificado, fazendo com que especialistas ofereçam evidências de que as transformações provocadas pela atuação dos seres humanos demonstram ser tão intensas, que já produzem marcas indeléveis nos registros geológicos do planeta, uma vez que modificam o ritmo de alteração de rochas que terminam acumulando sedimentos das mais variadas formas, entre outras, resíduos sólidos depositados em diferentes partes do planeta, de forma mais rápida do que ocorreria naturalmente. Tais alterações estimulam pesquisadores a proporem o reconhecimento oficial de uma nova época geológica, o Antropoceno, marcada pelos impactos gerados pelos seres humanos na natureza (ZALASIEWICZ, 2016).

O desenvolvimento socioeconômico e cultural da sociedade contemporânea e, conseqüentemente o expressivo crescimento de áreas urbanas e do consumo *per capita* de bens e serviços, como resultado do acelerado crescimento econômico, usufruído nos últimos anos, têm gerado uma série de problemas ambientais, afetando recursos naturais de extrema importância para sobrevivência humana no planeta Terra, entre eles, a água tem se tornado um recurso cada vez mais vulnerável e ameaçado, carecendo de ações estratégicas para sua conservação e uso eficiente.

Dentre os elementos do meio físico, a água é considerada o princípio e fim das coisas, principal elemento que constitui o corpo humano, sustentáculo das civilizações, importante componente para produção de alimento, matéria-prima de muitos produtos, local de abrigo de

diversas espécies de seres vivos, testemunha de duelos históricos, via de transporte entre diversas regiões do globo, moeda de uso e troca, dentre tantos outros aspectos.

A água subterrânea é responsável pela maioria (97,6%) da água doce disponível na Terra, com lagos e reservatórios, umidade do solo, umidade nas plantas, a atmosfera e rios e riachos sendo responsáveis por menos de 3% da água doce disponível no planeta (USGS, 2016).

A água subterrânea tem o movimento lento em relação à superficial, o fluxo evidentemente laminar e o elevado tempo de residência, o que significa baixas taxas de recarga anual. Elas podem estar presentes em aquíferos confinados ou não, sendo que esses são constituídos por rochas com suficiente permeabilidade e porosidade interconectada para armazenar e transmitir quantidades significantes de água, sob gradientes hidráulicos naturais (CLEARY, 2007).

A contaminação dos recursos hídricos tem sido uma das preocupações presentes no debate sobre a água, agravando-se essa preocupação devido a característica dessa contaminação ser difusa, com diferentes origens, tais como: os lixões; aterros mal operados; acidentes com substâncias tóxicas; atividades inadequadas de armazenamento, manuseio e descarte de matérias primas, produtos, efluentes e resíduos em atividades industriais, como indústrias químicas, petroquímicas, metalúrgicas, eletroeletrônicas, alimentícias, galvanoplastias, curtume, etc.; atividades minerárias que expõem o aquífero; sistemas de saneamento “in situ”; vazamento das redes coletoras de esgoto; o uso incorreto de agrotóxicos e fertilizantes; bem como a irrigação que pode provocar problemas de salinização ou aumentar a lixiviação de contaminantes para a água subterrânea; e outras fontes dispersas de poluição (CETESB, 2023).

O elevado potencial de contaminação das águas subterrâneas atrelado ao uso desordenado do solo e ao número reduzido de técnicas eficientes de remediação demandam um elevado dispêndio de recursos financeiros e humanos para a recuperação da qualidade desse bem, o que de modo geral é atingido ao final de vários anos, fato que nos indica a necessidade de tomar medidas preventivas para sua proteção, devendo essas serem associadas ao controle da poluição como um todo, definindo-se critérios de qualidade e compreendendo o grau de vulnerabilidade desses recursos, sendo esse o principal cerne desta pesquisa.

A qualidade da água subterrânea é geralmente muito menos vulnerável à contaminação direta do que a água superficial. No entanto, a água subterrânea pode ter décadas a milhares de

anos e, portanto, para garantir uma utilização sustentável, a gestão dos recursos hídricos subterrâneos é vital e o risco de contaminação por atividades poluentes que escoam efluentes para os aquíferos é uma ameaça de longo prazo ao abastecimento de água.

A água é essencial para a vida e para o desenvolvimento sustentável, e recursos hídricos bem administrados contribuem para a redução da pobreza, o crescimento econômico e a sustentabilidade ambiental. O aumento da população humana, os impactos das mudanças climáticas e o crescimento insustentável pressionam a demanda, a qualidade e a disponibilidade de água.

De acordo com UN-Water (2013), a segurança da água é definida como a capacidade de uma população de salvaguardar o acesso sustentável a quantidades adequadas de água de qualidade aceitável para sustentar a subsistência, o bem-estar humano e o desenvolvimento socioeconômico, para garantir a proteção contra poluição de origem hídrica e desastres relacionados com a água, e para a preservação de ecossistemas em um clima de paz e estabilidade política.

A segurança hídrica é crítica porque é a base do desenvolvimento sustentável, bem-estar pessoal e infraestrutura política, social e financeira. Portanto, isso se traduz diretamente em segurança para a sobrevivência humana. A colaboração entre setores, comunidades, governos e escola é necessária para evitar conflitos potenciais por um recurso vital.

A fácil disponibilidade de água e a proximidade de uma fonte de água geralmente se correlacionam com maior consumo e situação econômica. Por outro lado, existem comunidades que enfrentam recorrentes dificuldades de acesso à água.

