



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS  
CAMPUS DE PALMAS  
PROGRAMA DE PROGRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS DO AMBIENTE**

**AVALIAÇÃO DE VULNERABILIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS À  
CONTAMINAÇÃO NA BACIA DO RIO URUBU, TOCANTINS**

**FÁBIO DA COSTA SILVA**

**PALMAS – TO  
2019**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

FÁBIO DA COSTA SILVA

**AVALIAÇÃO DE VULNERABILIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS À  
CONTAMINAÇÃO NA BACIA DO RIO URUBU , TOCANTINS**

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado e Doutorado em Ciências do Ambiente da Universidade Federal do Tocantins, como pré-requisito para obtenção do grau de Mestre em Ciências do Ambiente.

**Orientador:** Fernando de Moraes

**Linha de pesquisa:** Biodiversidade e Recursos Naturais

PALMAS – TO  
2019

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**  
**Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins**

---

S586a Silva, Fábio da Costa .

Avaliação de vulnerabilidade das águas subterrâneas à contaminação na bacia do rio Urubu, Tocantins. / Fábio da Costa Silva. – Palmas, TO, 2019.

104 f.

Dissertação (Mestrado Acadêmico) - Universidade Federal do Tocantins – Câmpus Universitário de Palmas - Curso de Pós-Graduação (Mestrado) em Ciências do Ambiente, 2019.

Orientador: Fernando de Moraes

1. Recursos hídricos. 2. Águas Subterrâneas. 3. Cobertura e uso da terra. 4. Vulnerabilidade. I. Título

**CDD 628**

---

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio deste documento é autorizado desde que citada a fonte. A violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime estabelecido pelo artigo 184 do Código Penal.

**Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFT com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).**

FABIO DA COSTA SILVA

**AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS À  
CONTAMINAÇÃO NA BACIA DO RIO URUBU, TOCANTINS**

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Curso de Mestrado em Ciências do Ambiente, da Universidade Federal do Tocantins, na linha de pesquisa Biodiversidade e Recursos Naturais

Data de Aprovação: 25/09/2019

Banca Examinadora:



Prof. Dr. Fernando de Moraes - Orientador



Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup> Liliana Pena Naval



Prof. Dr. Sandro Sidnei Vargas de Cristo

*Dedico este trabalho aos meus pais,  
Edmar Barbosa da Silva e Aiana  
Ferreira da Costa Silva.*

## AGRADECIMENTOS

A Deus pela contínua lembrança do motivo pelo qual eu vim à Terra, e pelo alento nos momentos mais difíceis desta etapa da minha vida.

Ao meu orientador, Fernando de Moraes, cuja paciência, profissionalismo e boa vontade têm sido inspirações para o término deste trabalho.

Aos meus pais, Adiana e Edmar, pelo suporte emocional, temporal e financeiro durante esses últimos anos de minha vida. Agradeço também pelo incentivo, compreensão e paciência que tem me oferecido de modo ilibado.

Ao meu irmão, Renato Costa e família, pelo apoio e incentivos demonstrados.

Aos meus avós, tios, tias e primos pelo o amor, consideração e incentivo.

À Aldeídes, que tem sido minha segunda mãe durante os últimos anos que estive fora de minha cidade natal.

Aos meus professores de graduação, Rose Mary e José Márcio Catalunha e suas respectivas famílias por todo o suporte emocional, incentivo e amizade.

A minha amiga Édima Xavier, a qual eu admiro muito e que desde muito cedo tem me ajudado a romper minhas crenças limitantes.

Aos meus amigos Adam, Eklesio, Evaristo, Helen, Kaio, Larissa, Sandi, Wdeljan, Wilderson e Yosha, pelo companheirismo e carinho.

Às famílias Ferreira, Wilson, Malta, Ramos, Cutrim e Cordon pelo carinho e suporte nas fases mais importantes de minha vida.

Aos meus amigos da ACES pelo suporte e apoio desde o primeiro momento em que começamos a trabalhar juntos.

Ao Programa de Pós-graduação em Ciências do Ambiente da Universidade Federal do Tocantins pela oportunidade de vislumbrar novos horizontes no conhecimento por meio de aulas e atividades que acrescentaram não somente a minha formação acadêmica como também a minha vida.

Ao meu amigo Daniel Santos por todo o suporte na construção desse trabalho.

A todos que contribuíram direta ou indiretamente para a concretização deste trabalho.

Agradeço à CAPES, uma vez que “o presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001”.

*“Gatinho de Cheshire” começou um pouco tímida, pois não sabia se ele gostaria do nome, mas ele abriu ainda mais o sorriso. “Vamos, parece ter gostado até agora”, pensou Alice, e continuou: “Poderia me dizer, por favor, que caminho devo tomar para sair daqui?”*

*“Isso depende bastante de onde você quer chegar”, disse o Gato.*

*“O lugar não importa muito...”, disse Alice.*

*“Então não importa o caminho que você vai tomar”, disse o Gato.. ”*

*Lewis Carrol, Alice no país das maravilhas.*

## RESUMO

A análise da vulnerabilidade das águas subterrâneas à contaminação de uma bacia compreende o estudo das características físicas intrínsecas que condicionam o comportamento dos aquíferos perante os riscos de contaminação inerentes aos diversos usos e coberturas que existem na superfície da terra. O objetivo principal deste trabalho é avaliar a vulnerabilidade das águas subterrâneas a contaminação na bacia do rio Urubu, Estado do Tocantins. Para a realização dos estudos foi empregado o índice VIX vulnerabilidade das águas subterrâneas, além da caracterização dos usos e cobertura da terra na bacia e outros dois índices complementares: índice NDWI (Índice de Diferença Normalizada de Água) para avaliar as áreas com maior conteúdo de água em superfície e o índice S de qualidade física do solo para diagnosticar áreas degradadas. A dissertação apresenta os resultados do artigo intitulado “Análise de vulnerabilidade das águas subterrâneas a contaminação.” Nesse estudo, foram selecionadas 15 áreas da bacia do rio Urubu que representaram as diferentes categorias de uso e cobertura previamente identificadas por um estudo do uso e cobertura da terra. O estudo permitiu construir um mapa de vulnerabilidade das águas subterrâneas mediante a aplicação do índice VIX. Além disso, buscou-se verificar áreas com maior tendência a acumulação de água por intermédio do índice NDWI. Os resultados demonstraram que a pouca profundidade do lençol freático influenciou na obtenção dos altos valores do índice VIX das áreas localizadas à oeste da bacia, indicando que os corpos subterrâneos da região estão mais suscetíveis à contaminação. Averiguou-se ainda que os valores NDWI positivos encontrados na região oeste da bacia corroboram a condição de vulnerabilidade das águas subterrâneas em virtude do maior conteúdo de água em superfície, uma vez que existe uma maior exposição dos recursos subterrâneos às atividades antrópicas. A seção de resultados desta dissertação apresenta também o artigo “Caracterização do uso e cobertura da terra e da qualidade física dos solos na bacia do Rio Urubu, Tocantins”. Por meio deste trabalho, buscou-se caracterizar o uso e a cobertura da terra na bacia do rio Urubu. O estudo buscou também analisar a qualidade física de 15 amostras de solos que foram extraídas dos diferentes usos e cobertura existentes. Observou-se que a bacia do rio Urubu ainda é coberta por 58% de vegetação nativa (formações savânicas e formações florestais) e que a atividade agropecuária ocupa 30% das terras circunscritas na área de estudo. Constatou-se também que, a despeito da natureza do uso ou cobertura da bacia, todas as amostras foram diagnosticadas como pertencentes a solos degradados em virtude da baixa qualidade física dos solos apontada pelo índice S. O estudo evidenciou a necessidade da utilização de práticas de manejo sustentáveis para garantir a qualidade física dos solos, e, conseqüentemente das águas superficiais e subterrâneas. De modo geral, os resultados apresentados nessa dissertação mostraram que existem áreas na porção oeste da bacia do rio Urubu onde, considerando os usos da terra predominantes e os valores de VIX e NDWI, existe um contexto de maior vulnerabilidade das águas subterrâneas à contaminação. Dessa forma, o presente estudo posiciona-se como uma relevante ferramenta na gestão dos recursos hídricos subterrâneos da bacia do rio Urubu.

**Palavras-chaves:** Águas subterrâneas, Vulnerabilidade, Índice VIX, NDWI, Índice S, Lagoa da Confusão.

## ABSTRACT

The analysis of the vulnerability of groundwater to the contamination of a basin comprises the study of the intrinsic physical characteristics that drive the behavior of aquifers under the risks of contamination which comes along with the variety of land uses and land covers that exists. The main objective of this work is to evaluate the vulnerability of groundwater to contamination in the Urubu river basin, Tocantins State. The groundwater vulnerability index VIX was used to perform the studies, as well as the characterization of land uses and land cover in the basin, and two other complementary indices: NDWI index (Normalized Water Difference Index) to identify areas with the highest water content on the land surface and the Soil Physical Quality S index to diagnose degraded areas. The dissertation presents the results of the article entitled “Analysis of groundwater vulnerability to contamination.” In this study, a total of 15 areas of the Urubu River basin were selected so that they represented the different categories of land use and land cover that were previously identified. The study made it possible to construct a groundwater vulnerability map by applying the VIX index. In addition, this work aimed to identify areas which are likely to accumulate water by using the NDWI index values. The results showed that the shallow depth of the groundwater influenced on the high values of the VIX index of the areas located to the west side of the basin, indicating that the groundwater in that region is more susceptible to contamination. It was also observed that the positive NDWI values found in the western basin corroborate the condition of groundwater vulnerability due to the higher water content in the soil which increases the groundwater exposure to the human activities. The results section of this dissertation also presents the article “Characterization of land use and land cover and physical quality of soils in the Urubu River basin, Tocantins”. The study’s objective was characterizing the land use and land cover in the Urubu River basin. The study also analyzed the physical quality of 15 soil samples that were extracted from different existing land uses and land cover. It was observed that the Urubu River basin is still covered by 58% of its native vegetation (savannas and forest formations) and that agricultural activity occupies 30% of the lands in the study area. Despite the nature of the land use or land cover of the basin, all soil samples were diagnosed as degraded soils due to the poor physical quality indicated by the S index. The study showed the need for sustainable management practices to ensure the physical quality of soils, and consequently surface and groundwater of the Urubu river basin. Overall, the results presented in this dissertation showed that there are areas in the western portion of the Urubu river basin where, considering the predominant land uses and the values of VIX and NDWI, there is a context of greater groundwater vulnerability to contamination. Thus, the present study is positioned as a relevant tool in the management of groundwater resources of the Urubu river basin.

**Key-words:** Groundwater, Vulnerability, VIX index, NDWI, S index, Lagoa da Confusão.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo.....	26
Figura 2 - Aspectos gerais da geologia da bacia hidrográfica do rio Urubu. ....	27
Figura 3 - Unidades e domínios geomorfológicos da bacia do rio Urubu.....	30
Figura 4 – Mapa dos solos da bacia do rio Urubu. ....	31
Figura 5 - Linha do tempo com principais eventos do processo de ocupação humana da bacia do rio Urubu.....	34
Figura 6 - Pontos selecionados para a medição da profundidade do lençol freático, onde A, B, C e D estão, respectivamente, localizados nos pontos amostrais 3, 11, 12 e 4. ....	40
Figura 7 - Interface para inserção dos dados de entrada no programa Qualisolo®.....	45
Figura 8 - Mapa de localização da área de estudo.....	50
Figura 9 - Mapa do Índice de Diferença Normalizada de Água da bacia do rio Urubu.....	57
Figura 10 - Mapa do Índice VIX de vulnerabilidade das águas subterrâneas à contaminação da bacia do rio Urubu. ....	60
Figura 11 - Representação gráfica do comportamento da profundidade com relação ao índice VIX. ....	61
Figura 12 - Mapa de localização da área de estudo. ....	73
Figura 13 - Mapa de uso e cobertura da bacia do rio Urubu,TO. ....	79

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classes de vulnerabilidade das águas subterrâneas à contaminação. ....	20
Quadro 2 – Algumas metodologias utilizadas na análise de vulnerabilidade das águas subterrâneas à poluição.....	22
Quadro 4 - Detalhamento metodológico com produtos e dados de entrada. ....	37
Quadro 5 – Classes de solos predominantes na bacia e respectiva pontuação quanto à capacidade de drenagem.....	38
Quadro 6 – Pontuação das classes de solo mediante as condições de drenagem dos solos. ....	54
Quadro 7 - Classes de solo e respectiva pontuação quanto à capacidade de drenagem .....	76

## LISTA DE ABREVIATURAS

ANA	Agência Nacional das Águas
CBERS	China-Brazil Earth-Resources Satellite
COBRAPE	Companhia Brasileira de Projetos e Empreendimentos
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
DNPM	Departamento Nacional de Pesquisa Mineral
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
GIS	Geographic Information Sytem
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
LANDSAT	Land Remote Sensing Satellite
NDWI	Normalized Diffrence Water Index
NOAA	National Ocean and Atmospheric Administration
ONU	Organização das Nações Unidas
QGIS	Quantum GIS
RADAM	Projeto Radar da Amazônia
SEPLAN	Secretaria de Planejamento do Estado do Tocantins
TM	Thematic Mapper
TO	Tocantins
TR	Retenção de Água
WMO	Organização Internacional de Meteorologia

## Sumário

<b>AGRADECIMENTOS .....</b>	<b>4</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>6</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>7</b>
<b>LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....</b>	<b>8</b>
<b>LISTA DE QUADROS .....</b>	<b>8</b>
<b>1. INTRODUÇÃO GERAL .....</b>	<b>13</b>
<b>1.2. Objetivos.....</b>	<b>16</b>
1.2.1. <b>Objetivo Geral:.....</b>	<b>16</b>
1.2.2. <b>Objetivos Específicos:.....</b>	<b>16</b>
<b>2. REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>17</b>
<b>2.1. Águas subterrâneas e aquíferos.....</b>	<b>17</b>
<b>2.2. Conceito de vulnerabilidade de águas subterrâneas à contaminação .....</b>	<b>18</b>
<b>2.3. Metodologias para a análise de vulnerabilidade das águas subterrâneas à contaminação .....</b>	<b>19</b>
<b>2.4. Índice de Diferença Normalizada de Água.....</b>	<b>22</b>
<b>2.5. Índice de Vulnerabilidade de Água Subterrânea à Contaminação – VIX .....</b>	<b>23</b>
<b>2.6. Índice de qualidade do solo (S).....</b>	<b>24</b>
<b>3. METODOLOGIA .....</b>	<b>26</b>
<b>3.1. Área de estudo.....</b>	<b>26</b>
<b>3.2. Geologia .....</b>	<b>27</b>
3.2.1. Grupo Tocantins.....	28
3.2.2. Cobertura Sedimentar do Bananal/Formação Araguaia .....	28
3.2.3. Aproveitamento mineral .....	28
<b>3.3. Geomorfologia.....</b>	<b>29</b>
<b>3.4. Solos .....</b>	<b>30</b>
<b>3.5. Vegetação.....</b>	<b>32</b>
<b>3.6. Uso e ocupação .....</b>	<b>33</b>
3.7. Projetos de irrigação na área de estudo .....	35
3.8. Exploração de recursos minerais .....	36
3.9. Produção dos mapas temáticos e do uso e cobertura da terra.....	36
<b>3.10. Seleção das áreas amostradas .....</b>	<b>37</b>
<b>3.11. Índice de Diferença Normalizada de Água.....</b>	<b>38</b>

