

Análise de vulnerabilidade das águas subterrâneas à contaminação na bacia do rio Urubu, TO, Brasil

Groundwater vulnerability analysis to contamination at the Urubu river watershed, TO, Brazil

Análisis de vulnerabilidad de las aguas subterráneas a contaminación en la Cuenca del Río Urubu, TO, Brasil

Fábio Silva

<https://orcid.org/0000-0002-9319-9607>

ambiental.costa@gmail.com

Universidade Federal do Tocantins, UFTO, Palmas, TO

Fernando de Moraes

<https://orcid.org/0000-0002-0311-3823>

morais@mail.uft.edu.br

Universidade Federal do Tocantins, UFTO, Palmas, TO

Resumo: O presente estudo busca avaliar a vulnerabilidade das águas subterrâneas à contaminação com base no índice VIX de vulnerabilidade, e levou em consideração os valores de NDWI extraídos da área de estudo, componente do sistema do rio Formoso, tributário do rio Araguaia. Observou-se que os maiores valores do índice VIX foram encontrados em áreas cujo lençol freático estava em maior profundidade. A região oeste da bacia apresentou áreas mais vulneráveis à contaminação em virtude da pouca profundidade do nível freático. O uso dos índices VIX e NDWI foram eficazes na determinação de áreas mais suscetíveis à contaminação dentro da bacia do rio Urubu, sendo dessa forma, uma ferramenta eficiente na gestão dos recursos naturais locais.

Palavras-Chaves: Recursos hídricos, Índice VIX, NDWI, Sensoriamento Remoto.

Abstract: This study aims to evaluate the vulnerability of groundwater to contamination in the Urubu river watershed, Tocantins. The analysis was based on the VIX vulnerability index and considered the areas with the highest water accumulation, as indicated by the NDWI index values extracted from the study area. It was observed that the highest values of the VIX index were found in areas in which the groundwater levels were deeper. The western region of the basin presented areas more vulnerable to contamination due to the shallow depth of the water table. The use of the VIX and NDWI indices was effective in determining areas that are more susceptible to contamination within the Urubu river basin, thus, it can be considered an efficient tool for local natural resource management.

Keywords: Groundwater, VIX index, NDWI, Remoting sense.

Resumen: Este artículo busca evaluar la vulnerabilidad de las aguas subterráneas a la contaminación en la Cuenca hidrográfica del Río Urubu, Tocantins. El análisis se hizo con base en el índice VIX de vulnerabilidad, teniendo en cuenta los valores de NDWI extraídos en investigación en el terreno. Se ha observado que los mayores valores del índice VIX fueron encontrados en zonas cuya capa freática estaba a mayor profundidad. La región oeste de la Cuenca presentó áreas más susceptibles a la contaminación por causa de su bajo nivel en la capa freática. El uso de los índices VIX NDWI fueron efectivos en la determinación de áreas más susceptibles por contaminación dentro del Río Urubu, por lo tanto, es una herramienta eficiente en la gestión de los recursos naturales locales.

Palabras clave: Aguas subterráneas, Índice VIX, NDWI, Sensoriamento remoto.

INTRODUÇÃO

É recorrente nas discussões a respeito do uso dos recursos naturais que o consumo indiscriminado da água alicerça os cenários pessimistas de disponibilidade desse recurso para as gerações futuras. Sob uma perspectiva regional, Vörösmarty et al. (2000) destacam que o desafio das regiões tropicais, em que há uma maior disponibilidade hídrica será a garantia da qualidade da água. Nesse sentido, o grau de vulnerabilidade à contaminação que ambas, águas superficiais e subterrâneas, apresentam frente a manejos inadequados se tornou relevante no processo de gestão do desenvolvimento econômico local, uso e cobertura do solo.

De acordo com a UNESCO (2019), o acesso às águas subterrâneas tem sido importante na complementação da crescente demanda por água, uma vez que a disponibilidade desta garante o abastecimento em períodos de maior escassez, permitindo assim a exploração direta pelos poços, pois dessa forma contribui com o escoamento de rios e lagos por meio do fluxo de água subterrânea.

A vulnerabilidade dos sistemas aquáticos subterrâneos à contaminação apresenta duas abordagens interpretativas. A primeira é conhecida como “vulnerabilidade intrínseca” e avalia a suscetibilidade do aquífero aos poluentes produzidos por atividades antropogênicas. Essa vulnerabilidade leva em consideração as características geológicas, hidrológicas e hidrogeológicas; no entanto, desconsidera a natureza do contaminante (Gogu & Dassargues, 2000; Machiwal et al., 2018).

A “vulnerabilidade específica” é a segunda abordagem conceitual, em que se avalia a vulnerabilidade do aquífero a contaminantes específicos ou um grupo de contaminantes, e por isso, considera as propriedades dos contaminantes e as componentes intrínsecas do aquífero (Gogu & Dassargues, 2000).

Foster et al. (2002) esclarece que a análise das características pedológicas e hidrogeológicas locais possibilita a geração de dados de entradas que serão usados na obtenção dos índices que avaliam a vulnerabilidade das águas subterrâneas à contaminação. A interpretação dos índices é essencial para a elaboração de políticas públicas que contemplem as características hidrológicas e hidrogeológicas regionais de cada aquífero.

Os métodos de avaliação da vulnerabilidade de aquíferos à contaminação são baseados em três linhas de investigação científica. A primeira analisa somente o solo (superfície) e a zona não-saturada, excluindo os processos de transporte de massa existentes no meio. A avaliação de vulnerabilidade limita-se à probabilidade de um dado contaminante atingir a zona saturada. Nessa categoria de encaixam os métodos GOD e AVI (Gogu & Dassargues, 2000). A segunda linha metodológica de avaliação da vulnerabilidade dos recursos hídricos subterrâneos à contaminação considera o delineamento de áreas de proteção dos sistemas hídricos subterrâneos, assim como o fluxo das águas subterrâneas e mecanismos de transporte na zona saturada. A terceira abordagem metodológica foca nas características do solo, da zona não-saturada e do aquífero (Gogu & Dassargues, 2000).

O uso de métodos que avaliam a vulnerabilidade intrínseca de aquíferos à contaminação é amplamente adotado em estudos ambientais em virtude da praticidade na obtenção e processamento dos parâmetros de entrada dos modelos (Douglas, Dixon & Griffin, 2018). No Brasil, Spadotto (2014) propôs o índice VIX de vulnerabilidade das águas subterrâneas, adimensional, cujo modelo é alimentado por variáveis físicas e hidrológicas do solo e do aquífero em estudo. O modelo adotado pelo índice VIX se encaixa na primeira abordagem metodológica de Gogu e Dassargues (2000, p. 550), a qual se interessa pela vulnerabilidade intrínseca do aquífero, visto que a natureza do poluente é irrelevante para os cálculos.