Existem dois tipos de escassez que afetam a quantidade e a qualidade da água: escassez física e escassez econômica. A escassez física é a falta de água suficiente em uma área para atender às demandas. A escassez econômica surge quando uma fonte confiável e segura de água está disponível, mas requer recursos humanos ou financeiros para explorá-la (UNITED NATIONS, 2010). À medida que a demanda por água aumenta em regiões com escassez de água, há maior pressão sobre os recursos limitados, aumentando os custos para fornecê-la.

A população humana mundial, em 2019 era de 7,7 bilhões e deve aumentar para 9,7 bilhões em 2050 (UNITED NATIONS, 2019). Este considerável crescimento da população terá um impacto em muitas áreas de desenvolvimento, uma vez que esses novos membros da

comunidade humana necessitarão de alimentos e energia, bem como de bens manufaturados que requerem água. Além disso, as pessoas precisarão de água para fins domésticos, como beber, cozinhar e tomar banho. O aumento da demanda de água atualmente resulta em superexploração insustentável de recursos de água doce superficial e subterrânea e, portanto, são necessárias soluções para evitar a “próxima grande crise global” (MCKIE, 2015).

Neves et al. (2017) alertam que como consequência da escassez hídrica que aflige a humanidade nas últimas décadas, a utilização de águas subterrâneas se tornou uma alternativa em todo o mundo, estimando-se a perfuração de mais de 300 milhões de poços nos últimos 30 anos em todos os continentes, sendo no Brasil, as águas subterrâneas responsáveis por cerca de 50% do abastecimento de água potável.

Quando tratamos de populações rurais difusas, o abastecimento também é por vezes realizado a partir de águas subterrâneas e as nascentes desempenham essencial papel no atendimento às demandas de água dessas populações, implicando na necessidade de valorização dos serviços ambientais prestados pelas nascentes (Braga e Silva, 2009).

Para além do abastecimento humano, as nascentes têm desempenhado papéis ecológicos, culturais e socioeconômicos importantes e interativos em ambientes áridos. No entanto, as nascentes também são amplamente ameaçadas pelos impactos humanos, tais como: desvio de fluxo, alteração geomórfica, práticas de uso do solo inadequadas, supressão de vegetação em áreas de preservação permanente (APP), introdução de espécies exóticas, dentre outros. Esses impactos afetam negativamente a sustentabilidade dos ecossistemas de nascentes e dos aquíferos que os sustentam.

Salafsky et al. (2008) defendem que apesar da generalizada deficiência geográfica e de avaliação de dados sobre nascentes, várias categorias de ameaças foram mencionadas repetidamente, dentre elas: a utilização agrícola, particularmente a irrigação do gado; captação/desvio para abastecimento potável; esgotamento das águas subterrâneas; poluição das águas subterrâneas; e uso recreativo.

Consideramos que a relevância desta pesquisa reside, primeiramente, em conhecer a vulnerabilidade à contaminação de um sistema aquífero cristalino no município de Várzea Alegre-CE, uma vez que estudos nesse sentido são escassos na área. Assim, tornou-se possível propor ações efetivas, a fim de modificar a situação atual da gestão dos recursos hídricos na região, de forma a contribuir na implantação de um planejamento, gestão e monitoramento

efetivo e viável destes recursos, de forma eficiente, uma vez que o cenário geral é de precariedade nas informações no tocante à vulnerabilidade deste recurso natural.

A percepção da sociedade sobre a existência desse recurso e de sua importância econômica e ambiental é deficiente mesmo nos municípios ou setores econômicos onde essas águas constituem a principal fonte hídrica.

A seleção do Sítio Riacho Verde, no Município de Várzea Alegre para o estudo, se deu porque possuímos um bom conhecimento de sua realidade físico/natural e socioeconômica, sendo essa comunidade localizada nas proximidades do Riacho do Machado, na porção a montante do Açude Olho D'Água, principal fonte de captação de água para abastecimento humano do município de Várzea Alegre.

Compreendendo os complexos problemas locais, e sabendo das suas precariedades, definimos como objetivo geral analisar a vulnerabilidade à contaminação de um sistema aquífero cristalino no município de Várzea Alegre-CE. Para possibilitar o alcance do objetivo geral, delimitamos os seguintes objetivos específicos:

- a) Avaliar os impactos ambientais que afetam as nascentes na área de estudo;
- b) Identificar as classes de vulnerabilidade natural nas nascentes a partir do índice de GOD;
- c) Propor ações de intervenção para preservação e melhoria da qualidade das nascentes estudadas.

2. METODOLOGIA

Área do Estudo

O estudo foi realizado na comunidade Sítio Riacho Verde, localizada na Zona Rural do município de Várzea Alegre, localizado na Região de Planejamento Cariri, estado do Ceará.