<b>3.12. Índice de Vulnerabilidade de Água Subterrânea à Contaminação – VIX</b>	<b>39</b>
3.12.1. Profundidade do corpo d'água subterrâneo	39
3.12.2. Recarga hídrica anual	40
3.12.3. Umidade na capacidade de campo	41
<b>3.13. Índice de qualidade do solo (S)</b>	<b>42</b>
3.13.1. Coleta das amostras de solo indeformadas e deformadas	43
3.13.2. Densidade Global do solo	43
3.13.3. Densidade de partícula do solo	43
3.13.4. Curva granulométrica	44
3.13.5. O uso do Qualisolo®	44
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>46</b>
<b>4.1. Análise de vulnerabilidade das águas subterrâneas à contaminação na bacia do rio Urubu, Tocantins</b>	<b>46</b>
4.1.1. <b>Resumo</b>	46
4.1.2. <b>Abstract</b>	46
4.1.3. Introdução	47
4.1.4. Metodologia	49
4.1.4.1. Área de estudo	49
4.1.4.2. Índice de Diferença Normalizada de Água - <i>NDWI</i>	52
4.1.4.3. Índice de Vulnerabilidade de Água Subterrânea à Contaminação – VIX	53
4.1.4.3.1. Profundidade do corpo d'água subterrâneo	55
4.1.4.3.2. Recarga hídrica anual	55
4.1.4.3.3. Umidade do solo na capacidade de campo	56
4.1.5. Resultados e discussão	57
4.1.5.1. Índice de Diferença Normalizada de Água – <i>NDWI</i>	57
4.1.5.2. Índice VIX de Vulnerabilidade das águas subterrâneas à contaminação	59
4.1.6. Considerações finais	63
4.1.7. Referências Bibliográficas	63
<b>4.2. Qualidade física dos solos e sua relação com o uso da terra na bacia do Rio Urubu, Tocantins</b>	<b>69</b>
4.2.1. Resumo	69
4.2.2. Abstract	70
4.2.3. Introdução	70
4.2.4. Material e métodos	73
4.2.4.2. Índice S de qualidade do solo	77
4.2.5. Resultados e Discussão	78

4.2.6. Conclusão.....	83
4.2.7. Referências bibliográficas.....	84
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>91</b>
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	94

## 1. INTRODUÇÃO GERAL

A negligência no manejo dos recursos hídricos tornou-se uma ameaça à disponibilidade de água com qualidade para diversos fins. Por meio de projeções, a Organização das Nações Unidas tem advertido que o consumo mundial de água subterrânea deve continuar a aumentar a taxa anual de 1 a 2%, e por isso muitos conflitos surgirão em virtude da escassez de água em países cuja demanda e a exploração deste recurso ultrapassam às condições naturais de recarga dos aquíferos (UNESCO, 2012). Em muitos casos, o maior desafio é garantir a qualidade da água independentemente se a mesma está armazenada superficialmente (lagos, rios, oceanos) ou em subsuperfície (águas subterrâneas).

Um dos princípios norteadores da gestão sustentável da água enfatiza que o gerenciamento da mesma deve ser baseado na participação dos usuários, dos gestores e dos formuladores de políticas em todos os níveis (ANA, 2011). Baseando-se nessa perspectiva, fica evidente que os comitês de bacias, universidades e sociedade civil detêm grande responsabilidade na gestão dos recursos hídricos.

Foster (2012) define que a vulnerabilidade que os sistemas subterrâneos apresentam à contaminação está relacionada à fragilidade natural que o meio apresenta quando exposto a fontes pontuais ou difusas de poluição. Por conseguinte, a análise das características pedológicas e hidrogeológicas locais possibilita a geração de dados de entradas que, metodologicamente, são empregados na obtenção dos índices de avaliação da vulnerabilidade das águas subterrâneas à contaminação. Além disso, tais índices podem ajudar na elaboração de políticas públicas que contemplem as peculiaridades de cada sistema aquífero, ou que pelo menos respeitem as características hidrológicas e hidrogeológicas regionais.

A integração dos dados coletados em campo ou por meio de um programa GIS permite a geração de mapas de vulnerabilidade das águas subterrâneas à contaminação, os quais norteiam as políticas de exploração da terra e de gerenciamento dos aquíferos de uma bacia (MESTRINHO et al., 2006; ZOBY, 2008; DUARTE et al., 2016).

A análise de outras propriedades espaciais e físico-químicas é essencial no processo de identificação de áreas vulneráveis à contaminação. Dessa maneira, o estudo de imagens de satélite para a determinação do Índice de Diferença Normalizada de Água (*Normalized Difference Water Index*, cuja sigla em inglês é NDWI) permite a

identificação de áreas cujas feições naturais e artificiais da topografia levam à acumulação de água (MCFEETERS, 2013; RODRIGUES, MORAIS, PASCHOAL, 2017).

No Estado do Tocantins, 67,62% dos municípios captam água subterrânea para o abastecimento público (ANA, 2010). A adoção dessa modalidade de captação demanda um constante monitoramento das atividades potencialmente poluidoras, pois uma vez em contato com o solo, os contaminantes gerados tendem a percolar em direção às fontes subterrâneas de abastecimento. Portanto, a categorização das condições intrínsecas de vulnerabilidade à contaminação de um sistema hídrico subterrâneo deve estar entre os fatores que compõem os estudos de avaliação de impactos ambientais – EIA de atividades com potencial poluidor (LEAL, 1994, VIANA, MACHADO, LOUREIRO, 2002; SABADINI et al., 2017).

A bacia hidrográfica do rio Urubu está localizada na porção sudoeste do Estado do Tocantins, constituindo um tributário da bacia hidrográfica do rio Formoso. As áreas adjacentes ao rio Urubu e seus tributários já foram objeto de diversos estudos ambientais que buscaram compreender a evolução da paisagem natural e socioeconômica (MARTINS, 2002; WALKIN, 2010; ARRUDA, VALDEVINO, 2014; OLIVEIRA, 2014).

Há uma diversidade na matriz de cobertura e no uso dos solos da bacia hidrográfica do rio Urubu. Tal característica foi determinante para que essa bacia tenha sido o objeto de avaliação de susceptibilidade das águas subterrâneas à contaminação do presente estudo. Lima (2010) destacou que na área de estudo podem ser encontradas atividades agropecuárias tais como a pecuária de corte e para a produção leiteira, monoculturas de arroz, soja e feijão. Outra atividade relevante é a extração de minérios (seixo, calcário, areia), além dos usos de natureza econômica dos espaços urbanizados.

Apesar das condições naturais que facultam o cultivo irrigado de leguminosas e cereais; a expansão do agronegócio carece de planejamento criterioso, assim como requer o atendimento às demandas ambientais locais (TOCANTINS, 2007). A falta de planejamento no processo de ocupação do espaço, combinada aos cenários críticos de vulnerabilidade dos recursos hídricos subterrâneos, criam condições para a contaminação dos mesmos por metais pesados, efluentes, fertilizantes e outras substâncias nocivas ao ser humo (ZOBY, 2008; BISPO, OLIVEIRA, 2015).

Este estudo propõe-se a identificar áreas da bacia hidrográfica do rio Urubu que se apresentam mais susceptíveis à contaminação das águas subterrâneas, e para tal análise

é relevante entender as propriedades físicas/espectrais do solo e do aquífero, assim como a organização das atividades potencialmente poluidoras dentro da bacia. O presente trabalho poderá subsidiar o processo de tomada de decisão dos gestores municipais e de comitê de bacia do rio Formoso/Urubu, levando ao uso de instrumentos políticos e socioambientais que visem o uso sustentável dos recursos hídricos subterrâneos. Dessa forma, a análise da vulnerabilidade das águas subterrâneas da bacia hidrográfica do rio Urubu é uma valiosa ferramenta para a gestão dos recursos naturais, uma vez que utiliza metodologias quantitativas como os índices VIX de vulnerabilidade das águas subterrâneas e S de qualidade do solo (com o uso do programa Qualisolo® – EMBRAPA SOLOS), bem como a descrição dos aspectos socioeconômicos inerentes ao uso e cobertura dos solos da bacia.

## 1.1. Objetivos

### 1.1.1. Objetivo Geral:

O presente estudo visa analisar a vulnerabilidade natural das águas subterrâneas da bacia hidrográfica do rio Urubu.

### 1.1.2. Objetivos Específicos:

O presente estudo tem por objetivos específicos:

- Compreender a composição da paisagem e a natureza das atividades antrópicas existentes na bacia hidrográfica do rio Urubu por meio da geração do mapa de cobertura e uso da terra.
- Calcular o índice VIX em pontos amostrados da bacia hidrográfica a fim de indicar o grau de vulnerabilidade das águas subterrâneas à contaminação.
- Identificar as áreas da bacia que estão suscetíveis a alagamentos, e consequentemente, mais vulneráveis à contaminação.
- Identificar áreas degradadas e não-degradadas por meio da aplicação do Índice S de qualidade física dos solos.
- Caracterizar a vulnerabilidade das águas subterrâneas à contaminação por meio da correlação da dinâmica de ocupação e uso da terra da bacia com os índices VIX, S e NDWI.

## **2. REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1. Águas subterrâneas e aquíferos**

Apesar da água doce representar apenas 2,5% do volume total de água do planeta Terra, ela é essencial na manutenção dos ecossistemas terrestres. Essa pequena porcentagem está distribuída entre rios, lagos, reservatórios, aquíferos e geleiras. As águas subterrâneas, por sua vez, correspondem a 1,7% do volume total de água do planeta, ou seja, equivale a mais de 60% das reservas mundiais de água doce. No Brasil, a distribuição da água doce não é homogênea, uma vez que 70% das reservas de água estão localizadas na região Norte do país (BRAGA et al., 2005; CALIJURI; FERNANDES, 2013).

As águas subterrâneas possuem poucos sólidos suspensos, baixa concentração de bactérias e vírus e, dependendo do contexto geológico, baixas concentrações de sais minerais. Tais características fazem das águas subterrâneas uma excelente alternativa para o consumo humano. No Brasil, as águas subterrâneas desempenham papel fundamental para os sistemas de abastecimento público e privado. Estima-se que 30-40% da população brasileira dependa dessa fonte de abastecimento de água (SCHWARTZ; ZHANG, 2003; HIRATA; ZOBY; OLIVEIRA, 2010).

Os aquíferos são formações ou grupos de formações geológicas capazes de armazenar e transmitir água. Podem ser divididos de acordo com a pressão à qual estão submetidos, sendo, portanto, classificados como freáticos ou livres, quando a pressão no aquífero é igual à pressão atmosférica; e confinados ou artesianos em que a pressão é superior à pressão da atmosfera (CALIJURI; FERNANDES, 2013).

Quanto a porosidade, existem três classes de aquífero: aquífero poroso, fraturado (fissural) e cárstico. Os aquíferos porosos são caracterizados por meios geológicos em que os espaços vazios são intergranulares e, por isso, permitem a acumulação de água entre os minerais constituintes do corpo rochoso ou solo. Por outro lado, os aquíferos fraturados são caracterizados por meio geológico rochoso, onde a água ocupa os planos de fraturas, diáclases, microfaturas, zonas de cisalhamento e falhas. No aquífero cárstico, a água se movimenta através dos canais e fraturas resultantes da dissolução das rochas carbonatadas (CAMPOS, 2004, GUERRA, 1986).

## 2.2. Conceito de vulnerabilidade de águas subterrâneas à contaminação

O estudo de vulnerabilidade das águas subterrâneas é vital para uma gestão eficaz dos recursos hídricos subsuperficiais. A sentença “vulnerabilidade das águas subterrâneas à contaminação” foi proposta por Jean Margat nos anos 1960 (VRBA; ZAPOROZEC, 1994). Naquela mesma década nos Estados Unidos, o pesquisador Le Grand também adotou a terminologia, contudo, não havia uma definição formal de vulnerabilidade no contexto de gerenciamento dos recursos hídricos. O emprego dessa terminologia advém do pressuposto de que o sistema “solo-rocha-água subterrânea” deve ofertar uma resistência natural aos contaminantes. Dessa forma, o conceito de vulnerabilidade das águas subterrâneas pode ser entendido como a sensibilidade/suscetibilidade que tais águas apresentam mediante o contato com cargas poluentes de natureza antropogênica. Sendo assim, o conceito está ligado ao interesse de entender a dimensão das consequências caso o aquífero seja exposto a quaisquer fontes poluidoras (SILVA et al., 2003; NANINE et al., 2005; FOSTER, 1998).

Foster (1998) ainda esclarece que de modo prático, a vulnerabilidade das águas subterrâneas combina duas variáveis:

- a) A inacessibilidade da zona saturada, no sentido hidráulico, à penetração de cargas de poluentes.
- b) A capacidade de atenuação das camadas superficiais a zona de saturada em função de retenções físico-químicas ou reações.

A definição de vulnerabilidade natural de um aquífero depende também do estudo das suas características mais importantes tais como extensão, área de recarga, espessura, profundidade do nível de água, qualidade das águas e parâmetros hidrodinâmicos. Com base nessa visão, nota-se que a vulnerabilidade natural está correlacionada às propriedades intrínsecas do próprio aquífero. Em muitos casos, o aquífero pode ser vulnerável a determinados tipos de contaminantes e menos propenso a outros, tal condição é então tratada como vulnerabilidade específica (FERREIRA, 1998; CONEJO et al., 2007).