A caracterização das áreas mais suscetíveis à contaminação é facilitada pela identificação de zonas de recarga e de áreas em que o nível freático esteja mais próximo da superfície, a exemplo das áreas úmidas e nascentes. Nessas áreas, o risco de contaminação tende a ser maior devido à interação com fontes pontuais ou difusas de poluição. Dessa maneira, uso do índice de diferença normalizada da água (*Normalized Difference Water Index* - NDWI) pode ser uma metodologia complementar no estudo de vulnerabilidade das águas subterrâneas à contaminação, pois os valores de NDWI possibilitam a detecção de áreas com maior tendência a acumulação de água, o que permite focar os esforços em áreas que, de modo preliminar, se encontram mais suscetíveis às alterações físicas, químicas e biológicas por consequência da intervenção humana.

A porção sudoeste do Estado do Tocantins é marcada pela transição entre os biomas Cerrado e Amazônia, sendo dessa forma, caracterizada como uma zona ecotonal. Na porção sudoeste do Estado do Tocantins região, o rio Urubu drena uma área de 2.640 km², e em virtude das condições topográficas e climáticas tem atraído uma crescente exploração de recursos naturais. A bacia comporta uma matriz de exploração de recursos naturais diversa, sendo proeminentes a agricultura mecanizada e a pecuária de corte no uso do solo na região (Arruda & Valdevino, 2014).

Martins et al. (2002) destacaram que em decorrência da instalação dos grandes projetos irrigados o ecossistema local passou a receber cargas excessivas de fertilizantes e pesticida, estes inevitavelmente, funcionam como fonte de poluição difusa e, portanto, comprometem não somente o solo e água, mas também a biota.

Ciente da relevância ambiental e econômica da bacia do rio Urubu, este estudo busca avaliar a vulnerabilidade das águas subterrâneas à contaminação com base no índice

VIX, levando em consideração as áreas mais suscetíveis à acumulação de água, conforme apontadas pelos valores de NDWI da bacia.

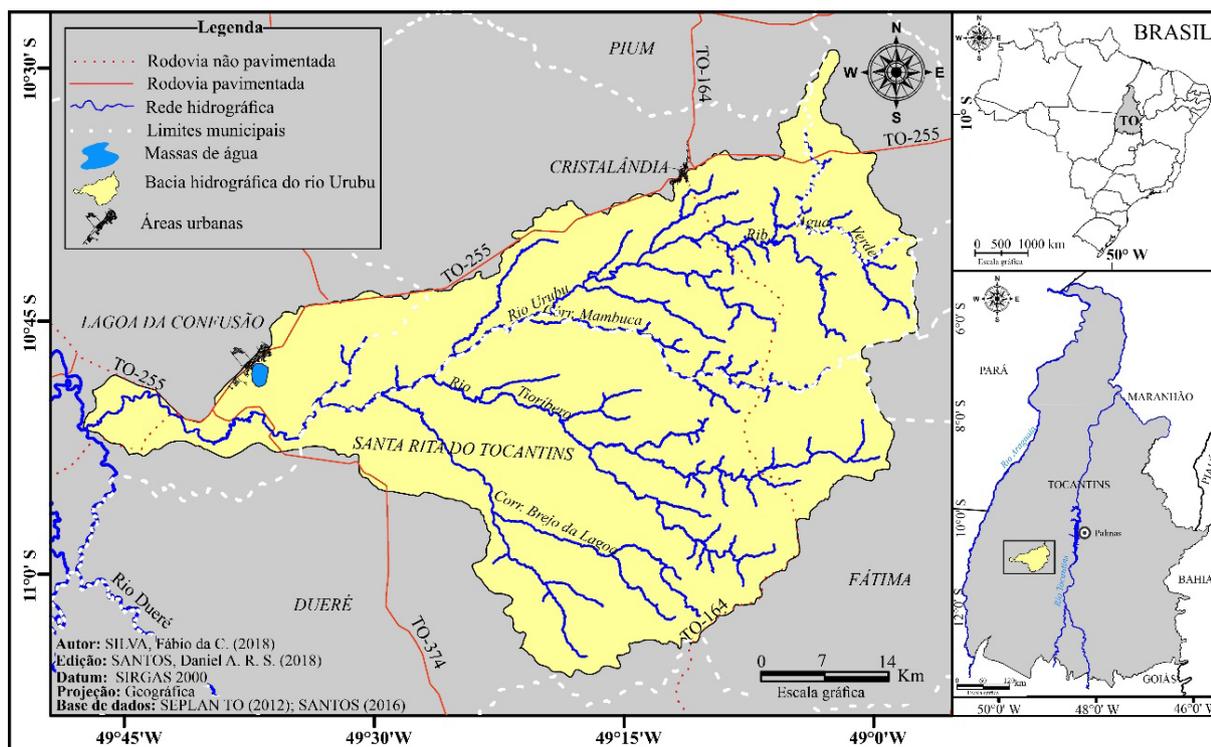
METODOLOGIA

Área de estudo

A bacia do rio Urubu ($49^{\circ}15'2''$ e $48^{\circ}57'52''$ W/ $10^{\circ}30'3''$ e $11^{\circ}4'37''$ S) representa aproximadamente de 1% da área total do Estado e abrange sete municípios: Cristalândia, Crixás do Tocantins, Fátima, Lagoa da Confusão, Pium, Nova Rosalândia e Santa Rita do Tocantins (Fig. 1). Os principais acessos compreendem as rodovias pavimentadas TO-255 e TO-374, as quais cruzam a bacia nos sentidos Sul-Norte e Leste-Oeste, respectivamente. Apesar de não ser pavimentada, outra importante via de acesso a área de estudo é a rodovia estadual TO-164, que liga os municípios de Cristalândia e Aliança do Tocantins.

A bacia do rio Urubu é uma das seis sub-bacias que compõem o sistema do rio Formoso. Assim sendo, o rio Urubu escoar os volumes precipitados na porção norte da bacia do rio Formoso, que posteriormente contribui para o rio Araguaia. A vazão de referência para 90% dos dados de descarga (Q90) é de $1.245 \text{ m}^3/\text{s}$ no período de estiagem e atinge $28.627 \text{ m}^3/\text{s}$ na estação mais úmida (Figueroa, 2017).

Figura 1: Mapa de localização da área de estudo, rio Urubu, TO.



“No baixo curso da bacia do rio Urubu são encontrados depósitos sedimentares inconsolidados, os quais estão associados à Planície Araguaia-Javaés e às Planícies Indiscriminadas ao longo do leito do rio Urubu” (Secretaria de Planejamento e Meio

Ambiente [SEPLAN], 2012, p. 22-23). Nas áreas topograficamente elevadas (entre 250 e 300 m) são encontrados os Patamares do Interflúvio Araguaia-Tocantins, os quais são importantes para a recarga hídrica da bacia (Martins et al., 2005). A unidade geomorfológica denominada de Depressão do Médio Araguaia, localmente representada pela Depressão Urubu-Dueré intercala as planícies e o patamares anteriormente descritos (Brasil, 1981).