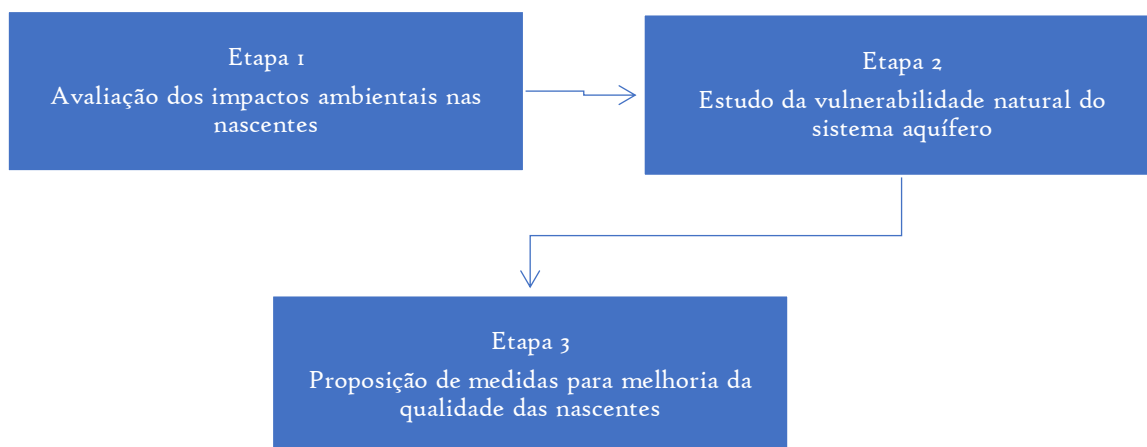
O município encontra-se inserido na Sub-Bacia Hidrográfica do Rio Salgado, com relevo classificado em Serras Secas e Sertões (IPECE, 2018). Apresenta clima tropical quente semiárido e tropical quente semiárido brando. A temperatura tem variação de 26° a 28°C e precipitação de 965,3 mm. A vegetação nativa é Caatinga Arbustiva Aberta, Caatinga Arbustiva Densa, Cerrado e Floresta Caducifolia Espinhosa (Caatinga Arbórea). Os solos encontrados são Argissolos, Neossolos e Nitossolos (IPECE, 2018).

Procedimentos metodológicos

O presente trabalho trata-se de um estudo de caso relacionado ao estudo da vulnerabilidade à contaminação de um aquífero cristalino a partir de nascentes do Sítio Riacho Verde, no município de Várzea Alegre-CE. Na visão de Goode e Hatt (1975), o estudo de caso consente em investigar, em profundidade, o desenvolvimento, as características e demais aspectos constitutivos de qualquer unidade social: um indivíduo; um núcleo familiar; uma escola; um grupo social; uma empresa pública ou particular, etc., permitindo que sejam organizados os dados de caráter social do objeto de estudo, preservando sua natureza e caráter.

Como parte dos procedimentos metodológicos a serem aplicados, seguiremos a abordagem realizada por Brito *et al.* (2021) e são baseados na caracterização do uso da água; Avaliação de Impactos Ambientais (AIA) nas nascentes; vulnerabilidade natural e risco de contaminação do sistema aquífero. Os procedimentos adotados estão sumarizados no fluxograma metodológico (Figura 1) apresentado abaixo.

Figura 1. Procedimentos metodológicos aplicados na pesquisa.



Para a análise situacional do recurso hídrico subterrâneo, diagnosticou-se a existência de cinco nascentes na área de estudo (Figura 2), sendo essas os pontos utilizados para avaliação de vulnerabilidade nesse estudo.

Para o levantamento de informações e mapeamento da área, foram percorridos esses locais com auxílio de um técnico da Secretaria de Meio Ambiente do município de Várzea Alegre que conhece a região de estudo e a localização das nascentes. O mapeamento das

nascentes foi realizado com auxílio do equipamento Sistema de Posicionamento Global (GPS).

Figura 2. Mapa de localização das nascentes do Sítio Riacho Verde, Várzea Alegre-CE.



A classificação do uso da água subterrânea na área de estudo foi realizada a partir de visita de campo na área entre os meses de setembro e outubro de 2024 (período seco).

A Avaliação dos Impactos Ambientais (AIA) nas nascentes foi analisada segundo a metodologia de Oliveira (2005) *apud* Brito et al. (2021). Esse método avalia parâmetros macroscópicos na água das nascentes e em seus arredores, cujo o objetivo é identificar as fontes de contaminação da água e ações que promovem a degradação do recurso (Tabela 1). Para tanto, analisamos em campo as cinco nascentes a partir da tabela de avaliação identificou-se a qualificação de cada parâmetro observado, conforme as especificações de cada nascente.

Tabela 1. Parâmetros de determinação do índice de impacto ambiental em nascentes.

Parâmetros Macroscópicos	Qualificação		
	Ruim (1)	Intermediário (2)	Bom (3)
Coloração da água	Escura	Clara	Transparente
Odor da água	Forte	Fraco	Não apresenta
Resíduos sólidos ao redor da nascente	Muito*	Pouco*	Não apresenta
Materiais flutuantes (Resíduos na água)	Muito	Pouco	Não apresenta

Espumas	Muito	Pouco	Não apresenta
Despejo de efluentes	Visível	Provável	Não apresenta
Vegetação	Bastante degradada ou inexistente	Pequena alteração	Preservada
Uso antrópico (desmatamento e queimadas)	Constante	Apenas marcas	Não apresenta
Acesso	Fácil	Difícil	Não apresenta
Proteção da nascente	Sem proteção	Proteção frágil	Proteção resistente
Instalações urbanas	A menos de 50 m	Entre 50 a 100 m	Superior a 100 m

* Muito: mais da metade do espalho d'água; *Pouco: menos da metade do espalho d'água.

Fonte: Adaptado de Oliveira (2005) *apud* Brito et al. (2021).