Zarapozec (2002) explana que a qualidade das águas subterrâneas é impactada pelas suas características físicas, químicas e biológicas, assim como pelas indicações do uso desse recurso. A autor explica ainda que a maior ameaça às águas subterrâneas são as

atividades humanas, ainda que comumente as substâncias contaminantes sejam introduzidas no solo por meio de processos naturais.

Conejo et al. (2007) complementam a abordagem sobre vulnerabilidade das águas subterrâneas declarando que a maior ou menor susceptibilidade à contaminação do aquífero é determinado pela: a) acessibilidade da zona de saturação à entrada de poluentes, b) a capacidade de atenuação do sistema, c) modo de disposição no solo ou em subsuperfície, d) mobilidade dos poluentes nas fases sólida/líquida e a persistência do poluente, isto é, a resistência que o mesmo oferece as intempéries físico-químicas e biológicas.

É importante destacar que geralmente o termo “vulnerabilidade à poluição” é usado como sinônimo de “risco de poluição”. No entanto, o risco de poluição depende da existência de cargas poluentes que venham a contaminar as águas subterrâneas em um contexto de vulnerabilidade intrínseca do aquífero. Portanto, um aquífero pode ter alto índice de vulnerabilidade, mas não apresentar o risco de poluição em virtude da ausência de poluentes (NANNI et al., 2005).

### **2.3. Metodologias para a análise de vulnerabilidade das águas subterrâneas à contaminação**

Foster et al. (2002) explanam que para utilizar um modelo que avalie a vulnerabilidade do aquífero à poluição, é necessário buscar metodologias que apresentem um único índice integrado de vulnerabilidade ou que trabalhe com a vulnerabilidade particular a um determinado poluente. Além disso, é recomendado o uso de métodos que forneçam um valor absoluto de vulnerabilidade à poluição ou restrinja as saídas do modelo aos resultados que sejam úteis para a avaliação.

O Quadro 1 elenca as classes de vulnerabilidade à poluição que as águas subterrâneas estão expostas.

Quadro 1 – Classes de vulnerabilidade das águas subterrâneas à contaminação.

Classe de vulnerabilidade	Definição
Extrema	Vulnerável à maioria dos poluentes, ocorrências de impactos em muitos cenários de poluição.
Alta	Vulnerável à muitos poluentes (exceto aqueles que são fortemente absorvidos ou prontamente transformados) em muitos cenários de poluição.
Moderada	Vulnerável a alguns poluentes, mas somente quando há derramamentos ou vazamentos constantes.
Baixa	Vulnerável somente a longo prazo a poluentes conservativos quando há exposição contínua e abundante à derramamentos ou vazamentos.
Negligenciável	Há camadas confinantes que não permitem o fluxo vertical de água subterrânea.

Fonte: Foster et al. (2002).

No que se refere às metodologias empregadas nos estudos de vulnerabilidade, Foster et al. (2002) mostraram que o índice do método GOD é gerado a partir de agregação de índices aos fatores: tipo de aquífero (*Groundwater occurrence*), tipo de litologia existente no aquífero (*Overall lithology of the aquifer or aquifer*) e a profundidade do nível freático (*Depth to groundwater*).

Outro método baseado em índices é o DRASTIC, cuja nomenclatura advém dos próprios fatores que são empregados na Equação 1, que consiste em uma soma ponderada de fatores.

$$\text{DRASTIC} = \text{D} \times \text{wD} + \text{R} \times \text{wR} + \text{A} \times \text{wA} + \text{S} \times \text{wS} + \text{T} \times \text{wT} + \text{I} \times \text{wI} + \text{C} \times \text{wC} \quad (1)$$

Em que: *Depth to water* - profundidade até o nível d'água, *net Recharge* – Rede de recarga, *Aquifer media* – tipologia do material do aquífero, *Soil media* – Textura do solo, *Topography* – topografia, *Impact of vadose zone media* – Impacto sobre a textura da zona vadosa, *Conductivity* – condutividade hidráulica (ALLER et al., 1987). Apesar da praticidade do método DRASTIC, uma de suas maiores controvérsias está relacionada a subjetividade da determinação do sistema dos coeficientes e pesos adotados por aqueles que executam do método (ANTONAKOS, LAMBRAKIS, 2007).

No Brasil, os métodos GOD e DRASTIC têm sido implementados conforme as pesquisas listadas a seguir:

- Linhares et al. (2013), usando o método DRASTIC na bacia hidrográfica do rio Gramame, Estado da Paraíba, identificaram que existe alta vulnerabilidade para a contaminação das águas subterrâneas da bacia, sendo que 49,09% da área em estudo encontra-se nessa classe de vulnerabilidade.
- Ferron e Reginato (2014) utilizaram o método GOD para mostrar que existe de baixa a insignificante vulnerabilidade à contaminação em um aquífero localizado na região central do Canoas, Rio Grande do Sul. Tal resultado estava relacionado à natureza da textura das camadas em contato com o nível d'água, em que havia o predomínio de argilas e silte.
- Adotando o método GOD, Pereira, Soares e Castro (2015) observaram que 53,91% do aquífero Bauru, município de Rio Verde – GO, está sob condições de vulnerabilidade moderada à contaminação por poluentes, contudo o estudo apontou que o uso isolado do método GOD pode levar a resultados poucos confiáveis, uma vez que o método exclui a interferência humana nos recursos hídricos subterrâneos.
- Em Lagoa da Confusão – TO, Oliveira (2014) avaliou a vulnerabilidade dos aquíferos naquele município por intermédio do método geoeletrico e pelo método GOD. Em virtude do maior volume de dados, a autora observou que o método geoeletrico foi mais eficiente para detectar a vulnerabilidade dos aquíferos estudados, sendo que o referido método revelou ser baixa ou desprezível a vulnerabilidade das águas subterrâneas à poluição.

Santos et al. (2010) sumarizaram outros métodos de investigação de vulnerabilidade intrínseca de aquíferos à poluição (Quadro 2). Apesar de diversidade de análises que podem aferir à vulnerabilidade, os métodos de índices destacam-se na literatura uma vez que classifica de modo individual os parâmetros dos aquíferos dentro de faixas numéricas (índices). Posteriormente, são gerados mapas de cada atributo analisado, sendo que tais mapas são posteriormente sobrepostos a fim de identificar as áreas do aquífero mais vulneráveis.

Quadro 2 – Algumas metodologias utilizadas na análise de vulnerabilidade das águas subterrâneas à poluição

<b>Métodos</b>	<b>Avaliação</b>	<b>Fatores</b>
<b>ΔHT'</b>	Vulnerabilidade em aquífero semiconfinado	Potencial hidráulico e transmissividade vertical.
<b>IS</b>	Vulnerabilidade geral	Profundidade da água, recarga, litologia, topografia e ocupação do solo.
<b>EPPNA</b>	Vulnerabilidade geral	Características litológicas e hidrogeológicas
<b>EPIK</b>	Vulnerabilidade geral	Carstificação superficial, cobertura de proteção, infiltração e rede cárstica.
<b>EKv</b>	Vulnerabilidade geral	Espessura da zona subsaturada e permeabilidade da zona saturada.
<b>AVI</b>	Vulnerabilidade geral	Espessura da camada acima do aquífero e condutividade hidráulica
<b>SANEAMENTO IN SITU</b>	Vulnerabilidade e saneamento in situ	Tipo de aquífero, litologia da zona vadosa, profundidade e qualidade da água.
<b>SINTACS</b>	Vulnerabilidade geral	Profundidade da água, tipo de solo, infiltração, aquífero, camada subsaturada, condutividade, topografia.
<b>GOD</b>	Vulnerabilidade geral	Tipo de aquífero, litologia da zona vadosa, profundidade da água.
<b>POTENTIAL WASTE SITES (PWDS)</b>	Disposição de resíduos sólidos	Vulnerabilidade, confinamento, proximidade da fonte, tipo e quantidade do contaminante, velocidade da zona saturada, percolação.
<b>GROUNDWATER VULNERABILITY MAP FOR NITRATE</b>	Potencial de lixiviação de nitrato	Tipo de solo, características hidráulicas, e litologia do aquífero.
<b>DRASTIC</b>	Vulnerabilidade geral	Profundidade água, recarga, aquífero, solo, topografia, impacto, condutividade hidráulica.
<b>LANDFILL SITE RANKING</b>	Aterros sanitários	Distância aterro/poço, gradiente, permeabilidade e capacidade de atenuação.
<b>SITE RANKING METHODOLOGY</b>	Disposição de resíduos sólidos	Receptor, população, uso e profundidade da água, degradação, caminhos, contaminação, pluviosidade, permeabilidade do solo, características do resíduo, manejo e operação.
<b>WASTE-SOIL INTERACTION MATRIX</b>	Disposição de resíduos sólidos e líquidos	Efeitos na saúde, características e comportamento do produto, capacidade de atenuação do solo, hidrografia.
<b>POLUIÇÃO DOS LENÇÓIS AQUÍFEROS</b>	Vulnerabilidade geral	Geologia (litologia e estrutura).
<b>SITE RANKING SYSTEM</b>	Disposição de produtos químicos	Solo, características hidráulicas, sorção e tamponamento químico, hidrodinâmica, ar, população.

Fonte: Santos et al. 2010

## 2.4. Índice de Diferença Normalizada de Água

O índice de diferença normalizada da água (NDWI) foi desenvolvido com o propósito de delinear ambientes de águas abertas, sendo capaz de automatizar a determinação do limiar entre água e terra. A versão em inglês da nomenclatura é *Normalized Difference Water Index*, que conseqüentemente, gerou a sigla que é

comumente usada para se referir ao índice, isto é, NDWI. O índice é capaz de maximizar a reflectância típica da água utilizando a banda verde. Além disso, o método minimiza a baixa reflectância dos corpos hídricos no infravermelho próximo, e por fim, o NDWI realça o contraste entre a água e a cobertura vegetal, dada a ação do infravermelho próximo. O índice de diferença Normalizada é calculado de acordo com a seguinte operação entre as bandas espectrais (GAO, 1996; MCFEETRS, 1999).

$$NDWI = \frac{TM2-TM4}{TM2+TM4} \quad (\text{Landsat 5}) \quad (2)$$

$$NDWI = \frac{TM3-TM5}{TM3+TM5} \quad (\text{Landsat 8}) \quad (3)$$

$$NDWI = \frac{B2 - B4}{B2+B4} \quad (\text{CBERS 4}) \quad (4)$$

Onde, NDWI é o índice de diferença normalizada de água; TM2 e TM3 representam a faixa espectral verde visível, e TM4 e TM5 são as bandas que compreendem a faixa espectral do infravermelho. As Equações 2, 3 e 4 apresentam as adequações necessárias caso os valores de NDWI sejam extraídos do satélite Landsat 8, Landsat 5 e e CBERS 4, respectivamente.

Mcfetrs (1996) estabeleceu que o índice pode variar entre -1 e +1, sendo que para valores negativos de NWDI indicam a predominância de solo com relação à água, e para valores positivos apontam ambientes com maior quantidade de água disponível, sendo que quanto mais positivo, menor a turbidez da água. O índice é útil na identificação das áreas que tendem acumular mais água (áreas alagadas), e dessa forma, aumentam a conectividade com as águas subterrâneas (BRENNER; GUASSELLI, 2015; RODRIGUES, MORAIS, PASCHOAL, 2017).

## 2.5. Índice de Vulnerabilidade de Água Subterrânea à Contaminação – VIX

O índice de vulnerabilidade de águas subterrâneas à contaminação VIX é encontrado através do modelo desenvolvido por Spadoto (2014), que utiliza parâmetros hidrológicos e físicos do solo para sua obtenção. A Equação 5 fornece o modelo do índice VIX.

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

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

Mingoti, Spadoto e Moraes (2016) desenvolveram posteriormente o índice de retenção de água (índice TR), que é um modelo que também adota as mesmas variáveis do índice VIX, no entanto, o índice TR considera o fator de retardamento do solo, o qual depende de variáveis físicas e químicas. Ambos os índices foram aplicados em áreas do cerrado com o propósito de avaliar a vulnerabilidade das águas subterrâneas à contaminação.

## 2.6. Índice de qualidade do solo (S)

Dexter (2004) esclarece que o índice S busca avaliar a qualidade física dos solos, baseando-se no ponto de inflexão do modelo da curva de retenção de água do solo a ser trabalhado. O autor propõe que quanto maior o valor do índice S, melhor a estruturação do solo e distribuição dos poros. Maia (2011) detalha que os valores de índice S que sejam maiores do que 0.035 são típicos de solos bem estruturados, já valores inferiores ao valor anteriormente citado estão relacionados a solos com baixa qualidade física.

O índice S é obtido por meio do software Qualisolo® – Embrapa Solo, o qual adota em seu algoritmo a curva de retenção de água no solo proposta por Van Genuchten (1980), conforme a Equação 6.

$$\theta = (\theta_{sat} - \theta_{res})[1 + (\alpha h)^n]^{-m} + \theta_{res} \quad (6)$$

Onde  $\theta$ ,  $\theta_{sat}$  e  $\theta_{res}$  são, respectivamente, os conteúdos de água do solo correspondentes à tensão  $h$ , em condições de saturação e umidade residual, em  $\text{kg.kg}^{-1}$ ;  $h$  é a tensão matricial da água do solo, em kPa,  $n$  e  $m$  ( $m = 1 - 1/n$ ) são coeficientes empíricos adimensionais de ajuste e  $\alpha$  é um parâmetro expresso em  $\text{kPa}^{-1}$ . Os parâmetros que compõem a equação de van Genuchten são obtidos através do software Qualisolo® – Embrapa Solos, cujos dados de entrada consistem em densidade global do solo, densidade de partícula, e percentuais granulométricos. O programa é capaz de gerar as curvas de retenção de água no solo, textura granulométrica e o índice de qualidade do solo (S), sendo este último, o indicador de degradação do solo.

Ao analisar 2.364 amostras de solo de cerrado das regiões Norte, Nordeste, Centro-oeste, Andrade e Stone (2009) constataram que os solos que apresentaram índices S inferiores a 0,025 se encontravam integralmente degradados, enquanto solos com valores superiores a 0,045 possuíam boa estrutura física. Os autores ainda observaram uma alta correlação entre os valores de índice S encontrados com a densidade do solo, porosidade total e macroporosidade, o que ratifica a premissa de que o índice é um indicador adequado da qualidade física de solos de cerrado.