Tal como grande parte do Estado do Tocantins, a região do vale do Rio Urubu recebe chuvas entre os meses de setembro e abril, enquanto no outro intervalo, as temperaturas tendem a ficar mais elevadas e com acentuada queda nos índices de umidade relativa do ar, e conseqüentemente, da pluviosidade. Pela classificação climática de Thornthwaite a maior parte da bacia tem clima úmido com moderada deficiência hídrica no período de estiagem (B1wA´a´), em que a evapotranspiração potencial apresenta uma variação média anual entre 1.400 e 1.700 mm. A porção sudoeste tem condições climáticas úmidas a sub-úmidas com moderada deficiência hídrica no inverno (C2wA´a´), e evapotranspiração média anual em torno de 1.500 mm (SEPLAN, 2012).

As condições climáticas e topográficas colaboraram para a predominância de Gleissolos, Plintossolos e Latossolos Vermelho-Amarelos. Os solos próximos de cursos hídricos são influenciados pela variação sazonal do nível freático, e por isso, nessas áreas são encontrados Gleissolos e Plintossolos (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária [EMBRAPA], 2018). Os Latossolos Vermelho Amarelo estão localizados nas áreas de recarga, isto é, ao norte e nordeste da bacia onde são registradas maiores altitudes. Tais solos apresentam uma melhor drenagem e são em geral bem intemperizados, o que explica a maior profundidade (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária [EMBRAPA], 2018).

As formações geológicas da bacia estão inseridas no Grupo Tocantins, o qual é constituído pelas formações Couto Magalhães e Pequizeiro. Ambas as formações apresentam fácies metamórficas de filito, quartizitos, ardósias, xistos, muscovita-clorita-quartzo, metarenitos, metacosios e metacalcários. Além disso, as Formações Couto Magalhães e Pequizeiro se encontram sobrepostas por sedimentos pertencentes a Cobertura Sedimentar do Bananal, formados durante o Quaternário. A Formação Araguaia, também chamada de Cobertura Sedimentar do Bananal, constituída por sedimentos inconsolidados, tem uma espessura que varia entre 170 m a 320 m (Gorayeb, 1981, 2011; Pereira & Moraes, 2012).

Martins et al. (2006) relacionaram questões geoambientais com o perfil de vegetação existente na Lagoa da Confusão, município pertencente à bacia do rio Urubu. Nesse estudo foram identificados os seguintes tipos de vegetação: Campo Limpo, Floresta, Campo Sujo (Campo de Murundus), Mata Seca, Cerrado e Floresta Ripária. Além disso, ocorrem 'ipucas', descritas como fragmentos naturais de floresta estacional em planícies inundáveis. Tais formações são encontradas em pequenas depressões com formatos ovais ou circulares nas áreas de menor altitude da bacia rio Araguaia. Por estarem adaptadas às variações sazonais do nível freático as ipucas tem grande influência no processo de recarga de aquífero dentro da bacia do rio Urubu, pois devido à natureza cárstica desses ambientes o solo tende a ser dissolvido pelos ácidos formados pela decomposição da matéria orgânica, dessa maneira aumentando a conexão entre superfície e lençol freático (Martins et al., 2002; Moraes, 2017).

Índice de Diferença Normalizada de Água - NDWI

O índice de diferença normalizada da água (NDWI) é calculado de acordo com a operação entre as bandas espectrais que atendam os comprimentos de ondas das faixas verde (Green) e infravermelho próximo (NIR) conforme a Equação 1 (Gao, 1996; McFeeters, 1999).

$$NDWI = \frac{Green - NIR}{Green + NIR} \quad (1)$$

As imagens requisitadas no processamento do NDWI foram capturadas pelo satélite CBERS 4, sensor PAN, resolução espacial de 20 m, as quais foram obtidas gratuitamente junto ao Catálogo de Imagens, da Divisão de Geração de Imagens (DGI) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE. Com o intuito de reduzir a interferência atmosférica foram utilizadas as cenas 160/112 do dia 12-08-2017 e 161/112 do dia 04-09-2017. Para esse satélite as bandas B02 (0,52-0,59 μm) e B04 (0,77-0,89 μm) se adequaram, respectivamente, às bandas do Verde e do Infravermelho Próximo, conforme indicado por Gao (1996, p. 258).

A operação entre as bandas foi executada conforme a Equação 1 com o auxílio da calculadora *raster* do software QGIS. Posteriormente, as imagens geradas pela álgebra de camadas foram mosaicadas, a fim de contemplar toda a extensão da bacia. O produto cartográfico final precisou de ajustes visuais, isto é, aplicou-se uma paleta que realçou com tons mais frios as áreas que apresentaram maiores valores de NDWI e destacou com tons mais quentes aquelas que obtiveram baixos valores do índice. A camada contendo os limites geográficos da bacia do rio Urubu foi extraída de Santos (2016), o qual apresentou uma versão atualizada da configuração da bacia levando em consideração as correções na identificação dos divisores de água da área de estudo.

Índice de Vulnerabilidade de Água Subterrânea à Contaminação - VIX

Spadotto (2014, p.2) mostrou que ao desconsiderar o comportamento do contaminante na fase adsorvida, a mobilidade de convecção de um contaminante químico, não-reativo, e sem degradação, pode ser estimada por meio do tempo de convecção (TC), conforme a Equação 2.

$$TC = \frac{L}{v} \quad (2)$$

$$v = \frac{q}{\theta} \quad (3)$$

Sendo L é a profundidade (cm) e V é a velocidade efetiva de convecção, a qual pode ser encontrada pela Equação 3, onde q é fluxo de água no solo (cm^3/s) e θ corresponde à umidade do solo (v/v).

Substituindo V (Equação 3) na equação do tempo de convecção (Equação 2), tem-se:

$$TC = \frac{L \times \theta}{q} \quad (4)$$

Considera-se que o inverso do tempo de convecção (Equação 4), pode ser usado como índice de vulnerabilidade intrínseca dos corpos de água subterrâneos à contaminação, Spadotto (2014, p. 2) propõe a Equação 5.

$$VIX = \frac{L}{R.F} \quad (5)$$

Onde, VIX é o Índice de Vulnerabilidade de água subterrânea à contaminação (adimensional) e L é a profundidade do corpo d'água subterrânea (cm) R representa a recarga hidráulica anual (cm) e F indica a umidade na capacidade de campo do solo (v/v).