Após identificar a qualificação dos parâmetros, realizou-se um somatório para cada nascente, para que assim pudesse adequá-la no grau de preservação correspondente, conforme classificação apresentada na Tabela 2. O grau de preservação varia numa escala de ótimo a péssimo. O ótimo consiste no nível máximo de preservação, cuja a nascente apresenta vegetação nativa preservada, não há atividades antrópicas nas proximidades que possam causar alguma poluição e degradação, a água apresenta características macroscópicas visualmente conservadas (sem resíduos sólidos, espumas, óleos, odores desagradáveis), com difícil acesso e bastante protegida.

10

Tabela 2. Classificação do grau de preservação das nascentes.

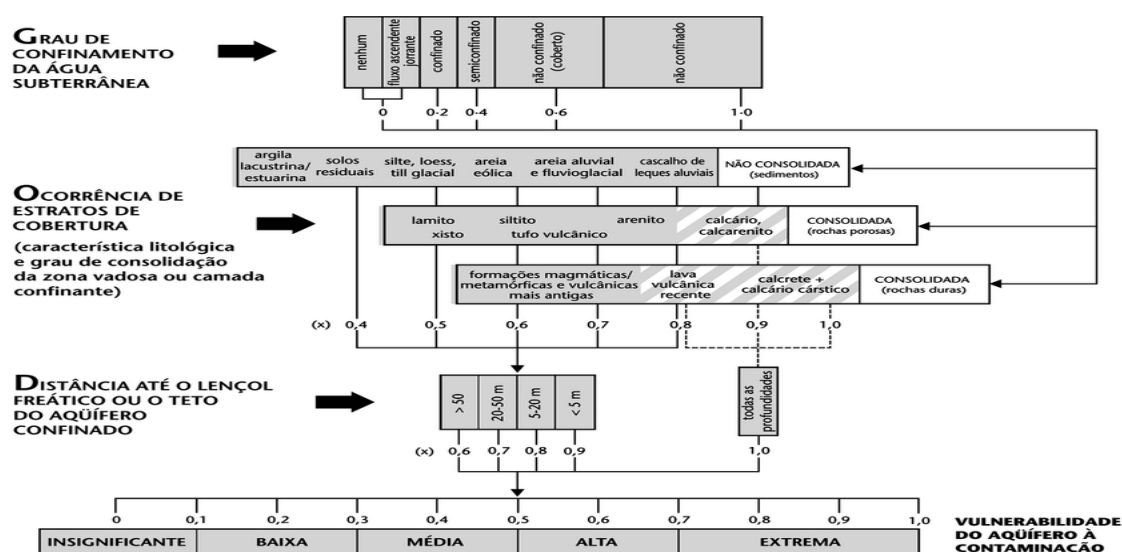
Classificação da nascente	Grau de preservação	Escala
A	Ótimo	31-33
B	Bom	28-30
C	Razoável	25-27
D	Ruim	22-24
E	Péssimo	Igual ou inferior a 21

Fonte: Adaptado de Oliveira (2005) *apud* Brito et al. (2021).

O estudo da vulnerabilidade natural do aquífero foi determinado segundo Foster et al. (2003). O índice GOD considera variáveis quanto ao grau de confinamento, características

litológicas e profundidade da água subterrânea (Figura 3). O índice GOD segundo Foster e Hirata (1988) é constituído por três variáveis G, O e D, e é utilizado para estimar a vulnerabilidade natural de aquíferos à contaminação. O índice G (*Groundwater hydraulic confinement*) representa o Grau de confinamento da água subterrânea e em escala varia de 0,0 a 1,0. O índice O (*Overlaying strata*) representa a ocorrência de estratos de cobertura (litologia) e tem variação de 0,4 a 1,0. O índice D (*Depth to groundwater table*) representa a distância do lençol freático até a superfície, com variação de 0,6 a 1,0.

Figura 3. Método de avaliação da vulnerabilidade natural, índice GOD.



Fonte: Foster et al. (2003).

Os parâmetros apresentam o mesmo peso com valores variantes de 0 a 1. Para estimar o índice de vulnerabilidade os valores dos parâmetros (G, O e D) encontrados, são multiplicados entre si e comparados na escala de vulnerabilidade apresentada pelos autores. O valor final obtido é comparado com as faixas que variam de 0 a 1 (Tabela 3), e classificam o aquífero desde a vulnerabilidade desprezível até extrema. Desse modo, os valores mais próximos de 0 corresponde aos menores índices de vulnerabilidade, já valores mais próximos de 1 corresponde aos maiores índices de vulnerabilidade.

Tabela 3 - Classes de significância de vulnerabilidade do aquífero.

Intervalo	Classe	Características
0 – 0,1	Desprezível	Desconsidera as camadas confinantes com fluxos verticais descendentes não significativos.
0,1 – 0,3	Baixo	Vulnerável aos contaminantes conservativos em longo prazo, quando continuamente e amplamente lançados.
0,3 – 0,5	Médio	Vulnerável a alguns poluentes, mas somente quando continuamente lançados.
0,5 – 0,7	Alto	Vulnerável a muitos poluentes, exceto aqueles pouco móveis e pouco persistentes.
0,7 – 1,0	Extremo	Vulnerável a muitos poluentes, com rápido impacto em muitos cenários de contaminação.

Fonte: Modificada de Foster (2003).

O estudo de risco à contaminação da água foi determinado segundo Foster e Hirata (1988). A metodologia realiza o cruzamento entre a vulnerabilidade natural do aquífero com a potencialidade da carga contaminante (Figura 4). Assim, em escala, determina o grau de risco de uma determinada fonte de poluição afetar o aquífero.