Silva et al. (2012) estudaram uma área de cerrado no município de Lavras – MG, e também apontaram uma alta correlação entre os parâmetros físicos usados e o índice S encontrado na área de estudo. Dessa forma, é possível notar que diversos estudos tem caracterizado o índice S como uma excelente ferramenta para identificar a condição de degradação dos solos.

É interessante pontuar que o índice S de qualidade do solo tende a diminuir à medida que os valores de densidade global do solo aumentam. Portanto, solos com maior compactação (maior densidade global) tendem a ser mais limitantes à percolação de água, e dessa forma, retardam a entrada de contaminantes (BATISTA, 2016). Solos com condições físicas pouco favoráveis devido à densidade global, isto é, solos mais compactados, demandam maiores intervenções antrópicas para atender as necessidades do uso proposto. Após os procedimentos de aragem, por exemplo, tais solos tendem a facilitar a infiltração e a percolação em seus perfis e, por conseguinte, aumentam a vulnerabilidade das águas subterrâneas à contaminação.

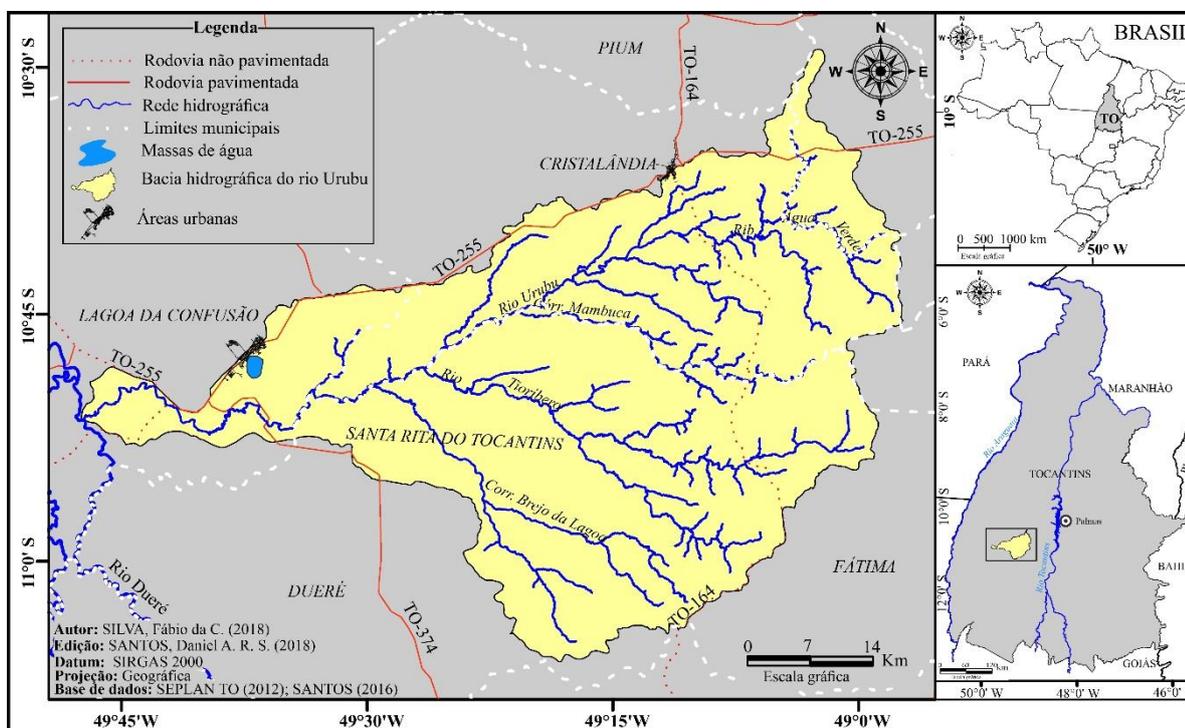
### 3. METODOLOGIA

#### 3.1. Área de estudo

O estudo foi realizado na porção sudoeste do Estado do Tocantins, tendo como foco a bacia hidrográfica do rio Urubu, uma das sub-bacias de drenagem do rio Formoso (Figura 1). A área selecionada engloba porções dos seguintes municípios: Lagoa da Confusão, Pium, Cristalândia, Nova Rosalândia, Crixás do Tocantins, Fátima e Santa Rita do Tocantins. Os municípios de Lagoa da Confusão e Cristalândia possuem maior destaque dentro da bacia quanto ao número de habitantes, sendo que no primeiro moram 10.210 habitantes enquanto no segundo residem 7.234 pessoas (IBGE, 2019).

A bacia hidrográfica do rio Urubu possui uma área de 2.702,26 km<sup>2</sup> e está enquadrada entre as coordenadas geográficas 49° 15' 2" e 48° 57' 52" de Longitude Oeste e, 10° 30' 3" e 11° 4' 37" de Latitude Sul. O rio Urubu tem como principais afluentes os rios Tioribero (à margem esquerda) e o ribeirão Barreiro (à margem direita).

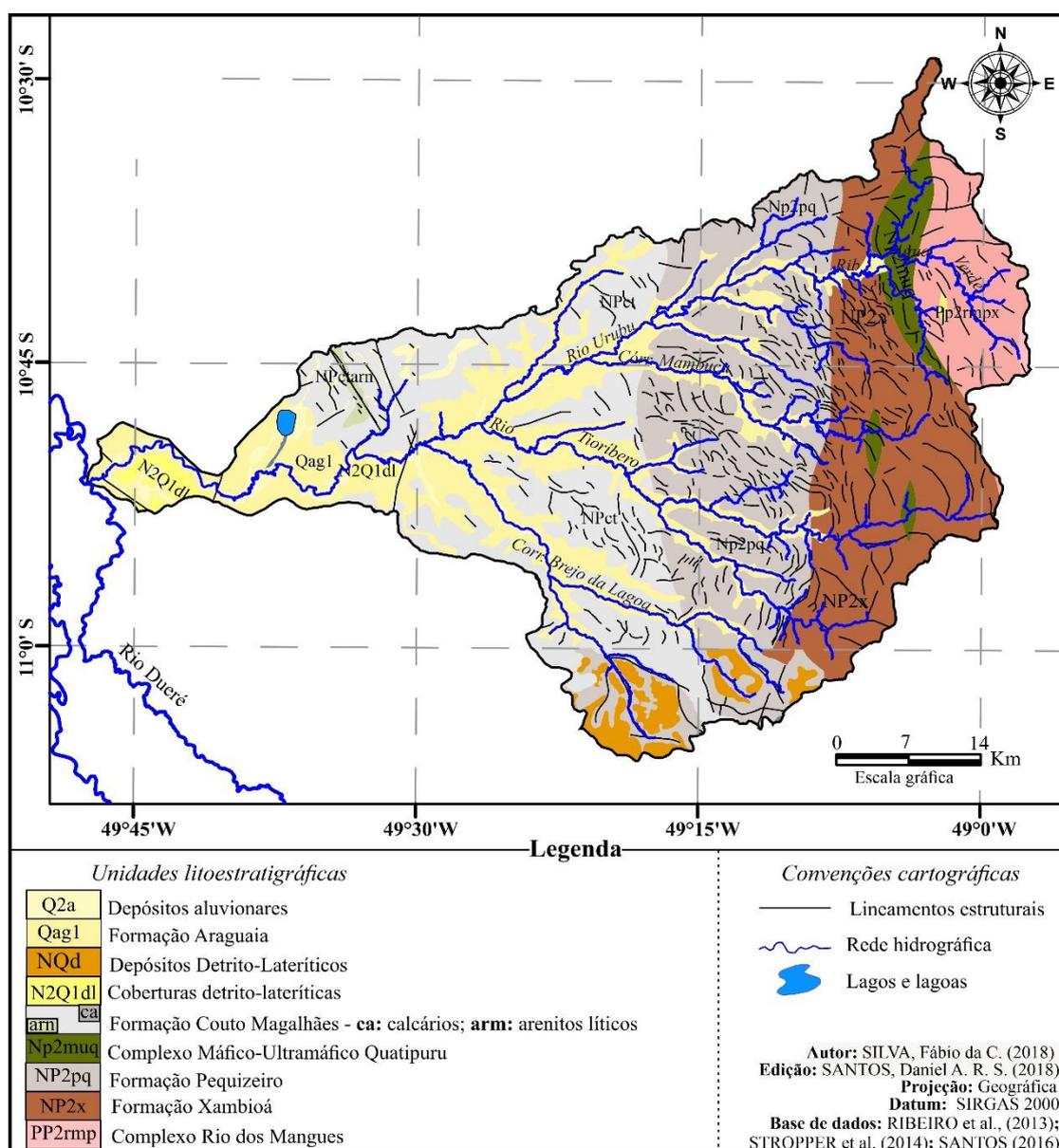
Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo.



### 3.2. Geologia

Oliveira (2004) e Pereira (2016) apontaram que existem poucos estudos sobre a geologia local, uma vez que as referências mais contempladas são do Projeto Radar da Amazônia - RADAM e estudos da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - CRPM que, em geral, estão disponíveis em escalas que não detalham a diversidade de estruturas geológicas locais. A figura 2 mostra as unidades litoestratigráficas identificadas na área estudo (SEPLAN, 2012).

Figura 2 - Aspectos gerais da geologia da bacia hidrográfica do rio Urubu.



Fonte: SEPLAN (2012); Santos (2016)

### 3.2.1. Grupo Tocantins

O Grupo Tocantins está sobreposto por sedimentos quaternários da Cobertura Sedimentar do Bananal, juntamente a depósitos aluvionares, arenosos e argilosos (PEREIRA; MORAIS, 2012).

Além de ocupar a porção oeste do Cinturão do Araguaia, o Grupo Tocantins é constituído pelas formações Couto Magalhães e Pequizeiro (Figura 2). A primeira exhibe fácies metamórficas de muscovita-clorita-quartzo, xistos, filitos e quartzitos. A Formação Pequizeiro apresenta filitos, ardósias, quartzitos, metarenitos, metarcosios e metacalcários (GORAYEB, 1981, 2011).

### 3.2.2. Cobertura Sedimentar do Bananal/Formação Araguaia

O projeto RADAM Brasil usou a nomenclatura “Cobertura Sedimentar Quaternária do Bananal” para se referir aos sedimentos da Formação Araguaia (Figura 2). Tal formação é constituída por sedimentos continentais inconsolidados, tendo como base um conglomerado seguido de siltes, e areias siltosas cujas colorações variam de amarela à castanho amarelada. Esses depósitos formam uma espessa camada que se assenta a uma profundidade de 170 a 320 m. Os rios Araguaia, Javaés e Formoso do Araguaia compõem o conjunto de corpos hídricos que drenam a Cobertura Sedimentar do Bananal (MORETON, 2001; VIEIRA, 2002; GORAYEB, 2011 MORETON, 2001; VIEIRA, 2002).

Ainda de acordo com Gorayeb (2011), a região está em processo de subsidência diferencial e deposição atual, sendo dessa forma, uma planície de natureza flúvio-lacustre em virtude da quantidade de lagoas e canais intermitentes, cujo padrão de drenagem é descrito como anastomosado. O mesmo autor ainda destaca que a predominância de áreas aplainadas facultam os processos naturais de inundação durante o período mais chuvoso.

### 3.2.3. Aproveitamento mineral

Há uma grande diversidade mineral na área dos municípios que compõem a bacia hidrográfica do rio Urubu. É possível destacar a exploração de calcário e cristais de

quartzo, nos municípios de Lagoa da Confusão e Cristalândia, respectivamente. A extração de areia no leito de rios é outra atividade comum nos demais municípios da bacia hidrográfica, exceto para a cidade de Santa Rita do Tocantins, em que não foram registradas quaisquer atividades licenciadas para o aproveitamento mineral (SEPLAN, 2007; DNPM, 2010).

### **3.3. Geomorfologia**

A porção centro-leste da bacia hidrográfica do rio Urubu apresenta faixas de dobramentos ou coberturas metassedimentares, sendo que as regiões geomorfológicas presentes são as depressões de Cristalândia e do baixo e médio Araguaia (Figura 3). O domínio geomorfológico à jusante da bacia são os depósitos sedimentares inconsolidados, os quais são marcados pela Planície Araguaia-Javaés (SEPLAN, 2012).

As atividades neotectônicas em associação com o clima foram os fatores exógenos de modelamento que mais contribuíram para a formação das unidades geomorfológicas encontradas na bacia do rio Urubu, isto é, a Planície do Bananal e a Depressão do Araguaia (SEPLAN, 2008). Dessa maneira, em virtude das condições de baixa altitude, típica de áreas localizadas em planícies, a bacia do rio Urubu compõe um padrão de drenagem anastomosado que sofre a influência das variações do nível de água durante as estações seca e chuvosa (SEPLAN, 2008). A planície inundável é contemplada com muitas lagoas, sendo que Valente (2007) explica que na região da Lagoa da Confusão, as formações lacustres estão relacionadas às zonas de subsidência cárstica.