A distribuição dos pontos para coleta levou em consideração as variedades de solos, usos e cobertura identificados na região. Buscou-se contemplar todas as classes identificadas pelo estudo de cobertura e uso do solo, sendo que um total de 15 áreas foram selecionadas.

As condições de drenagem dos solos foram levadas em consideração no processo de escolha das áreas de coleta (Tab. 1). Foram atribuídos valores entre 0 e 1 para pontuar as três classes de solo que predominam na bacia do Rio Urubu. Os Gleissolos receberam o valor máximo em virtude dessa classe se encontrar permanentemente ou periodicamente saturada por água. Os Latossolos receberam um menor valor em virtude de serem mais profundos e apresentarem melhor drenagem (EMBRAPA, 2018).

Tabela 1: Pontuação das classes de solo mediante as condições de drenagem dos solos.

Solos	Pontuação
Latossolos	0
Plintossolos	0,75
Gleissolos	1

Para a álgebra de mapas foi calculada uma média aritmética com camadas contendo as informações do NDWI e das classes de solo. Vale ressaltar que o quadro de atributos da camada de solos foi complementado com os respectivos pontos apresentados no Quadro 1. Com o produto da álgebra entre as camadas foi possível destacar as áreas com pontuação mais próximas de 1. Com o auxílio do programa ESRI ArcGis, versão 10.3 foram sobrepostos o mapa de cobertura e uso do solo e a camada recém-criada das áreas mais pontuadas. Tal procedimento permitiu selecionar as áreas que, além de possuírem pontuação acima de zero, também contemplaram as classes determinadas pelo estudo de uso e ocupação da bacia do rio Urubu.

Profundidade do corpo d'água subterrâneo

Os dados referentes à profundidade do lençol freático foram obtidos com o auxílio de uma trena com extensão de 30 metros, a qual foi inserida nas cisternas mais próximas das áreas de coleta de solo. O procedimento visou determinar a distância vertical entre o nível d'água das cisternas e a superfície do terreno adjacente. Outra maneira de indicar a profundidade do lençol freático foi por meio da distância vertical entre o nível d'água do rio Urubu e a parte superior sua vertente (Nobre et al., 2011).

Recarga hídrica anual

Spadoto (2014) ressalta que a recarga hídrica anual é determinada por meio da diferença entre as médias anuais de precipitação e evapotranspiração. A recarga de água

usada no cálculo do índice VIX foi a média das recargas hidráulicas anuais dos anos hidrológicos de 2010 a 2018.

As informações climáticas adotadas foram compiladas do banco de dados da estação convencional de Porto Nacional, o qual pode ser acessado livremente na plataforma *online* do INMET¹.

A estação meteorológica de Porto Nacional começou a produzir dados de evapotranspiração a partir de 2010 e em virtude disso, o intervalo temporal dos dados é de apenas 8 anos. É interessante ainda frisar que o banco de dados meteorológicos das estações convencionais é consistido pelo próprio INMET, o que ratifica a confiabilidade das informações.

Umidade do solo na capacidade de campo

A umidade do solo em sua condição de capacidade de campo foi analisada com o auxílio do extrator de Richard, o qual aplica pressões negativas sobre amostras de solo encharcado. Inicialmente, foram escolhidas as placas capazes de suportar as pressões de interesse para o estudo. Os demais procedimentos necessários para identificar a capacidade de campo foram executados no laboratório de solos da Universidade Federal de Viçosa, conforme EMBRAPA (1997).

Os valores de umidade à base gravimétrica (U) e volumétrica (θ) foram encontrados por intermédio das Equações 6 e 7, respectivamente, onde M representa a massa de solo aferida.

$$U = \frac{M_{(\text{recipiente+solo+água})} - M_{(\text{recipiente+solo})}}{M_{(\text{recipiente+solo})} - M_{(\text{recipiente})}} \quad (6)$$

$$\theta = U \frac{\text{Densidade}_{\text{solo}}}{\text{Densidade}_{\text{água}}} \quad (7)$$

Os valores de umidades à base de volume variaram mediante a intensidade de pressão negativa a qual as amostras foram submetidas. Posteriormente, os dados foram ajustados ao modelo de curva de retenção de água no solo (Equação 8) proposto por Van Genuchten (1980, p. 894).

$$\theta = (\theta_{\text{sat}} - \theta_{\text{res}})[1 + (\alpha h)^n]^{-m} + \theta_{\text{res}} \quad (8)$$

Onde θ , θ_{sat} e θ_{res} são, respectivamente, os conteúdos de água do solo correspondentes à tensão h , em condições de saturação e umidade residual, em kg.kg^{-1} , h é a tensão matricial da água do solo, em kPa, n e m ($m = 1-1/n$) são coeficientes empíricos adimensionais de ajuste e α é um parâmetro expresso em kPa^{-1} . O ajuste foi realizado por meio do *software* Qualisolo®, o qual estimou os valores dos parâmetros usados na equação 8.

Reichardt e Timm (2004) sugerem que a umidade na capacidade de campo é encontrada quando o solo está submetido à pressão de 33 kPa. Dessa maneira, este estudo levou em consideração essa pressão para calcular os valores da umidade na capacidade de campo para o índice de vulnerabilidade de águas subterrâneas - VIX.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

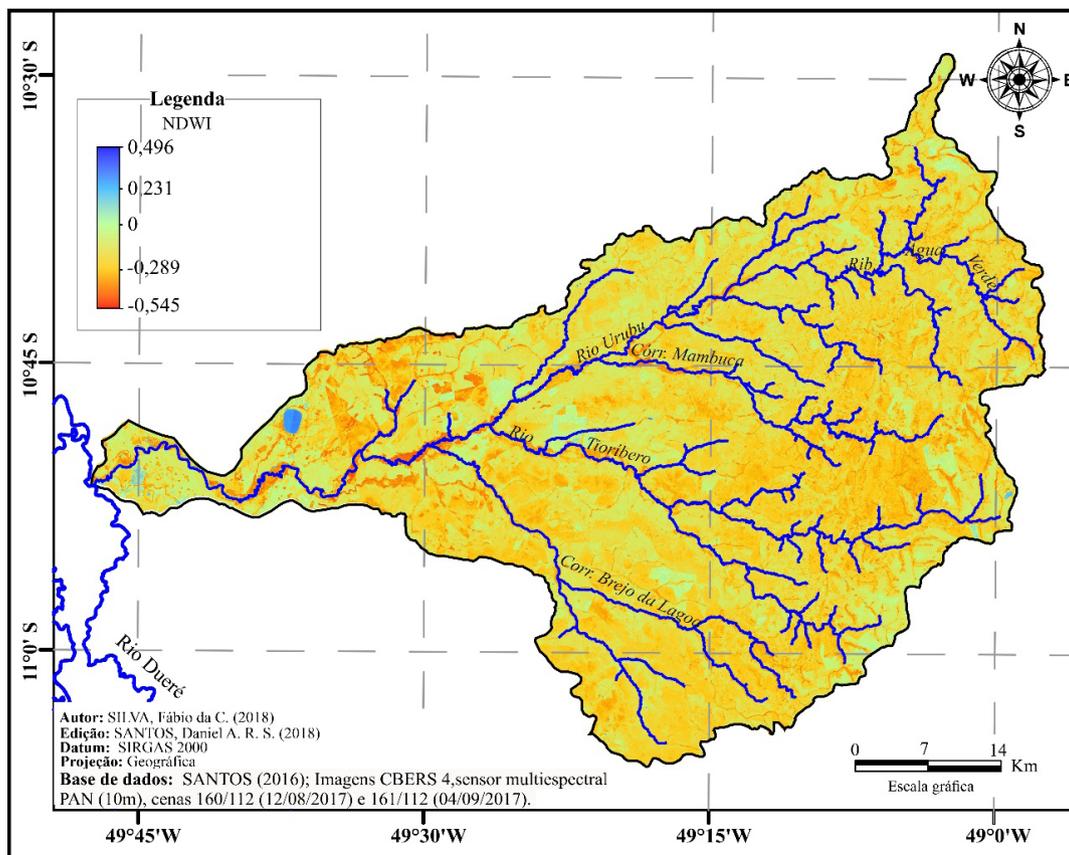
Índice de Diferença Normalizada de Água - NDWI