Figura 4. Classificação do risco à contaminação da água subterrânea.

		Vulnerabilidade do aquífero			
		Desprezível	Baixo	Médio	Alto
Potencialidade da carga contaminante	Reduzida ou inexistente	I			
	Moderada		II	III	
	Elevada				IV

Fonte: Adaptado de Foster e Hirata (1988).

A tabela 4 sumariza as restrições de uso da água e os cuidados necessários com base em cada zona de risco identificada com o método.

Tabela 4. Categorias de riscos à contaminação de acordo com o cruzamento da vulnerabilidade natural do aquífero com a potencialidade da carga contaminante.

Zona de risco	Frequência de aparição do risco	Cuidados para uso da água
I	Pequena proporção	Necessário conhecer os dados de contaminação próximo ao ponto de captação da água (raio de 100m)
II	Média proporção	Restrição para alguns usos
III	Alta proporção	Necessária investigação da qualidade da água
IV	Elevada proporção	Necessário evitar o consumo da água

Fonte: Adaptado de Foster e Hirata (1988).

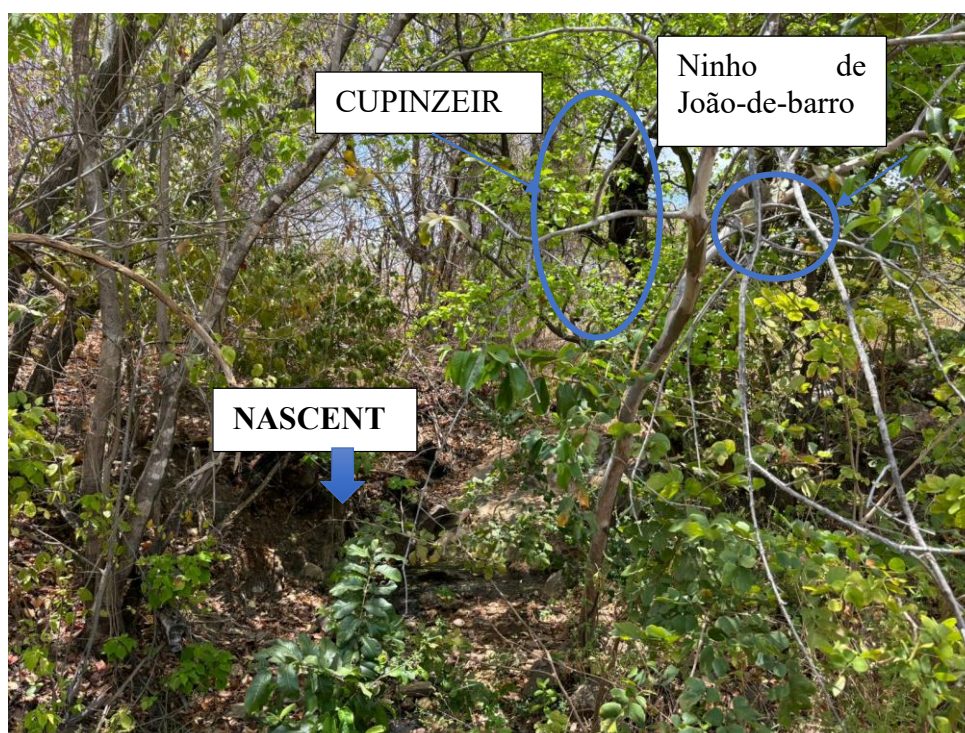
Para a proposição de ações de intervenção optou-se pela consulta bibliográfica de trabalhos relacionados a nascentes em regiões semiáridas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Classificação do uso da água subterrânea

A etapa de coleta de dados em campo, permitiu a identificação dos tipos de uso das águas subterrâneas das nascentes na área de estudo, sendo identificado o uso para fins ecológicos, especialmente para manutenção de micro-habitats existentes em cada nascente, fato que destaca sua importância ecológica, sobretudo numa área com escassez de água, como é o caso das regiões semiáridas (Figura 5). Não foram observados usos relacionados a abastecimento humano, irrigação ou descarte de efluentes.

Figura 5. Nascente N5 (Coordenadas 457219mE/ 92393589mS) com detalhe de micro-habitat, destacando-se pela presença de vegetação de porte arbóreo/arbustivo e de cupins e ninhos de aves.



Stevens et al. (2021) compilaram relatórios sobre mais de 250.000 nascentes de 78 países, em todos os continentes, exceto na Antártica, e concluíram que existem micro-habitats dentro das nascentes e esses podem suportar assembleias distintas, contribuindo coletivamente para a diversidade geomórfica intrínseca do ecossistema e para a elevada biodiversidade, sugerindo que, apesar da sua área limitada, as nascentes são frequentemente pontos importantes e ecologicamente interativos de diversidade biótica e sociocultural, e contribuem para a integridade ecológica regional, uma vez que são “ecossistemas fundamentais”, com considerável complexidade de troca de subsídios tróficos.

14

Avaliação dos Impactos Ambientais (AIA) nas nascentes

A partir da aplicação dos parâmetros macroscópicos da água de cada uma das nascentes foi possível determinar o índice de impacto ambiental dessas, conforme apresentado na Tabela 5.

Tabela 5. Parâmetros de avaliação e índice de impacto ambiental em nascentes do Sítio Riacho Verde, Várzea Alegre-CE.