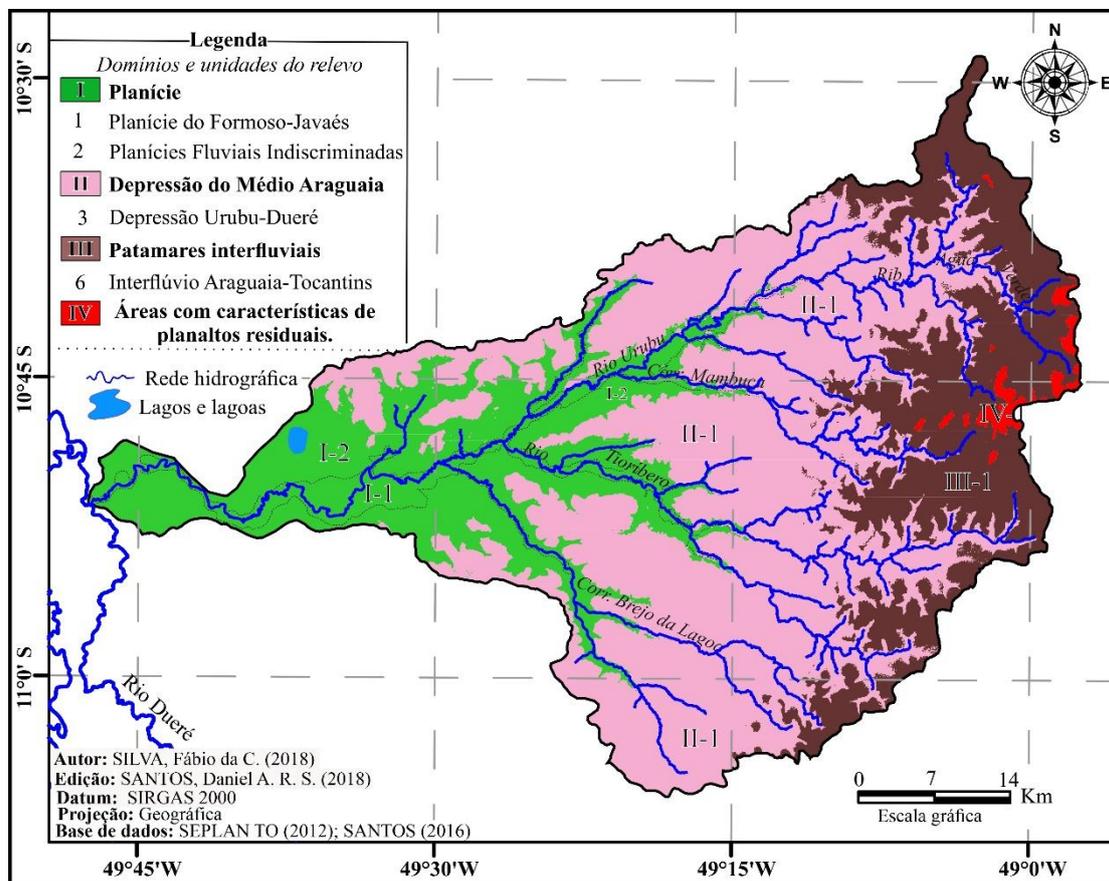
A existência de canais abandonados são traços no relevo que indicam sistemas de drenagem antigos (paleodrenagem) que, segundo Valente (2007), foram formados em virtude dos eventos tectônicos individuais que alteraram a topografia da bacia, ou ainda eventos climáticos e ajustes de deposição autóctone.

Santos e Moraes (2017) indicam que a bacia em estudo possui outra unidade morfológica denominada de planícies indiscriminadas, as quais correspondem ao modelamento de gênese fluvial. Os mesmos autores esclarecem ainda que as planícies indiscriminadas são compostas por sedimentos inconsolidados, arenoargilosos, que são periodicamente transportados pelos fluxos superficiais.

De acordo com Martins (2004), é nos patamares do interflúvio Araguaia-Tocantins que se inicia o sistema de drenagem da bacia do rio Urubu. Este autor explica que os patamares do interflúvio Araguaia-Tocantins correspondem às áreas de maior

altitude (entre 250 e 300 m), associadas a domínios de xistos e quartzitos quase que unicamente do Grupo Estrondo.

Figura 3 - Unidades e domínios geomorfológicos da bacia do rio Urubu.

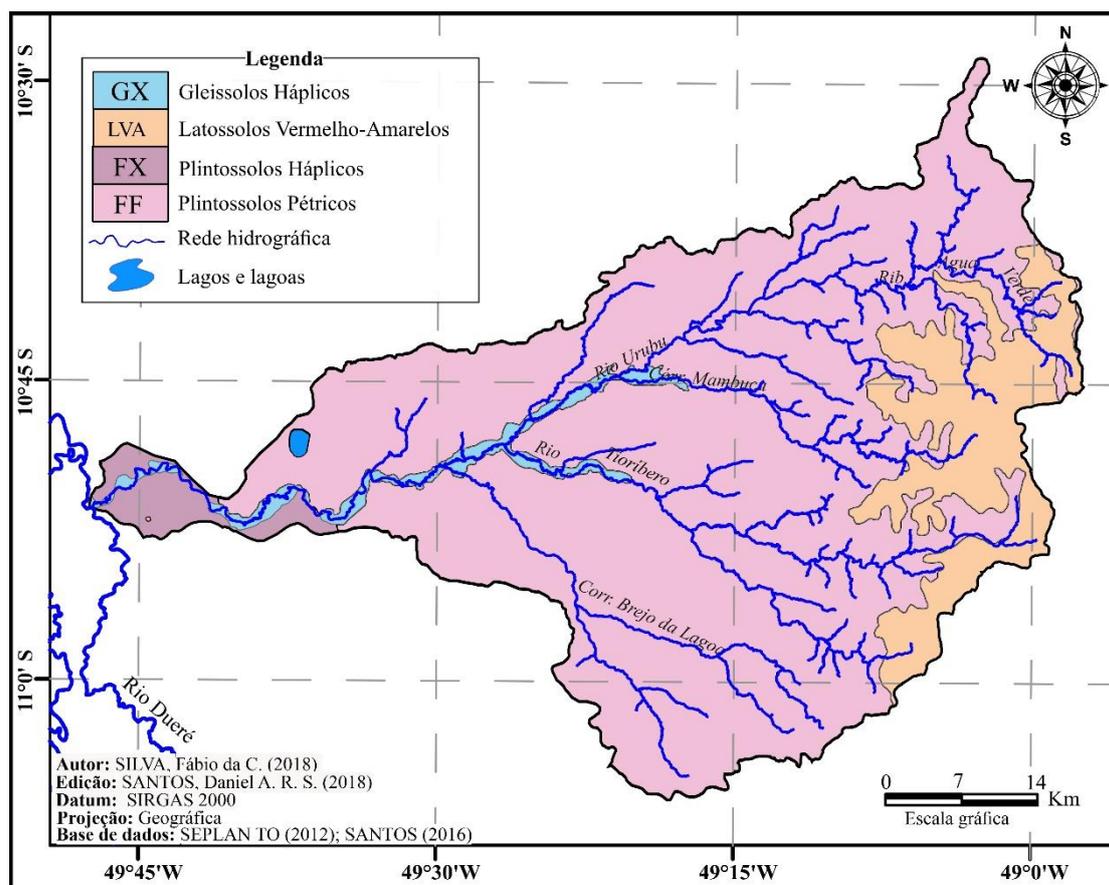


Fonte: SEPLAN (2012); Santos (2016)

### 3.4. Solos

A bacia do rio Urubu tem o predomínio de três classes de solos, a saber: Gleissolos, Latossolos Amarelos e Plintossolos (Figura 4). Para a formação de Plintossolos e Gleissolos são necessárias condições de restrição a percolação da água, portanto, em geral são solos mal drenados, sendo que os Plintossolos podem apresentar expressiva plintização com ou sem a formação de petroplintita (JACOMINE, 2013; SEPLAN, 2012). Martins et al. (2006) observaram a presença de Gleissolos na área de confluência do córrego Barreiro com o rio Urubu, e Plintossolos na maior parte da bacia do córrego Barreiro.

Figura 4 – Mapa dos solos da bacia do rio Urubu.



Fonte: SEPLAN (2012); Santos (2016)

Na figura 4, observa-se que existe uma predominância de Plintossolos, sendo que estes apresentam textura argilosa ou argilosa, sendo moderadamente ácidos e com argilas de baixa atividade. As cores existentes ao longo do perfil indicam que esses solos sofrem processos de oxidação e redução em virtude da oscilação do lençol freático. São solos que se originam da Cobertura Sedimentar do Bananal, e comumente estão ligados aos solos de savanas e florestas, e relevo plano (SANTOS et al., 2018).

O horizonte A possui espessura média de 120 cm, sendo possível encontrar partículas com consistência friável a firme, plástica a não plástica, pegajosa a não pegajosa. A existência do subnível A2 pode indicar a ocorrência de processo de eluviação intenso durante a formação do solo. O horizonte B apresenta uma espessura em torno de 100 cm. Esse horizonte tem colorações acinzentadas, amareladas e avermelhadas (MARTINS, 2004; SANTOS et al., 2018).

Os Gleissolos também são desenvolvidos em ambientes com significativa variação no nível do lençol freático. Tais condições de saturação levam a oxidação de ferro, e dessa maneira, os primeiros 60 cm de profundidade de solo registram cores

gleizadas (acinzentadas). Os Gleissolos são poucos permeáveis, apresentam valores de saturação e somas de base variáveis. Tais solos são provenientes de sedimentos do Holoceno Aluvionar do Quaternário. Em geral, florestas e coberturas pioneiras são encontradas nesse tipo de solo (MARTINS, 2004, SANTOS et al., 2018).

Os Latossolos Amarelos são solos bem intemperizados, profundos, bem drenados, com alta porosidade e pouca diferenciação entre os horizontes. São solos de textura média, e se originam de sedimentos gerados nos períodos Quaternário e Terciário (BRASIL 1981). Os Latossolos ocupam a porção sudeste e nordeste da bacia do rio Urubu (SEPLAN, 2002).

### 3.5. Vegetação

A bacia hidrográfica do rio Urubu exhibe fitofisionomias de Cerrado que se encontram bem conservadas quando comparadas às demais sub-bacias do rio Formoso (TOCANTINS, 2007). Além disso, a bacia em análise está inserida em uma zona de transição entre biomas, sendo dessa forma, reconhecida por área de ecótono.

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 apontadas as seguintes vegetações: Campo Limpo, Floresta, Campo Sujo (Campo de Murundus), Mata Seca, Cerrado e Mata Ripária.

Brito (2005) descreveu a existência da fitofisionomia Campo Cerrado, a qual inclui os subgrupos Campo Sujo e Campo Limpo, vulgos varjão sujo e varjão limpo, respectivamente. A vegetação do tipo Campo Limpo pode também ocorrer de modo associado aos murundus, sendo assim denominada de Campo de murundus. Os murundus são pequenas ilhas de vegetação que se desenvolve sobre morrotes em áreas planas alagáveis.

O cerrado do tipo *stricto sensu* é marcado pela presença de árvores baixas, tortuosas, com ramificações irregulares e retorcidas. São encontradas formações arbustivas espalhadas, com algumas espécies que apresentam órgãos subterrâneos que facilitam a rebrota após perturbações naturais ou antrópicas como os incêndios florestais. Os indivíduos lenhosos, em geral, possuem troncos com cascas espessas com material semelhante à cortiça. Além disso, as folhas são bem rígidas e coriáceas (MARTINS et al., 2006).

As matas secas ocorrem em regiões da bacia do rio Urubu que apresentam afloramentos de calcário. Esse fitofisionomia se caracteriza pela deciduidade anual do estrato superior. As matas secas não têm associação com cursos d'água; e por isso podem ser encontradas nos interflúvios cujos solos apresentam elevada concentração de nutrientes.

A respeito das *Ipucas*, SEPLAN (2013) descreve tais formações como “fragmentos naturais de floresta estacional de terras baixas inundáveis, em pequenas depressões, ovais ou circulares, que se localizam na planície do rio Araguaia, em meio a Savana Parque”. Ainda sobre as *Ipucas*, Martins et al. (2006) descreveram tais formações como florestas de natureza aluvial cuja acumulação de matéria orgânica no solo leva a acidificação do mesmo. Em períodos de estiagem, os solos que outrora estavam inundados, passam a apresentar uma camada de folhas secas com espessura de 20 a 30 cm.

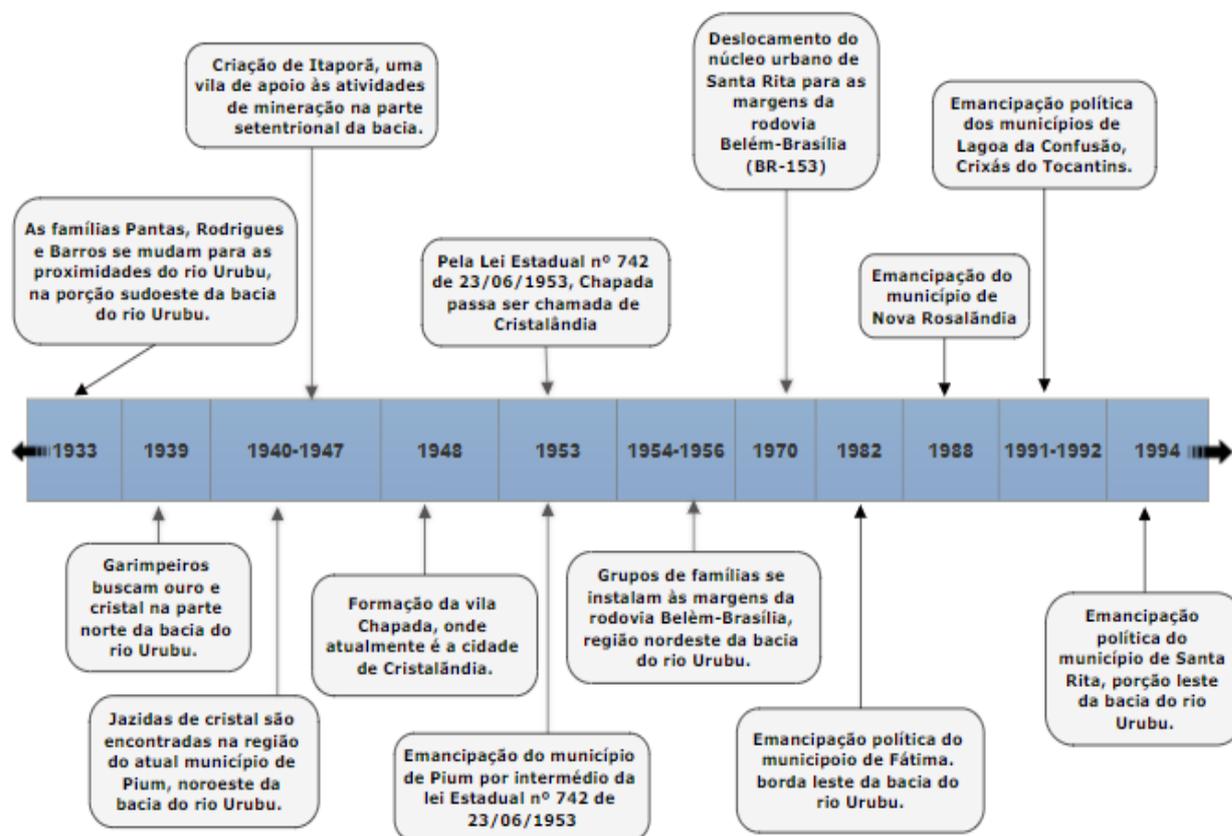
As Florestas Ripárias podem ser encontradas na forma de Matas Ciliares e de Matas de Galeria. Tais florestas são observadas às margens de corpos d'água (rios, lagos) e nascentes. As matas ciliares acompanham rios de médio a grande porte em que a vegetação arbórea não forma galerias e dificilmente ultrapassam 100 m de distância das margens do corpo hídrico que as possuem. A deciduidade e composição florística são importantes características que diferem as Matas Ciliares das Matas de Galeria, uma vez que nessa última, as espécies vegetais apresentam perenifolia (capacidade de manter a folhagem o ano inteiro) enquanto as Matas Ciliares mostram diferentes graus de caducifolia ao avançar da estação seca (RIBEIRO; WALTER, 1998).