A Figura 2 demonstra que a bacia do rio Urubu apresentou valores de NDWI maiores (0 a 0,496) à medida que se desloca para a região centro-oeste da bacia. Na porção oeste, destaca-se em azul, a Lagoa da Confusão, corpo hídrico de maior diâmetro dentro da bacia estudada.

A presença de tons mais quentes nas áreas de mata ciliar indicou baixos valores de NDWI. Para Polidório, Imai e Tommaselli (2004), a resposta da vegetação ao índice NDWI tende a ser negativa, pois na faixa do infravermelho próximo a vegetação apresenta maior refletância. No entanto, sob o comprimento de onda equivalente ao verde, ela tem uma refletância menor. Esse comportamento espectral da vegetação gera valores negativos no numerador da Equação 1.

Apesar da baixa refletância nos comprimentos de onda aplicados pelo índice, os corpos d'água geraram valores positivos de NDWI. Tal característica é decorrente da diminuição da refletância da água quando essa é exposta à radiação do infravermelho próximo. Assim, como a água possui maior refletância em comprimentos de onda verde, a operação matemática do numerador da Equação 1 fornece valores positivos, e dessa maneira, são obtidos valores de NDWI próximos ou superiores a 0. (Polidório, Imai & Tommaselli, 2004).

Figura 2: Mapa do Índice de Diferença Normalizada de Água da bacia do rio Urubu, TO.



Por meio dos valores de NDWI (Tab. 2), nota-se que o acumulado percentual das áreas dentro dos intervalos de 0 a -0,64 foi de 97,6% da área da bacia. Os intervalos com valores positivos de NDWI representaram apenas 0,9 % da área de estudo.

Tabela 2: Intervalos dos valores de NDWI e respectivas áreas.

Classes	Área (Km ²)	%
-0,64 a -0,40	36,00	1,364
-0,40 a -0,20	1.369,00	51,856
-0,20 a 0	1.207,00	45,720
0 a 0,20	18,80	0,712
0,20 a 0,40	5,50	0,208
0,40 a 0,60	0,02	0,001
Total	2640	100.000

As áreas urbanizadas e com solo exposto tiveram valores de NDWI próximos àqueles encontrados em regiões mais úmidas com vegetação. Cardoso e Amorin (2014) constataram que a similaridade das respostas de NDWI entre solos, malha urbana e água pode gerar confusão na interpretação dos mapas, sendo dessa forma, um fator limitante para o uso do NDWI. De acordo com Sarp e Ozcelik (2017), a falta de acurácia na detecção de corpos d'água tem sido observado em áreas cuja cobertura apresente baixo albedo, tais como asfalto, prédios ou sombras.

Índice VIX de Vulnerabilidade das águas subterrâneas à contaminação

Na Tabela 3 são apresentados os valores de índice VIX, umidade na capacidade de campo, e profundidade do nível freático para 15 pontos dentro da bacia de estudo. A tabela contém ainda a recarga hídrica que foi obtida por meio dos dados de precipitação e evapotranspiração da estação meteorológica convencional do município de Porto Nacional, que é a mais próxima da área de estudo. Tal estação meteorológica somente disponibiliza séries históricas de evapotranspiração a partir do ano de 2010, dessa maneira, a recarga de água de 944,2 mm/ano refere-se ao intervalo temporal entre 2010 e 2018.

Observa-se que o ponto S15 apresentou o valor de índice VIX de 0,52, isto é, o menor do grupo amostral, enquanto o ponto S3 apresentou o maior valor para esse mesmo índice. O valor médio obtido para o índice de vulnerabilidade VIX da bacia do rio Urubu foi de 1,38.

A distribuição das medidas de profundidade do nível freático resultou num coeficiente de variação de 58,3%, sendo possível observar distâncias verticais de 1,6 m a 9,3 m. Os dados de umidade na capacidade de campo oscilaram entre 0,14 cm³/cm³ e 0,32 cm³/cm³, com uma média de 0,22 cm³/cm³ para o grupo amostral, e coeficiente de variação de 30,3%.

Tabela 3: Variáveis de entrada para a equação do Índice VIX de vulnerabilidade das águas subterrâneas à contaminação.