Nascente/ Parâmetro	N1	N2	N3	N4	N5

Coloração da água	Escura (1)	Clara (2)	Clara (2)	Clara (2)	Clara (2)
Odor da água	Fraco (2)	Fraco (2)	Não apresenta (3)	Não apresenta (3)	Não apresenta (3)
Resíduos sólidos ao redor da nascente	Não apresenta (3)	Não apresenta (3)	Não apresenta (3)	Não apresenta (3)	Não apresenta (3)
Materiais flutuantes	Não apresenta (3)	Não apresenta (3)	Não apresenta (3)	Não apresenta (3)	Não apresenta (3)
Espuma	Pouco (2)	Pouco (2)	Pouco (2)	Pouco (2)	Não apresenta (3)
Despejo de efluentes	Não apresenta (3)	Não apresenta (3)	Não apresenta (3)	Não apresenta (3)	Não apresenta (3)
Vegetação	Bastante degradada ou inexistente (1)	Bastante degradada ou inexistente (1)	Bastante degradada ou inexistente (1)	Bastante degradada ou inexistente (1)	Bastante degradada ou inexistente (1)
Uso antrópico (desmatamento e queimadas)	Constante (1)	Constante (1)	Constante (1)	Constante (1)	Constante (1)
Acesso	Fácil (1)	Fácil (1)	Fácil (1)	Fácil (1)	Fácil (1)
Proteção da nascente	Sem proteção (1)	Sem proteção (1)	Sem proteção (1)	Sem proteção (1)	Proteção frágil (2)
Instalações urbanas	Superior a 100 m (3)	Superior a 100 m (3)	Superior a 100 m (3)	Superior a 100 m (3)	Superior a 100 m (3)
ESCALA	21	22	23	23	25
GRAU DE PRESERVAÇÃO	Péssimo	Ruim	Ruim	Ruim	Razoável
CLASSIFICAÇÃO DA NASCENTE	E	D	D	D	C

Dentre as nascentes analisadas, uma encontra-se em grau de preservação péssimo, três classificadas como ruim e apenas uma como razoável. O baixo grau de preservação das nascentes analisadas está relacionado principalmente aos parâmetros: coloração e odor da água, vegetação bastante degradada, uso antrópico constante relacionado a desmatamento e queimadas, fácil acesso e falta de proteção das nascentes.

A cor da água das nascentes variou entre escura (N₁) (Figura 6) e clara (N₂, N₃, N₄ e N₅) observada na água das nascentes se deve à presença de substâncias em solução, principalmente material orgânico coloidal (substâncias naturais resultantes da decomposição de folhas e madeiras) e inorgânico (compostos de ferro e manganês) naturais.

Figura 6. Nascente N₁ (Coordenadas 458082mE/9241025mS) com detalhe para cor escura da água.



Em relação ao odor da água, sugere-se que este se deu pela presença de substância que comunique odor ou a sensação do odor, sendo essa resultante de causas naturais, tais como: vegetação em decomposição, bactérias, fungos e compostos orgânicos como gás sulfídrico, etc, uma vez que não identificou-se a existência de atividades urbanas e industriais, ou agrícolas na área.

As áreas de recargas de todas as nascentes avaliadas no contexto da paisagem não apresentam cobertura vegetal de porte arbóreo/arbustivo (Figura 7) em toda sua extensão, impossibilitando a garantia da regularidade do lençol freático, quantidade e qualidade da água drenada para as nascentes da região, sendo caracterizada pela presença de espécies gramíneas exóticas (capins). Oliveira et al. (2014) defendem que quando se tem a cobertura vegetal nas áreas de recarga, sabe-se que há uma maior possibilidade de infiltração de água no solo e manutenção destas nascentes. Desse modo, a inexistência de cobertura de vegetação implica em um aumento do escoamento superficial com grandes chances de assoreamento e desaparecimento desses pontos de afloramento de água na superfície.

Figura 7. Nascente N₃ (Coordenadas 458116mE/9241036mS) com detalhe para ausência de vegetação em APP e presença de capins na área do terreno.



O uso antrópico intenso das áreas, aliado a falta de proteção e o fácil acesso às nascentes têm aumentado as pressões sobre as nascentes estudadas. Dessa forma, as intensas perturbações geradas nesses ambientes, promovem o empobrecimento da regeneração natural da vegetação nessas áreas, consequentemente, prejudicando o recrutamento de indivíduos para a recuperação ambiental de áreas degradadas (Machado et al., 2010).

17

Para Freitas Junior et al. (2009), a presença de vegetação próxima aos recursos hídricos, as chamadas “matas ciliares” exercem função protetora sobre os recursos bióticos e abióticos, além de servirem como refúgio para a fauna, atuam como corredor biológico e estimulam o fluxo gênico entre as populações, sendo fundamentais para a manutenção da qualidade da água, uma vez que absorverem a água proveniente do escoamento superficial das áreas adjacentes, contribuem para a redução dos processos erosivos e do consequente assoreamento do leito do curso d'água.

Vulnerabilidade natural do aquífero (índice GO)

Os principais fatores que controlam a vulnerabilidade de um aquífero estão ligados à inacessibilidade hidráulica e a capacidade de atenuação do próprio aquífero. Os dados hidrogeológicos necessários para a composição destes fatores consistem na definição do grau de confinamento do aquífero, na profundidade até o topo do aquífero, umidade da zona não-

saturada, condutividade hidráulica da zona não-saturada, assim como a mineralogia completa do aquífero. Entretanto, não são dados facilmente acessíveis, obtendo-se na maioria das vezes somente o tipo de contaminante subterrâneo, a profundidade até o lençol freático, o grau de consolidação e as características litologias do aquífero (Foster e Hirata, 1988).