### **3.6. Uso e ocupação**

De acordo com o IBGE (2019a), os primeiros registros de ocupação não-indígena datam a chegada das famílias Rodrigues, Pantas e Barros à região da Lagoa da Confusão em 1933 (Figura 5). As famílias se instalaram nas proximidades do rio Urubu e da lagoa que futuramente foi chamada de Lagoa da Confusão em virtude da cosmologia mística atribuída aquele corpo d'água, onde segundo narravam os moradores, era comum ouvir o choro de crianças, risos, latidos e luzes inexplicáveis. Os “encantos” atribuídos à lagoa cessaram à medida que o local foi sendo antropizado, e posteriormente, a transformação da região num polo turístico levou a ressignificação cultural desse aspecto misterioso que no passado gerou tantas especulações. Apesar de possuir o mais antigo histórico de

ocupação não-indígena, o município de Lagoa da Confusão somente foi emancipado em 1991.

Figura 5 - Linha do tempo com principais eventos do processo de ocupação humana da bacia do rio Urubu.



Fonte: Compilado de IBGE (2019a, 2019b, 2019c, 2019d, 2019e, 2019f)

Em outra área da bacia, a busca por recursos minerais despertou o interesse de garimpeiros para a região da atual cidade de Cristalândia, uma vez que havia rumores da existência de cristais. Contudo, somente após diversas expedições e a consolidação de um grupo de compradores é que foram construídos os primeiros barracões como ponto de apoio para a recém-instalada atividade garimpeira. Na ocasião, o aglomerado foi chamado de Itaporá, e posteriormente, em 1948, o nome foi alterado para Chapada. No entanto, foi em 1953 que a gestão municipal de Porto Nacional cedeu a Chapada o privilégio de gozar dos foros de uma cidade. Devido a emancipação política, os moradores de Chapada escolheram “Cristalândia” para ser o novo nome da cidade (IBGE, 2019b).

Paralelamente ao processo de ocupação humana de Cristalândia em 1940, as áreas adjacentes que atualmente pertencem ao município de Pium também se destacaram em

virtude da descoberta de jazidas minerais. A vinda de garimpeiros para a região gerou a necessidade da instalação da vila Piaus, a qual serviu como apoio aos trabalhadores da mineração. O distrito com sede na vila Pium foi criado em 1948, mas somente em 1953 que o município de Porto Nacional também emancipou o distrito de Pium, o qual preferiu manter com a mesma identificação política (IBGE, 2019c).

Com a construção da rodovia federal Belém BR-153 entre os anos de 1956 e 1958, grupos de famílias se instalaram à leste da bacia. O aumento da mobilidade de caminhões, carros e pessoas facultou o surgimento de assentamentos urbanos às margens da BR-153. Nesse período foram organizados os primeiros aglomerados que levaram a formação dos municípios de Fátima e Crixás do Tocantins. O primeiro foi elevado à categoria de município em 1982, enquanto o segundo só obteve tal condição em 1992. Ainda às margens da rodovia federal 153, os municípios de Nova Rosalândia e Santa Rita, respectivamente emancipados em 1988 e 1994, também compartilham dos recursos naturais da bacia do rio Urubu (IBGE, 2019d, 2019e, 2019f, 2019g).

### **3.7. Projetos de irrigação na área de estudo**

Os projetos de irrigação às margens do rio Urubu expressam a importância dos recursos hídricos no contexto econômico da bacia. O projeto Javaés tem por objetivo o cultivo de duas safras, uma no período chuvoso e a outra nos meses de estiagem. O Programa de Desenvolvimento do Oeste do Tocantins – PRODOEST – sinaliza o interesse do Estado do Tocantins de subsidiar um modelo de gestão do agronegócio que diminua a sazonalidade de grãos e a instabilidade dos empregos gerados. O programa conta com o potencial hídrico de diversos rios que compõem a bacia do rio Formoso, como por exemplo, o rio Urubu (DUARTE, 2016).

Os insumos agrícolas (fertilizantes e pesticidas) são empregados com o objetivo de aumentar a produtividade da lavoura; no entanto, inevitavelmente funcionam como fonte de poluição difusa e, portanto, contaminam o solo, a água e a intoxicam a fauna e flora (RIBEIRO et al, 2007). Ainda sobre os impactos dos grandes projetos de irrigação, Brasil (2000) pontua que eles afetam a vida das populações ribeirinhas, uma vez que tais comunidades são dependentes dos recursos provenientes dos rios.

O rio Urubu drena uma região com intenso uso agrícola e por isso, existe o risco de que a qualidade dos recursos hídricos seja impactada por eventuais danos ambientais. Ciente desse contexto, ressalta-se que apesar de não possuir unidades de conservação,

sabe-se que a bacia em estudo contribui para o rio Javaés, rio este que margeia uma unidade de conservação de proteção integral, o Parque Nacional do Araguaia, na ilha do Bananal. Portanto, os comitês de bacia do rio Urubu, juntamente com os órgãos ambientais fiscalizadores, devem acompanhar a evolução da ocupação do solo a fim de evitar problemas ambientais no ecossistema local.

### **3.8. Exploração de recursos minerais**

Segundo Negreiro (2015), a Lagoa da Confusão apresenta jazidas em que comumente existem afloramentos de calcário de origem metamórfica. Essas jazidas podem alcançar até 30 m de altitude, e por isso são chamadas de jazidas positivas.

Brasil (2016) reportou que além do calcário, outros minérios são explorados ou tem o potencial para a exploração na área dos municípios que integram a bacia do rio Urubu.

### **3.9. Produção dos mapas temáticos e do uso e cobertura da terra**

O Manual Técnico de Uso da Terra, produzido por IBGE (2013), forneceu a abordagem metodológica adotada para o estudo de cobertura e uso do solo na bacia do rio Urubu, sendo que as classes já definidas pelo referido manual também foram adotadas neste estudo.

Foram selecionadas as cenas 222/068 e 223/067 do satélite LANDSAT 8, sensor OLI com data de passagem em 28/08/2017 e 18/07/2017, respectivamente. As imagens foram processadas para correção geométrica, sendo também realçadas a fim de melhorar a visibilidade das feições, e por fim, submetidas a técnica de classificação supervisionada através do software de Sistema de Informações Geográficas QGIS versão 2.18.

Conforme mencionado anteriormente, a nomenclatura das classes adotada neste trabalho foi extraída de IBGE (2013). Foram usadas as seguintes classes: área urbana, agricultura, agropecuária, formações florestais, formações savânicas e águas continentais. As classes identificadas foram destacadas com as cores que também foram fornecidas pelo Manual de cobertura e uso da terra do IBGE.

É interessante detalhar que a bacia do rio Urubu possui uma diversidade de usos agrícolas, sendo que para fins didáticos, tais usos foram categorizados em “agricultura” quando as feições remeteram a culturas temporárias ou permanentes; e o termo

“agropecuária” foi usado no sentido de compreender as atividades de trato de animais de pequeno a grande porte.

No intuito de compreender as feições topográficas, o comportamento do escoamento superficial e áreas de acumulação e recarga, foram elaborados mapas com base nos dados primários levantados nas bases de dados estabelecidas no Quadro 4.

Os mapas produzidos por Santos (2016) apresentaram uma configuração mais confiável dos limites topográficos da bacia do rio Urubu, e por isso, o banco de dados do autor foi extremamente valioso para a elaboração dos mapas temáticos.

Quadro 3 - Detalhamento metodológico com produtos e dados de entrada.

Produto	Dados	Fonte
Mapas temáticos: Geologia, Solos, Geomorfologia	<i>Shapefile</i> com ambientes geológicos do Estado do Tocantins; <i>shapefile</i> de geomorfologia e solos do Tocantins.	Banco de dados SEPLAN/TO, SANTOS (2016)

### 3.10. Seleção das áreas amostradas

A análise da cobertura e do uso do solo na área de estudo foi essencial para a construção do plano de amostragem dos solos, pois a distribuição dos pontos buscou contemplar todas as cinco classes que foram identificadas no estudo de cobertura e o uso da terra, isto é, agricultura, pecuária, áreas urbanizadas, formações florestais, formações savânicas .

Dadas as características dos solos da bacia, estes foram pontuados de acordo com a capacidade de drenagem natural (Quadro 5). Optou-se por usar o intervalo numérico entre 0 e 1 para a pontuação dos três tipos de solos predominantes na bacia. Quanto mais significativa a interação do solo com a água, maior foi o valor atribuído ao solo. Dessa maneira, os Gleissolos receberam o valor máximo em virtude de se encontrarem permanentemente ou periodicamente saturados por água, indicando uma maior interação

entre águas superficiais e subterrâneas. Os Latossolos receberam o menor índice dadas as condições de boa drenagem e maior profundidade que apresentam (EMBRAPA, 2018, p. 119-122).

Quadro 4 – Classes de solos predominantes na bacia e respectiva pontuação quanto à capacidade de drenagem.

Solos	Pontuação mediante à capacidade drenagem
Latossolos	0
Plintossolos	0,75
Gleissolos	1

Para a álgebra de mapas foram processados os *shapes* com as informações do NDWI e das classes de solo, cuja tabela de atributos recebeu os valores que foram pontuados mediante o comportamento do solo quanta a drenagem. Por meio de média aritmética foram determinadas as áreas com maior valor absoluto. Quanto mais próximo de 1, maiores foram as chances da área ser selecionada para a coleta. Com o auxílio do programa Arcgis, versão 2010 foi possível sobrepor o mapa de cobertura e uso do solo com o mapa das áreas mais pontuadas. Tal procedimento permitiu selecionar as áreas que, além de possuir pontuação acima de zero, também contemplaram as classes determinadas pelo estudo de uso e ocupação da bacia do rio Urubu.

### 3.11. Índice de Diferença Normalizada de Água

Conforme explanado no referencial teórico deste trabalho, para as imagens do satélite Landsat 8, o índice de diferença normalizada da água (NDWI) é calculado de acordo com a operação entre as bandas espectrais conforme a Equação 7:

$$NDWI = \frac{Green - NIR}{Green + NIR} \quad (7)$$

Onde *GREEN* (Verde) e *NIR* (Infravermelho Próximo), referem-se, respectivamente, às bandas 2 e 4 do satélite CBERS 4 (GAO, 1996; MCFEETRS, 1999).

As imagens usadas no processamento do Índice de Diferença Normalizada de Água (NDWI) foram obtidas pelo satélite CBERS 4, sensor PAN, resolução espacial de 0 m, as quais estão disponibilizadas gratuitamente no banco de dados da página do 10 m Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. Foram utilizadas as cenas 160/112 do dia 12-08-2017 e 161/112 do dia 04-09-2017.

De modo isolado, as cenas escolhidas não contemplaram toda a área da bacia do rio Urubu, portanto, para garantir a uniformidade no cálculo do NDWI, foi necessário fazer um mosaico com as duas cenas pré-selecionadas. Uma vez que as imagens de satélite foram mosaicadas, foi necessário ainda realizar uma correção atmosférica a fim de reduzir a influência de nuvens. Posteriormente, realizou-se a operação entre as bandas conforme a Equação 7. Todos os procedimentos foram executados no software QGIS, sendo que o produto precisou de ajustes visuais, isto é, para fins didáticos, aplicou-se uma paleta que realçou com tons mais frios as áreas que apresentaram maiores valores de NDWI, e destacou-se em tons mais quentes aquelas que obtiveram baixo valor de NDWI.

### **3.12. Índice de Vulnerabilidade de Água Subterrânea à Contaminação – VIX**

Para o cálculo do índice de vulnerabilidade de água subterrânea à contaminação – VIX, houve a necessidade de realizar visitas de campo para coletar os dados requeridos pelo índice. O índice é calculado por meio da Equação 8.

$$VIX = \frac{L}{R.F} \quad (8)$$

Onde L refere-se à profundidade do lençol freático (cm), R é recarga anual da área de estudo (cm), e por último, a umidade na capacidade de campo (F), que é dada em unidades de volume por volume.

#### **3.12.1. Profundidade do corpo d'água subterrâneo**

Os dados referentes à profundidade do lençol freático foram adquiridos durante a segunda viagem de campo. Tais medidas foram obtidas com o auxílio de uma trena com extensão de 30 metros que foi inserida nas cisternas próximas às áreas onde as amostras de solo foram coletadas.

Figura 6 - Pontos selecionados para a medição da profundidade do lençol freático, onde A, B, C e D estão, respectivamente, localizados nos pontos amostrais 3, 11, 12 e 4.



É válido ressaltar que algumas áreas amostradas estavam distantes de cisternas, e por isso, a profundidade foi estimada conforme Nobre et al. (2011). Os autores desenvolveram o modelo de *Hand*, o qual explica que a distância vertical entre a superfície e o lençol freático pode ser inferida pela diferença entre as cotas do ponto de estudo e àquela do corpo hídrico mais próximo. A determinação das cotas do relevo foi realizada por meio do aparelho de GPS Garmin® Etrex.

Foi possível ainda encontrar a profundidade do lençol freático através da distância vertical entre o nível do rio Urubu e a parte superior da vertente.

### 3.12.2. Recarga hídrica anual

Spadoto (2014) detalhou 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 de vulnerabilidade das águas subterrâneas foi a média da recarga hídrica dos anos hidrológicos de 2010 a 2018.

Apesar da bacia do rio Urubu estar equipada com uma estação automática do Instituto Nacional de Meteorologia no município de Lagoa da Confusão – TO, o banco de dados da mesma não pode ser utilizado devido a irregularidade dos dados horários registrados, o que comprometia a confiabilidades dos mesmos. Diante de tal desafio, a Organização Internacional de Meteorologia recomenda usar dados de estações que

estejam dentro do raio de 100 Km da área de estudo (WMO, 2012). Portanto, as informações climáticas adotadas neste trabalho foram compiladas do banco de dados da estação convencional de Porto Nacional, o qual pode ser acessado livremente na plataforma online do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET.