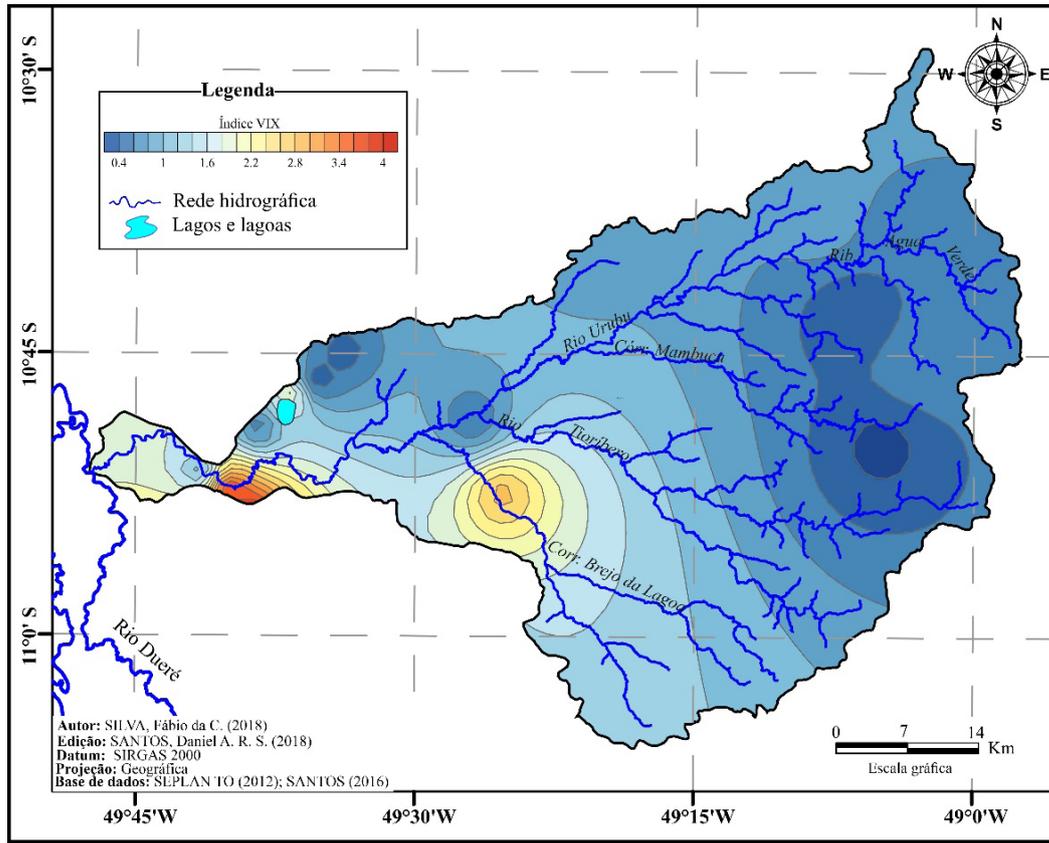
Área Amostral	Recarga Líquida Média anual (2011-2018) (cm/ano)	Profundidade do Lençol Freático (cm)	Umidade na Capacidade de Campo (v/v)	IVIX
S1	94,42	168,00	0,28	2,03
S2	94,42	340,00	0,31	0,88
S3	94,42	160,00	0,15	3,84
S4	94,42	200,00	0,14	3,49
S5	94,42	230,00	0,31	1,34
S6	94,42	550,00	0,27	0,63
S7	94,42	930,00	0,15	0,69
S8	94,42	360,00	0,23	1,16
S9	94,42	260,00	0,14	2,67
S10	94,42	360,00	0,32	0,81
S11	94,42	400,00	0,21	1,10
S12	94,42	400,00	0,22	1,07
S13	94,42	930,00	0,17	0,61
S14	94,42	770,00	0,23	0,52
S15	94,42	580,00	0,17	0,94
Médias	94,42	442,53	0,22	1,45
CV (%)	0,0	58,3	30,3	73,2

A Figura 3 apresenta o mapa de vulnerabilidade das águas subterrâneas na contaminação da bacia do rio Urubu, em que os tons mais quentes indicam as áreas com maior suscetibilidade de sofrer alterações em propriedades físicas, químicas e biológicas do aquífero. As cores mais frias destacaram as regiões cujos solos são intrinsecamente menos vulneráveis à contaminação.

As porções da região sudoeste da bacia foram diagnosticadas como propensas à contaminação. Tais áreas coincidem com os pontos S3, S4 e S9, que, de acordo a Tabela 2, foram os pontos onde o lençol freático foi encontrado a uma menor profundidade. Mingoti, Spadotto e Moraes (2016) identificaram o mesmo comportamento nos solos de cerrado do Estado do Mato Grosso, onde os índices de vulnerabilidade também foram maiores em locais em que o lençol freático se apresentou mais próximo à superfície.

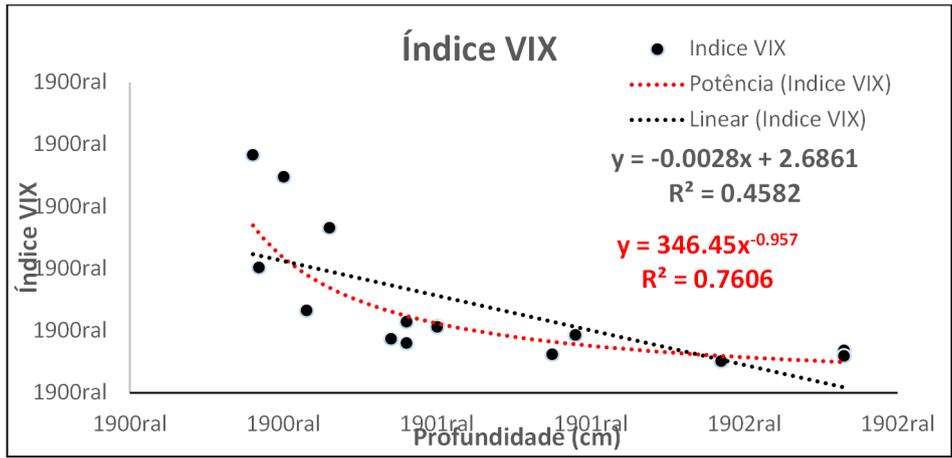
Nas regiões sul e leste da bacia foram obtidos índices de vulnerabilidade menores que podem estar relacionados a maior profundidade do nível freático. Santos (2016) destacou que a porção leste da área de estudo estão as unidades de relevo Depressão Urubu-Dueré e Interflúvio Araguaia-Tocantins. Topograficamente, essas unidades de relevo apresentam maior altitude, com a predominância de Latossolos Vermelho-Amarelos, de maior profundidade; e de Plintossolos Pétricos, que apresentam maior densidade global devido a presença de conglomerados ferruginosos conhecidos como plintitas.

Figura 3: Mapa do Índice VIX de vulnerabilidade das águas subterrâneas à contaminação da bacia do rio Urubu, TO.



A profundidade do lençol freático foi inversamente proporcional aos valores de índice VIX, isto é, áreas em que o lençol freático foi encontrado a pouca profundidade, apresentaram valores de índice VIX maiores (Fig. 4). Observou-se ainda que o modelo potencial obteve o coeficiente de determinação superior ao modelo linear, o que indica que os dados tendem a se comportar conforme uma função potencial.

Figura 4: Representação gráfica do comportamento da profundidade com relação ao índice VIX.



Ainda com relação à porção oeste, conforme apresentado na Figura 2, os valores de NDWI apontaram uma maior quantidade de água nas planícies que margeiam o rio Urubu, indicando maior conteúdo de umidade no solo. Tal característica está ligada a pouca profundidade em que o lençol freático pode ser encontrado nas regiões adjacentes aos cursos d'água.