A metodologia GOD foi empregada para avaliação da vulnerabilidade das nascentes da área estudada por sua facilidade de aplicação em virtude do reduzido número de parâmetros, que possibilitam seu uso mesmo em situações em que não se tem muita informação disponível e cuja nomenclatura é o acrônimo em inglês de três parâmetros fundamentais:

1. Ocorrência de água subterrânea (Groundwater occurrence), onde os valores são obtidos dentro de um intervalo de 0 a 1;
2. Classificação dos estratos acima da zona saturada do aquífero em termos do grau de consolidação e caráter litológico (Overall aquifer class) - esta propriedade conduzirá a um segundo ponto na escala de 0,4 a 1,0;
3. Profundidade do topo do aquífero (Depth to groundwater table), que definirá o terceiro ponto, na escala de 0,6 a 0,1.

Para obter os parâmetros G e O, buscou-se informações sobre os perfis construtivos/litológicos adquiridos no SIAGAS (Sistema de Informações de Águas Subterrâneas) e no CPRM (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais) do município de Várzea Alegre. O parâmetro D foi obtido através de medições do nível d'água dos poços na comunidade com auxílio de uma fita métrica.

Com base no parâmetro G, classificou-se o grau de confinamento nos poços em “confinado”, pois a área de estudo se localiza sob embasamento cristalino (maciço residual). Já as nascentes foram adequadas a classe de “fluxo jorrante ascendente”. No que diz respeito ao parâmetro O classificou-se a litologia em “consolidada (rocha dura)” com formação rochosa “magmática/metamórfica antiga”. Já o parâmetro D foi classificado de acordo com as profundidades do nível freático que variaram de 2 a 6 metros.

O índice de vulnerabilidade foi determinado como a multiplicação dos valores obtidos em cada fator ($G \times O \times D$), conforme apresentado na Tabela 6.

Tabela 6. Cálculo do Índice de vulnerabilidade das nascentes do Sitio Riacho Verde, município de Várzea Alegre – CE.

Nascente	Tipo de Aquífero (G)	Litologia (O)	Profundidade (D)	Índice	Vulnerabilidade
N ₁	0,2	0,6	0,8	0,096	Insignificante
N ₂	0,2	0,6	0,8	0,096	Insignificante
N ₃	0,2	0,6	0,8	0,096	Insignificante
N ₄	0,2	0,6	0,8	0,096	Insignificante
N ₅	0,2	0,6	0,8	0,096	Insignificante

Como pode ser observado na Tabela 6, a vulnerabilidade a contaminação do aquífero presente na área das nascentes foi insignificante ou desprezível dentro da classificação de Foster (2003), esse fato está relacionado a presença solos com característica argilosa e bem compactados e litologia composta por rochas duras sobre o aquífero, fatores que aumentam a inacessibilidade hidráulica do mesmo, isto é, os poluentes levam um tempo maior para passar da zona insaturada para a zona saturada.

Embora a presença de atividades potencialmente contaminantes não seja considerada pelo método GOD, essas aumentam o risco de poluição ambiental do sistema estudado, em especial aquelas relacionadas a atividades agrícolas com uso de fertilizantes e agrotóxicos, sendo essencial o manejo adequado dessas áreas, sobretudo com uso de técnicas agroecológicas.

19

Classificação do risco à contaminação da água subterrânea

Para obtenção do grau risco à contaminação da água subterrânea cruzaram-se informações da vulnerabilidade natural do aquífero (obtida através do método GOD) com a potencialidade da carga contaminante.

Considerando que a vulnerabilidade natural do aquífero foi considerada desprezível e que a potencialidade da carga contaminante é reduzida ou inexistente, chegou-se ao grau I de risco à contaminação da água subterrânea. Como recomendação proposta para os cuidados com uso da água do aquífero nessa área é necessário conhecer dados de contaminação próximo ao ponto de captação da água (raio de 100m) (Foster e Hirata, 1988).

5. CONCLUSÃO

As nascentes estudadas apresentaram grau de preservação entre péssimo e razoável, dado que serve de alerta para que sejam pensados projetos de recuperação dessas áreas, com limpeza e manutenção das áreas de afloramento de água, cercamento de todo o raio da APP e reflorestamento da mesma com espécies nativas; recuperação das áreas degradadas na área de recarga do sistema aquífero e controle do uso das áreas a fim de evitar impactos futuros.

Ressalta-se que ao pensar a recuperação de nascentes não devemos limitar o recorte espacial apenas ao seu raio territorial imediatamente próximo, mas propostas pensadas dentro da dinâmica de bacias hidrográficas, pois pesar de suas particularidades e diferentes estratégias de conservação, esses hidrossistemas têm papéis relevantes no ciclo hidrológico e na dinâmica das paisagens, se bem conservados, possibilitam o controle de erosão, diminuem o escoamento superficial e subsuperficial e controlam as perdas de água por evaporação e/ou evapotranspiração.