Conforme mencionando anteriormente, os dados de precipitação e evapotranspiração correspondem ao intervalo temporal de 2010 a 2018. O curto espaço temporal é justificado em função de que a estação meteorológica convencional de Porto Nacional passou a processar dados de evapotranspiração somente a partir do ano de 2010. É interessante, ainda, frisar que o banco de dados meteorológicos das estações convencionais é estatisticamente corrigido pelo próprio INMET, dando maior confiabilidade às informações.

### 3.12.3. Umidade 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.

**Etapa 1** – As amostras de solo foram refinadas por meio de uma peneira com malha de 2 mm. O solo peneirado foi condicionado dentro de dois anéis pretos de borracha, pois o procedimento é sempre realizado em duplicata para cada amostra. Os anéis com solos foram colocados sob placas cerâmicas.

**Etapa 2** – As placas cerâmicas foram encharcadas de modo que o nível d'água dentro de cada placa atingiu a borda superior dos anéis de borracha com solo. O objetivo foi hidratar o solo e a placa por um período de 12 horas a fim de saturá-los.

**Etapa 3** – O conjunto placa/amostras foi levado para dentro do extrator, o qual fora previamente programado para aplicar a pressão desejada. O conjunto permaneceu sob pressão do extrator por 72 horas.

**Etapa 4** – As amostras foram retiradas dos extratores e transferidas para um recipiente com tampa. Para a pesagem, as balanças já haviam sido taradas e, portanto, somente a massa do solo com o seu conteúdo de água remanescente foi computada. Todas as pesagens usadas no método adotam a precisão de 0.01 g.

**Etapa 5** – As amostras foram levadas à estufa à temperatura de 100-105 ° C por 48 horas. Após esse período, as mesmas foram retiradas da estufa e colocada no

dissecador para atingir a temperatura ambiente e constância de peso. A massa de cada amostra foi posteriormente aferida em balança de precisão.

Os valores de umidade à base gravimétrica ( $U$ ) e volumétrica ( $\theta$ ) foram encontrados através das Equações 9 e 10, respectivamente. Onde  $M$  representa a massa aferida.

$$U = \frac{M_{(recipiente+solo+água)} - M_{(recipiente+solo)}}{M_{(recipiente+solo)} - M_{(recipiente)}} \quad (9)$$

$$\theta = U \frac{Densidade_{solo}}{Densidade_{água}} \quad (10)$$

Os dados de umidade à base de volume variaram de acordo com a pressão de sucção que as amostras foram submetidas. Após calculados, os dados foram ajustados à Equação 6, que é o modelo de curva de retenção de água no solo proposto por Van Genuchten (1980). O ajuste realizado por meio do *software* Qualisolo® permitiu a geração de curvas de retenção de água no solo assim como os parâmetros usados na equação 6.

A obtenção dos parâmetros provenientes do ajuste permitiu a identificação dos valores de umidade na capacidade de campo, pois Reichardt e Timm (2004) sugerem que tal umidade é comumente encontrada quando o solo está submetido à pressão de 33 kPa. Dessa maneira, este trabalho levou em consideração essa pressão no cálculo da umidade de interesse para o índice de vulnerabilidade de águas subterrâneas – VIX.

### 3.13. Índice de qualidade do solo (S)

Os dados de entrada necessários para a o cálculo do índice de qualidade do solo (S) demandaram a realização de visita à área de estudo para coletar amostras de solos de acordo com a distribuição de pontos descrita no item 2.2.

O índice S aponta a qualidade física dos solos baseando-se no ponto de inflexão do modelo da curva retenção de água dos solos estudados. Maia (2011) determinou que solos fisicamente bem estruturados geram valores de índice S superiores a 0,035, enquanto os solos que apresentem índices S inferiores a esse valor, estão relacionados a solos com baixa qualidade física. Quanto maior o valor do índice S, melhor a estruturação do solo e distribuição dos poros.

O uso do software Qualisolo® – Embrapa Solos facilitou o cálculo do índice S das amostras coletadas. Como dados de entrada na interface do programa foram usadas as densidades de partícula e global, além das porcentagens de argila e silte presentes em cada amostra.

### 3.13.1. Coleta das amostras de solo indeformadas e deformadas

Cada ponto analisado contribui com a quantidade de solo suficiente para preencher um anel de PVC com 5 cm de diâmetro e 6 cm comprimento. Além das amostras, do tipo indeformadas, que foram coletadas nos anéis de PVC foram obtidas amostras deformadas de cada solo para sua posterior caracterização textural.

A identificação dos pontos de coleta foi feita com o auxílio de um GPS *Garmin Etrex*®. Foram coletadas 15 amostras de solo no total.

### 3.13.2. Densidade Global do solo

A densidade global do solo ( $D$ ) foi obtida pelo método do anel volumétrico. As amostras de solo que estão nos anéis volumétricos foram colocadas na estufa por 48h e, posteriormente, foram pesadas. A densidade global foi o resultado da divisão da massa de cada amostras após secagem pelo seu volume (Equação 11).

$$D = \frac{\text{Massa (g)}}{\text{Volume (cm}^3\text{)}} \quad (11)$$

### 3.13.3. Densidade de partícula do solo

A densidade de partículas ( $D_p$ ) corresponde à massa por unidade de partícula de solo seco. Foi considerado apenas o espaço ocupado pela matéria sólida solo, independente da estrutura e compactação do solo.

Para a obtenção dessa propriedade física, as amostras precisaram ser submetidas ao peneiramento numa malha de 2 mm, seguida de secagem em estufa à temperatura de 100°C.

**Etapa 1** – Aferiu-se um balão volumétrico de 50 mL com objetivo de determinar o seu volume até 0,05 mL ( $V_B$ ),

**Etapa 2** – Foram transferidos 20 g de solo peneirado para o balão volumétrico.

**Etapa 3** – Adicionou-se um volume conhecido de álcool etílico ao balão volumétrico com o intuito de cobrir a amostra de solo, em seguida, o balão foi agitado cuidadosamente para eliminar a formação de bolhas no sistema poroso do solo;

**Etapa 4** – O balão volumétrico foi tampado com papel alumínio, e posteriormente foi deixado em repouso por 30 minutos. Foi ainda necessário agitar a amostra periodicamente a fim de evitar a formação de bolhas por um período adicional de 30 minutos.

**Etapa 5** – Completou-se o volume do balão com um volume conhecido de álcool etílico ( $V_G$ ).

**Etapa 6** – Usando a fórmula  $D_p = \frac{M_s}{V_s} = \frac{M_s}{V_B - V_G}$ , em que  $M_s$  é a massa de solo usada na etapa 2,  $V_s$  é o volume das partículas de solo. A densidade de partícula é dada em  $\text{g/cm}^3$ .

#### 3.13.4. Curva granulométrica

A curva granulométrica das amostras foi obtida em laboratório particular de acordo com a método da dispersão (EMPRAPA, 1997).

#### 3.13.5. O uso do Qualisolo®

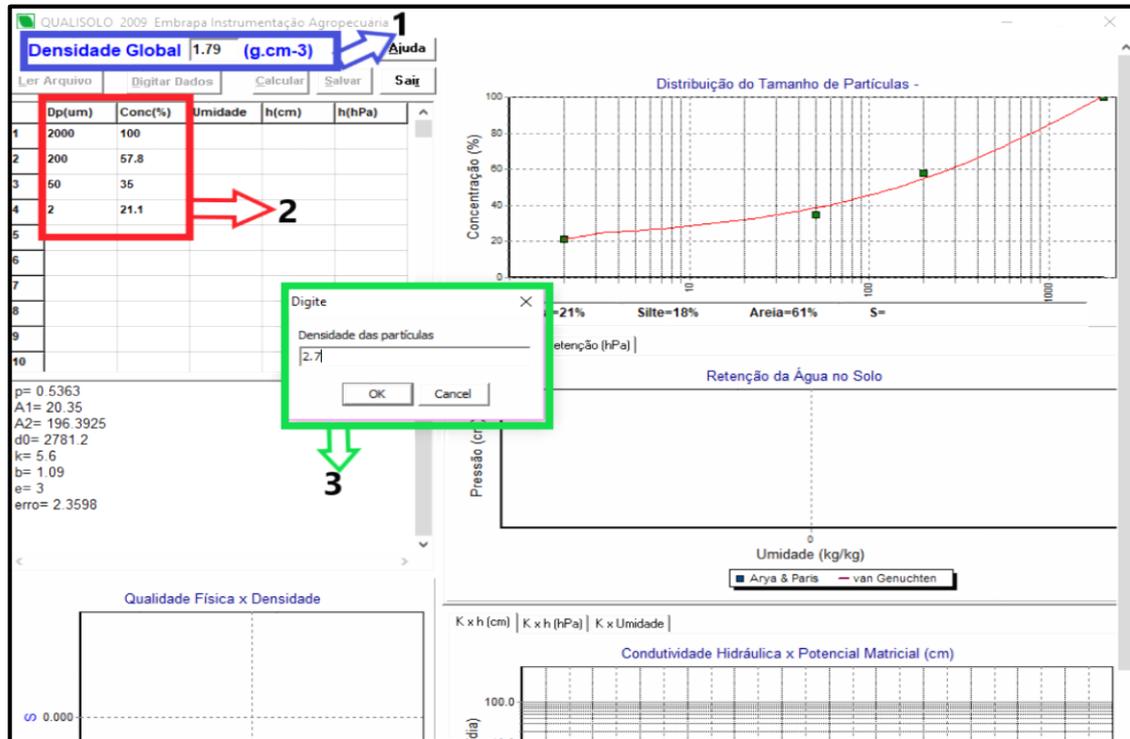
Os dados solicitados na interface do programa Qualisolo® são: densidade de partícula, densidade global e porcentagens de concentração de solo de acordo com os diâmetros de partícula disponibilizados pela curva granulométrica. Na figura 5, é possível identificar as áreas da interface onde cada dado é inserido no programa.

A concepção do índice S baseia-se no conceito de que solos com boa qualidade física apresentam características estruturais que condicionam o bom funcionamento físico deste. Dessa forma, fatores como textura, matéria orgânica e porosidade podem influenciar nos valores de índice S obtidos (DEXTER, 2004). Além de manter uma boa estrutura, resistir às pressões e à compactação, um solo de boa qualidade deve também proporcionar o crescimento radicular e possuir taxas de infiltração que colaborem no armazenamento de água (TOPP et al., 1997).

Para obter o índice S foi necessário o uso do programa Qualisolo® – Embrapa Solos. O programa possui uma interface que permite a inserção das seguintes variáveis físicas das amostras de solo: densidade global ( $\text{g/cm}^3$ ) (retângulo 1- Figura 7), frações

texturais (%) com respectivos diâmetros de partícula (retângulo 2) e a densidade de partícula ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) (retângulo 3).

Figura 7 - Interface para inserção dos dados de entrada no programa Qualisolo®



Fonte: Captura de tela do programa Qualisolo®

O algoritmo do programa considera o modelo de Arya e Paris (1981) para estimar a curva de retenção de água do solo e, posteriormente, identifica o ponto de inflexão da curva de retenção (Equação 12), obtendo assim, o índice S da amostra (MANIERE et al., 2009; DEXTER, 2004).

$$S = -n(\theta_{Sat} - \theta_{res}) \left[ 1 + \frac{1}{m} \right]^{-(1+m)} \quad (12)$$

Onde S,  $\theta_{Sat}$  e  $\theta_{res}$  são, respectivamente, índice S (adimensional) e as umidades de saturação e residual, em kg/kg, e n e m ( $m = 1-1/n$ ) são parâmetros empíricos adimensionais de ajuste (DEXTER, 2004).

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. Análise de vulnerabilidade das águas subterrâneas à contaminação na bacia do rio Urubu, Tocantins (Artigo a ser submetido à Revista Brasileira de Ciências Ambientais. Autores: Fábio da Costa Silva; Fernando Moraes)

#### 4.1.1. Resumo

O presente estudo busca avaliar a vulnerabilidade das águas subterrâneas à contaminação na bacia hidrográfica do rio Urubu, Tocantins. A análise foi feita com base no índice VIX de vulnerabilidade, e levou em consideração as áreas com maior acumulação de água, conforme apontadas pelos valores de NDWI extraídos da área de estudo. Para o cálculo do índice VIX, foram selecionadas 15 áreas diferentes da bacia para a extração dos valores de umidade na capacidade de campo e profundidade do lençol freático. Com o auxílio de um software de geoprocessamento, foram processadas as bandas 4 e 5 do satélite CBERS para a obtenção dos dados de NDWI da área de estudo. 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. Recomenda-se aumentar o grupo amostral de áreas dentro da bacia para melhorar a precisão da análise de vulnerabilidade das águas subterrâneas à contaminação.

**Palavras-Chaves:** Águas subterrâneas, Índice VIX, NDWI, Vulnerabilidade, rio Urubu.

#### 4.1.2. 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. A total of 15 different areas of the basin were selected for the extraction of moisture values in field capacity and groundwater depth to

perform the calculation of the VIX index. CBERS 4 satellite bands 4 and 5 were processed to obtain NDWI data from the study area by using a GIS software. 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 were effective in determining areas which are more susceptible to contamination within the Urubu river basin, thus, it can be considered an efficient tool for local natural resource management. It is recommended to increase the sample group of areas within the basin to improve the accuracy of groundwater vulnerability analysis to contamination.

**Key-words:** Groundwater, VIX index, NDWI, Vulnerability, Urubu river.

#### 4.1.3. 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, Vorosmarty et al. (2000, p. 287) 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, p. 46), 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, p. 550; MACHIWAL et al., 2018, p.8).

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, p. 550).

Foster (2012, p. 16-17) 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, p. 550).

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, p. 550).

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, p. 4).

No Brasil, Spadotto (2014, p. 1) 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 região, o rio Urubu drena uma área de 2640 km<sup>2</sup>, que em virtude das condições topográficas e climáticas, tem atraído uma crescente exploração de recursos naturais. Martins et al. (2002, p. 304) 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.