Ao analisar a cobertura e uso da terra da bacia do rio Urubu, observa-se que a região oeste da bacia tem sido predominantemente ocupada por atividades agrícolas mecanizadas, tendo como foco a produção de grãos e leguminosas. Além disso, a exploração dos recursos hídricos da bacia para fins de irrigação tem sido crucial para manter a produtividade agrícola durante a estação mais seca (Arruda & Valdevino, 2014).

Silva et al. (2008) destacam que é comum o uso de pesticidas e fertilizantes para diminuir os riscos ambientais que incidem na produtividade das lavouras da área de estudo. Conforme apontado por Moraes, Martins e Noleto Júnior (2014) o uso desses insumos agrícolas impactava negativamente o ecossistema local. Com relação a porção oeste da bacia, os autores ainda destacam que a presença fragmentos florestais com espécies vegetais adaptadas a sazonalidade do nível freático, conhecidos como Ipucas, ratifica o quão superficial e vulnerável se encontra o lençol freático.

Autores como Brito, Martins, Oliveira Filho e Silva (2006) explicam que os mecanismos de ferrólise, juntamente a estruturação das camadas arenosas e argilosas, além da presença de carste em profundidade podem explicar a tendência de colapso de Ipucas encontradas na área oeste da bacia do rio Urubu. Outro aspecto que dever ser considerado é a intervenção antrópica por meio de drenagem artificial excessiva dos solos que causam a mineralização da matéria orgânica, o rebaixamento do lençol freático e o colapso do solo.

Uma das funções ambientais das ipucas é a recarga hídrica, pois tais formações florestais têm significante interação com o lençol freático. Dessa forma, é preocupante o fato de que muitas ipucas estão cercadas por atividades agrícolas que, conforme já mencionado, empregam agrotóxicos no combate às pragas e aplicam fertilizantes para condicionar o solo ao plantio. O contexto de vulnerabilidade ambiental das ipucas confirma a situação de alta suscetibilidade à contaminação apontada pelo índice VIX para a região oeste da bacia do Urubu (Moraes, 2017).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por meio da análise das áreas suscetíveis à contaminação na bacia do rio Urubu percebeu-se que a profundidade do lençol freático foi inversamente proporcional ao índice VIX de vulnerabilidade das águas subterrâneas à contaminação. Desse modo, quanto mais profundo o corpo de água subterrânea, menor o grau de vulnerabilidade desse à contaminação.

A relação entre a profundidade do lençol freático e o índice VIX obteve um grau de ajustamento maior para o modelo potencial se comparada ao linear, indicando uma possível

abordagem para a modelagem matemática para diminuir os custos com amostragem em áreas mais isoladas da bacia.

Na porção oeste da bacia do rio Urubu, os altos índices de NDWI e VIX apontaram que os corpos subterrâneos daquela região se encontram mais propensos a ser impactados por intervenções antrópicas, sendo necessário, portanto, uma maior atenção das agências reguladoras e de fiscalização quanto ao uso/manejo da terra nessa porção da bacia.

Recomenda-se que o grupo amostral de áreas analisadas seja expandido, a fim de melhorar a precisão dos mapas de vulnerabilidade das águas subterrâneas à contaminação.

Dada a natureza dos resultados obtidos, o presente estudo soma-se às muitas ferramentas que podem auxiliar na gestão dos recursos naturais dentro da bacia do rio Urubu, que conforme evidenciado, é uma bacia com forte perfil para agricultura.

AGRADECIMENTOS

O presente estudo foi desenvolvido com auxílio financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Tocantins, através do Programa de Pesquisa em Recursos Hídricos, processo nº 2014.20300.000009. O primeiro autor agradece à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – pela concessão de bolsa de mestrado de demanda social. Os autores agradecem aos editores e revisores anônimos da Revista Terr@ Plural pelas contribuições feitas no manuscrito a partir da leitura crítica da primeira versão do trabalho.

REFERÊNCIAS

- Arruda, T.J., & Valdevino, A.F. (2014). O Polo Agropecuário de Formoso do Araguaia/TO e sua relação espacial com os estados vizinhos. *Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional*, 10 (4), 362–386. Recuperado de <http://www.rbgdr.net/revista/index.php/rbgdr/article/viewFile/1542/420>
- Brasil. Ministério das Minas e Energia (1981). *Projeto RADAMBRASIL. Folha SC. 22. Tocantins: Geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra*. Rio de Janeiro.
- Brito, E.R., Martins, S.V., Oliveira Filho, A.T.S., & Silva, A.F. (2006). Estrutura fitossociológica de um fragmento natural de floresta inundável em área de orizicultura irrigada, município de Lagoa da Confusão, Tocantins. *Revista Árvore*, 30 (5), 829-836. Recuperado de <https://www.scielo.br/pdf/rarv/v30n5/a17v30n5.pdf>
- Cardoso, R.S., & Amorim, M.C.C.T. (2004). Avaliação dos índices NDVI, NDBI e NDWI como ferramentas ao mapeamento do uso e cobertura da terra. In *Anais do Congresso Brasileiro de Geografia*. Vitória, ES, Brasil, 7. Recuperado de <https://docplayer.com.br/14942003-Avaliacao-dos-indices-ndvi-ndbi-e-ndwi-como-ferramentas-ao-mapeamento-do-uso-e-cobertura-da-terra.html>
- Douglas, S.H., Dixon, B., & Griffin, D. (2018). Assessing Intrinsic And Specific Vulnerability Models Ability To Indicate Groundwater Vulnerability to groups of similar pesticides: a comparative study. *Physical Geography*, 1-19. Recuperado de <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/02723646.2017.1406300>
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (1997). *Manual de métodos de análise de solo*. 2. ed. rev. atual. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Recuperado de https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Manual+de+Metodos_000fvhotqk02wx5ok0q43a0ram31wtr.pdf

- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2018). *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. 5. ed. rev. e ampl. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisas de solos, 2018. Recuperado de <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1094003>
- Foster, S., Hirata, R., Gomes, D., D'Elia, M & Paris, M. (2002). Groundwater Quality Protection a guide for water utilities, municipal authorities, and environment agencies. Recuperado de <http://documents.worldbank.org/curated/en/913221468028147970/Groundwater-quality-protection-a-guide-for-water-utilities-municipal-authorities-and-environment-agencies>
- Figueroa, F.H.V. (2017). *Gestão de Alto Nível - Instituto de Atenção às Cidades - IAC*. 22 slides. Recuperado de http://www.confex.org.br/sites/default/files/antigos/Palmas_FernanVergaraFigueiroa.pdf
- Gao, B-c (1996). NDWI - A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58 (3), 257-266. Recuperado de <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0034425796000673>
- Gogu, R.C., & Dassargues, A. (2000). Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overlay and index methods. *Environmental Geology*, 39 (6), 549-559. Recuperado de <http://link.springer.com/10.1007/s002540050466>
- Goarayeb, P.S.S. (1981). Evolução geológica da região Aragacema - Pequizeiro, Goiás-Brasil. 1981. 111f. Dissertação de Mestrado em Ciências. Universidade Federal do Pará, UFPA, Belém, PA, Brasil. Recuperado de <http://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/8700>
- Goarayeb, P.S.S. (2011). Geologia do Estado do Tocantins: Aspectos Gerais e Conhecimento Atual. In: F. Morais (Org.). *Contribuições a Geografia Física do Estado do Tocantins*. Goiânia: Kelps.
- Martins, I.C.M., Soares, V.P., Silva, E. & Brites, R.S. (2002). Diagnóstico ambiental no contexto da paisagem de fragmentos florestais naturais "ipucas" no município de Lagoa da Confusão, Tocantins. *Revista Árvore*, 26 (3), 299-309. Recuperado de <https://www.scielo.br/pdf/rarv/v26n3/a05v26n3.pdf>
- Martins, A.K.E., Schaefer, C.E.G.R., Silva, E., Soares, V.P., Corrêa, G.R. & Mendonça, B.A.F. (2006). Relações solo-geoambiente em áreas de ocorrência de ipucas na planície do médio Araguaia, Estado de Tocantins. *Revista Árvore*, 30 (2), 297-310. Recuperado de <https://www.scielo.br/pdf/rarv/v30n2/a17v30n2.pdf>
- Martins, A.E.K. et al. (2005). Mapeamento de unidades geomofológicas na Fazenda Lago Verde, planície do Araguaia, município de Lagoa da Confusão, estado do Tocantins. In *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. Goiânia, GO, Brasil, 12. Recuperado de <http://marte.sid.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2004/11.22.18.38/doc/1831.pdf>
- Machiwal, D. et al. (2018). Assessment and mapping of groundwater vulnerability to pollution: Current status and challenges. *Earth-Science Reviews*, 185, 901-927. Recuperado de: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0012825217304713>.
- Mcfeters, S. K. (2013). Using the normalized difference water index (NDWI) within a Geographic Information System to detect swimming pools for mosquito abatement: A practical approach. *Remote Sensing*, 5 (7), 3544-3561. Recuperado de: <https://www.mdpi.com/2072-4292/5/7/3544>
- Mingoti, R., Spadotto, C.A., & Moraes, D.A.C. (2016). Suscetibilidade à contaminação da água subterrânea em função de propriedades dos solos no Cerrado brasileiro Groundwater contamination susceptibility as a function of soil properties in the Brazilian Cerrado. *Pesquisa agropecuária brasileira*, [s. l.], v. 51, n. 9, p. 1252-1260, 2016. Recuperado de: <http://www.scielo.br/pdf/pab/v51n9/0100-204X-pab-51-09-1252.pdf>. Acesso em: 18 set. 2019.
- Morais, F. (2017). Classificação Morfológica Das Dolinas Da Região Da Lagoa Da Confusão - To. In *Anais Do Congresso Brasileiro De Espeleologia*. Ouro Preto, Mg, Brasil, 34. Recuperado De: http://Www.Cavernas.Org.Br/Anais34cbe/34cbe_283-287.Pdf
- Morais, P.B., Nolêto Jr, S., & Martins, I.C.M. (2017). Análise de sustentabilidade do projeto hidroagrícola Javaés/Lagoa, no Estado do Tocantins. *Cadernos de Ciência & Tecnologia*, 34 (1), 83-111. Recuperado de <http://seer.sct.embrapa.br/index.php/cct/article/view/26297/13927>
- Nobre, A.D., Cuartas, L.A., Hodnett, M., Rennó, C.D., Rodrigues, G., Silveira, A., Waterloo, M., Saleska, S. (2011). Height above the nearest drainage - hydrologically relevant new terrain model. *Journal of*

Hydrology, 404 (1-2), 13-29. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169411002599>

Pereira, G.C., & Morais, F. (2012). Geofísica aplicada ao estudo dos fluxos subsuperficiais no entorno da Lagoa da Confusão – TO. *Revista Geonorte*, 2 (4), 1475-1483. Recuperado de <http://www.periodicos.ufam.edu.br/index.php/revista-geonorte/article/view/2207>

Polidorio, A.M., Imai, N.N., & Tommaselli, A.M.G. (2004). Índice indicador de corpos d'água para imagens multiespectrais. In *Anais do Simpósio em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação (SIMGEO)*. Recife, PE, Brasil, 1. Recuperado de [https://www3.ufpe.br/cgtg/ISIMGEO/CD/html/Fotogrametria e Sensoriamento Remoto/Artigos/f027.pdf](https://www3.ufpe.br/cgtg/ISIMGEO/CD/html/Fotogrametria%20e%20Sensoriamento%20Remoto/Artigos/f027.pdf)

Reichardt, K., & Timm, L.C. (2004). *Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações*. Barueri: Manole.

Santos, D.A.R. A rede de drenagem e seu significado geomorfológico: anomalias de drenagens e tectônica recente na bacia do rio Formoso, Tocantins. 2016. 157f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal do Tocantins, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Porto Nacional, TO. Recuperado de <https://repositorio.uft.edu.br/handle/11612/332>

Sarp, G., & Ozcelik, M. (2017). Water body extraction and change detection using time series: A case study of Lake Burdur, Turkey. *Journal of Taibah University for Science*, 11 (3), 381-391. Recuperado de <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1016/j.jtusc.2016.04.005>

Secretaria de Planejamento e Meio Ambiente (2012). Diretoria de Zoneamento Ecológico Econômico. *Atlas do Tocantins: subsídios ao planejamento da gestão territorial*.

Spadoto, C.A. (2014). *Índice de vulnerabilidade de água subterrânea à contaminação – VIX*. Campinas: Embrapa Gestão Territorial. (Comunicado técnico, 2). Recuperado de <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1003510/indice-de-vulnerabilidade-de-agua-subterranea-a-contaminacao---vix>

Silva, O.F. et al. (2008). Impacto socioeconômico e ambiental da soca de arroz produzida na microrregião do Rio Formoso, Estado do Tocantins. *Redes. Revista do Desenvolvimento Regional*, 13 (1), 28-48. Recuperado de: <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=552056855002>>. Acesso em: 23 jun. 2019.

UNESCO (2019). *The United Nations World Water Development Report 2019: Leaving No One Behind*. Paris. Recuperado de <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000367306>

van Genuchten, M.T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44, 892-898. Recuperado de <https://fdocuments.in/document/a-closed-form-equation-for-predicting-the-hydraulic-conductivity-of-unsaturated.html>

Vörösmarty, C.J. et al.(2000). Global Water Resources: Vulnerability from Climate Change and Population Growth. *Science*, 289, 284-288. Recuperado de <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/10894773>

Data de submissão: 27/dez./2019

Data de aceite: 27/jan./2021