Produção de diagnósticos para identificação e compreensão da situação desses hidrossistemas são estratégias de grande relevância para proposição de projetos de recuperação a serem implantados no âmbito local, através da atuação do poder público e de proprietários rurais responsáveis por essas áreas que em sua maioria são terras privadas. Além disso o diagnóstico possibilita a inserção dessas no Cadastro Ambiental Rural (CAR) gerando a obrigatoriedade da preservação de sua APP. Embora algumas ações nesse sentido já venham sendo implantadas pelo poder público municipal no município estudado, essas ainda são incipientes e não alcançaram escala de abrangência em todo o território municipal.

Ações de educação ambiental e conscientização sobre uso adequado do solo nas áreas de recarga desses mananciais são de fundamental importância para prevenção de contaminação desse recurso ambiental. Nesse sentido também se faz necessário o fomento a parcerias com sindicatos rurais, associações e grupos de produtores para possibilitar a promoção de capacitações direcionadas a proprietários rurais para a recuperação de áreas de APP e reserva legal, através da Adesão a Programas de Regularização Ambiental das propriedades rurais, conforme exigência do Código Florestal Brasileiro.

As ferramentas metodológicas apresentadas nesse trabalho podem ser aperfeiçoadas e adaptadas a distintas realidades locais, a depender do interesse de estudo de outros

pesquisadores e órgãos públicos. Sendo de grande relevância o monitoramento das áreas de nascentes para compreender a sua evolução durante uma série histórica e possibilitar a tomada de decisões pelas partes interessadas.

REFERÊNCIAS

Braga R. A. P.; Silva C. E. M. “Adequação ambiental de assentamentos rurais na bacia do rio Natuba-PE”. **Anais do XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. ABRH, Campo Grande, 2009. 18 p.

BRITO, A. P. M.; SANTOS, A. M. M.; NOGUEIRA, R. S. Mapeamento da vulnerabilidade à contaminação de um sistema aquífero cristalino no município de Redenção/CE. **Nature and Conservation**. v. 14 n. 2, Mar, Abr, Mai 2021. Disponível em: <<https://sustenere.co/index.php/nature/article/view/CBPC2318-2881.2021.002.0014/2744>>. Acesso em: 22 jun. 2024.

CETESB (2023). **Poluição das águas subterrâneas**. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/aguas-subterraneas/informacoes-basicas/poluicao-das-aguas-subterraneas/>>. Acesso em: 20 jun. 2024.

CLEARY, R. W. **Águas subterrâneas**. Tampa, 2007.

FOSTER, S.; HIRATA, R.; GOMES, D.; D’ELIA, M.; PARIS, M. **Protección de La Calidad el Agua Subterránea: guía para empresas de água, autoridades municipales y agencias ambientales**. Washington: Banco Mundial, 2003.

FOSTER, S. S. D.; HIRATA, R. C. A. **Determinacion del Riesgo de Contaminacion de Águas Subterráneas: una metodologia basada en datos existentes**. Lima: Organizacion Mundial de La Salud, 1988.

FREITAS JUNIOR, G.; GALLO, Z.; SOSSAE, F. C.; CASTRO, M. C. A. A. Levantamento Florístico de Mata Ciliar em Áreas de Extração de Argila no município de São Roque do Canaã-ES. **Revista Uniara**, v.12, n.2, pp. 145-156, dez. 2009.

GOODE, W. J.; HATT, P. K. **Métodos em pesquisa social**. São Paulo: Nacional, 1975.

IPECE (2018). **Perfil Básico Municipal – Várzea Alegre**. Disponível em: <<http://ipecedata.ipece.ce.gov.br/ipece-data-web/module/perfil-municipal.xhtml>>. Acesso em: 21 jan. 2023.

STEVENS, L. E. et al. 2021. The Ecological Integrity of Spring Ecosystems: A Global Review. **Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences**. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128211397001112>. Acesso em: 20 ago. 2024.

MACHADO, E. L. M.; GONZAGA, A. P. D.; CARVALHO, W. A. C.; SOUZA, J. S.; HIGUCHI, P.; SANTOS, R. M.; SILVA, A. C.; OLIVEIRA-FILHO, A. T. Flutuações temporais nos padrões de distribuição diamétrica da comunidade arbóreo-arbustivo e de 15 populações em um fragmento florestal. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 34, n. 4, p. 723-732, 2010.

NEVES, A. L. R. et al. Aspectos socioambientais e qualidade da água de dessalinizadores nas comunidades rurais de Pentecoste-CE. *Ambiente e Água - An Interdisciplinary Journal Of Applied Science*, [s.l.], v. 12, n. 1, p. 124-135, 1 jan. 2017.

OLIVEIRA, A. S.; SILVA, A. M.; MELLO, C. R.; ALVES, G. J. Stream flow regime of springs in the Mantiqueira Mountain Range region, Minas Gerais State. **Cerne**, v. 20, n. 3, p. 343-349, 2014

SALAFSKY, N.; SALZER, D.; STATTERSFIELD, A. J.; HILTON-TAYLOR, C.; NEUGARTEN, R.; BUTCHART, S. H. M.; COLLEN, B.; COX, N.; MASTER, L. L.; O'CONNOR, S.; WILKIE, D. A standard lexicon for biodiversity conservation: Unified classifications of threats and actions. **Conservation Biology**. v. 22, p. 897-911, 2008.

ZALASIEWICZ, J. *et al.* The geological cycle of plastics and their use as a stratigraphic indicator of the Anthropocene. **Anthropocene**, 2016. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213305416300029>>. Acesso em: 12 jan. 2023.