A bacia do rio Urubu, localizada na porção sudoeste do Estado do Tocantins, comporta uma diversidade na matriz de exploração de recursos naturais, sendo que a agricultura mecanizada e a pecuária de corte são proeminentes formas de uso do solo na região (ARRUDA; VALDEVINO, 2014, p. 364). Ciente da relevância ambiental e econômica da bacia do rio Urubu o presente 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

#### 4.1.4. Metodologia

##### 4.1.4.1. Área de estudo

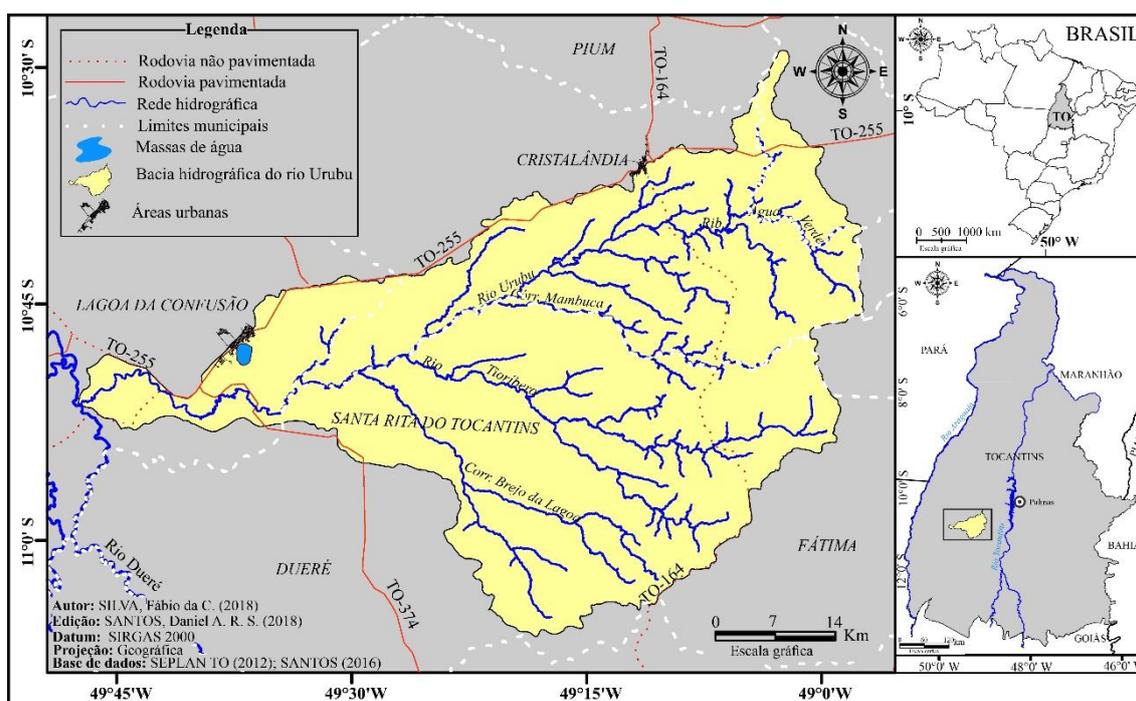
A bacia do rio Urubu, situada na região sudoeste do Estado do Tocantins, possui uma área de 2640 km<sup>2</sup>, o que representa aproximadamente de 1% da área total do Estado. Ao todo, a bacia abrange áreas de sete municípios, sendo eles: Cristalândia, Crixás do Tocantins, Fátima, Lagoa da Confusão, Pium, Nova Rosalândia e Santa Rita do Tocantins. A área de estudo se encontra dentro do quadrante com coordenadas geográficas de 49° 15' 2" e 48° 57' 52" de Longitude Oeste e, 10° 30' 3" e 11° 4' 37" de Latitude Sul (Figura 8).

Os principais acessos à área de pesquisa podem ser visualizados na Figura 8. Destacam-se as rodovias pavimentadas TO-255 e TO-374, as quais respectivamente cruzam a bacia nos sentidos Sul-Norte e Leste-Oeste. Apesar de não ser pavimentada, outra importante via de acesso a área de estudo é a rodovia estadual TO-164, a qual conecta os municípios de Cristalândia e Aliança do Tocantins.

A vazão de referência para 90% dos dados de descarga – Q90 - é de 1.245 m<sup>3</sup>/s no período de estiagem e atinge 28.627 m<sup>3</sup>/s na estação mais úmida (FIQUEROA, 2017, p. 30).

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 nas porções norte da bacia do rio Formoso, que posteriormente contribui para o rio Araguaia.

Figura 8 - Mapa de localização da área de estudo



Fonte: Organizado pelos autores e digitalizado por Daniel Santos.

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 (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, p. 1831-1834). 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, p. 214-218).

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, p.20).

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. Quanto as características físicas do perfil desses dois tipos de solos, observa-se que os Gleissolos apresentam cor acinzentada nos primeiros 60 cm do horizonte A, o que não é acontece no perfil dos Plintossolos (EMBRAPA, 2018, p.119-122).

Contudo, são as alterações do nível do lenço freático que geram reações de oxidação e redução que são responsáveis pelas cores existentes nos perfis dessas duas classes de solo. 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 profundidade alcançada por eles (EMBRAPA, 2018, p. 119-122).

As formações geológicas da bacia estão inseridas no Grupo Tocantins, o qual é constituído pelas formações Couto Magalhães e Pequiizeiro. 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 Pequiizeiro 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, p. 18; 2011, p. 33, 39; PEREIRA; MORAIS, 2012).

Martins et al. (2006, p. 307) 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 vegetações: Campo Limpo, Floresta, Campo Sujo (Campo de Murundus), Mata Seca, Cerrado e Floresta Ripária. O estudo ainda destacou que a bacia hidrográfica do rio Urubu está inserida em uma zona de transição entre biomas, sendo dessa forma, reconhecida como área ecotonal.

As Ipucas são 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 matérias orgânica e, dessa maneira, aumentando a conexão entre superfície e lençol freático (MARTINS et al., 2006, p.308; MORAIS, 2017, p. 286).

#### 4.1.4.2. 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 13 (GAO, 1996, p. 258; MCFEETRS, 1999, p. 3549).

$$NDWI = \frac{Green - NIR}{Green + NIR} \quad (13)$$

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  $\mu\text{m}$ ) e B04 (0,77-0,89  $\mu\text{m}$ ) 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 13 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 (2017), 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.

#### 4.1.4.3. 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.

$$TC = \frac{L}{V} \quad (14)$$

$$V = \frac{q}{\theta} \quad (15)$$

Sendo L é a profundidade (cm) e V é a velocidade efetiva de convecção, a qual pode ser encontrada pela Equação 15, onde *q* é fluxo de água no solo ( $\text{cm}^3/\text{s}$ ) e  $\theta$  corresponde à umidade do solo (v/v).

Substituindo V (Equação 15) na equação do tempo de convecção (Equação 14), tem-se:

$$TC = \frac{L \times \theta}{q} \quad (16)$$

Considera-se que o inverso do tempo de convecção (Equação 16), pode ser usado como índice de vulnerabilidade intrínseca dos corpos de água subterrâneos à contaminação, Spadotto (2014, p. 2) propõe a Equação 17.

$$VIX = \frac{L}{R.F} \quad (17)$$

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 (Quadro 6). 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 saturado por água. Os Latossolos receberam um menor valor em virtude de apresentarem melhor drenagem e serem mais profundos (EMBRAPA, 2018, p. 119-112).

Quadro 5 – Pontuação das classes de solo mediante as condições de drenagem dos solos.

Solos	Pontuação
Latossolos	0
Plintossolos	0,75
Gleissolos	1

Fonte: Elaborado pelos autores

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 a tabela de atributos da camada de solos foi complementada com os respectivos pontos apresentados no Quadro 6. 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.

#### 4.1.4.3.1. 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, p.15).

#### 4.1.4.3.2. Recarga hídrica anual

Spadoto (2014, p. 2) 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 INMET.

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.

#### 4.1.4.3.3. 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, p.11).

Os valores de umidade à base gravimétrica ( $U$ ) e volumétrica ( $\theta$ ) foram encontrados por intermédio das Equações 18 e 19, respectivamente, onde  $M$  representa a massa de solo aferida.

$$U = \frac{M_{(\text{recipiente+solo+água})} - M_{(\text{recipiente+solo})}}{M_{(\text{recipiente+solo})} - M_{(\text{recipiente})}} \quad (18)$$

$$\theta = U \frac{\text{Densidade}_{\text{solo}}}{\text{Densidade}_{\text{água}}} \quad (19)$$

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 20) proposto por Van Genuchten (1980, p. 894).

$$\theta = (\theta_{\text{sat}} - \theta_{\text{res}})[1 + (\alpha h)^n]^{-m} + \theta_{\text{res}} \quad (20)$$

Onde  $\theta$ ,  $\theta_{\text{sat}}$  e  $\theta_{\text{res}}$  são, respectivamente, os conteúdos de água do solo correspondentes à tensão  $h$ , em condições de saturação e umidade residual, em  $\text{kg.kg}^{-1}$ ,  $h$  é a tensão matricial da água do solo, em kPa,  $n$  e  $m$  ( $m = 1-1/n$ ) são coeficientes empíricos adimensionais de ajuste e  $\alpha$  é um parâmetro expresso em  $\text{kPa}^{-1}$ . O ajuste foi realizado por meio do *software* Qualisol®, o qual estimou os valores dos parâmetros usados na equação 20.

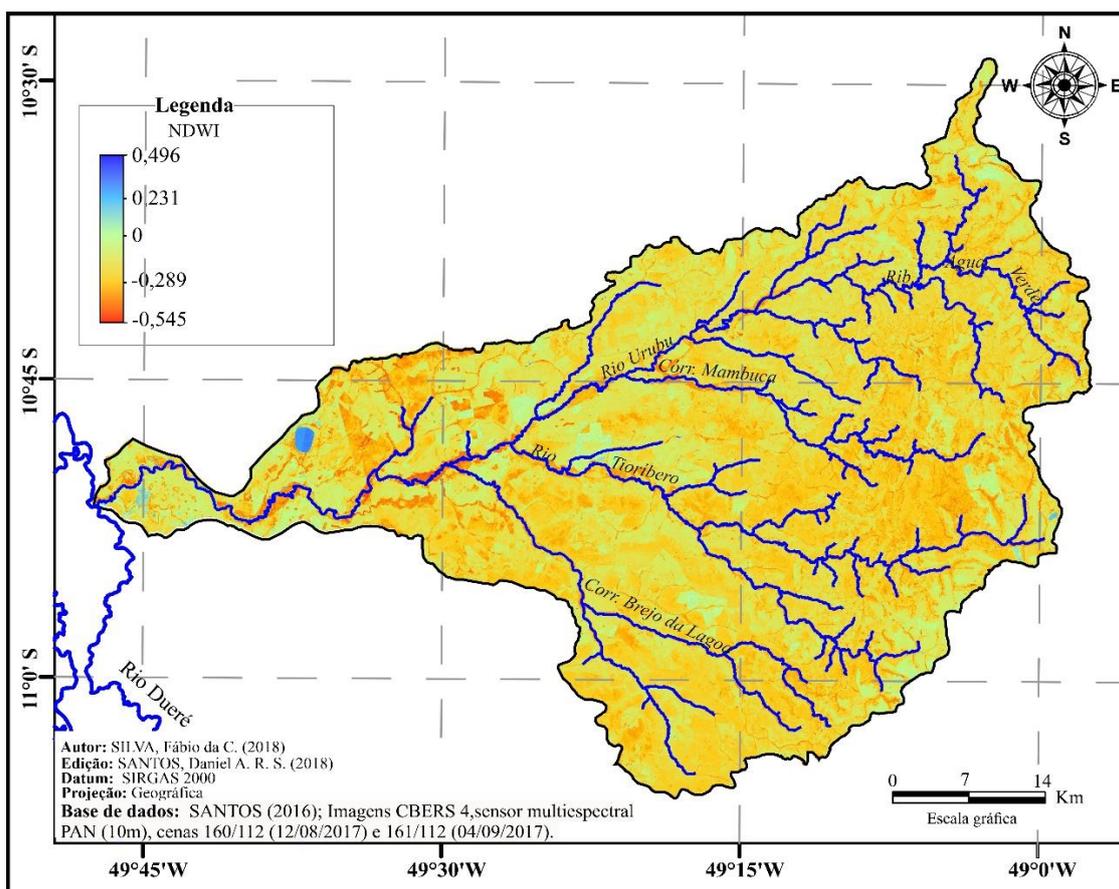
Reichardt e Timm (2004) sugerem que a umidade na capacidade de campo é encontrada quando o solo está submetido à pressão de 33 kPa. Dessa maneira, este estudo levou em consideração essa pressão para calcular os valores da umidade na capacidade de campo para o índice de vulnerabilidade de águas subterrâneas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

#### 4.1.5. Resultados e discussão

##### 4.1.5.1. Índice de Diferença Normalizada de Água – NDWI

A Figura 9 demonstra que a bacia do rio Urubu apresentou valores de NDWI maiores (0 a 0,496) à medida que se desloca para região centro-oeste desta.

Figura 9 - Mapa do Índice de Diferença Normalizada de Água da bacia do rio Urubu.



Fonte: Organizado pelos autores e digitalizado por Daniel Santos

Na porção oeste, destaca-se em azul, a Lagoa da Confusão, corpo hídrico de maior diâmetro dentro da bacia estudada.

Por meio dos valores de NDWI apresentados na Tabela 1, 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. A coluna de porcentagens apresentada na Tabela 1 é dada a partir da razão entre as áreas identificadas por intervalo e a área total da bacia do rio Urubu.

**Tabela 1 - Intervalos dos valores de NDWI e respectivas áreas.**

Classes	Área (Km <sup>2</sup> )	%
-0,64 a -0,4	36	1,364
-0,4 a -0,2	1369	51,856
-0,2 a 0	1207	45,720
0 a 0,2	18,8	0,712
0,2 a 0,4	5,5	0,208
0,4 a 0,6	0,02	0,001
Total	2640	100.000

Fonte: Elaborado pelos autores

Na Figura 9, a presença de tons mais quentes nas áreas de mata ciliar indicou baixos valores de NDWI. Para Polidório, Imai e Tommaselli (2004, p. 4) 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 13.

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 13 fornece valores positivos, e dessa maneira, são obtidos valores de NDWI próximos ou superiores a 0. (POLIDÓRIO, IMAI E TOMMASELLI, 2004, p. 4),

As áreas urbanizadas e com solo exposto tiveram valores de NDWI próximos àqueles encontrados em regiões mais úmidas com vegetação. Cardoso e Amorin (2014, p. 9) 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, p.389), 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.

#### 4.1.5.2. Índice VIX de Vulnerabilidade das águas subterrâneas à contaminação

Na Tabela 2 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.

Tabela 2 - Variáveis de entrada para a equação do Índice VIX de vulnerabilidade das águas subterrâneas à contaminação.

Área Amstral	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

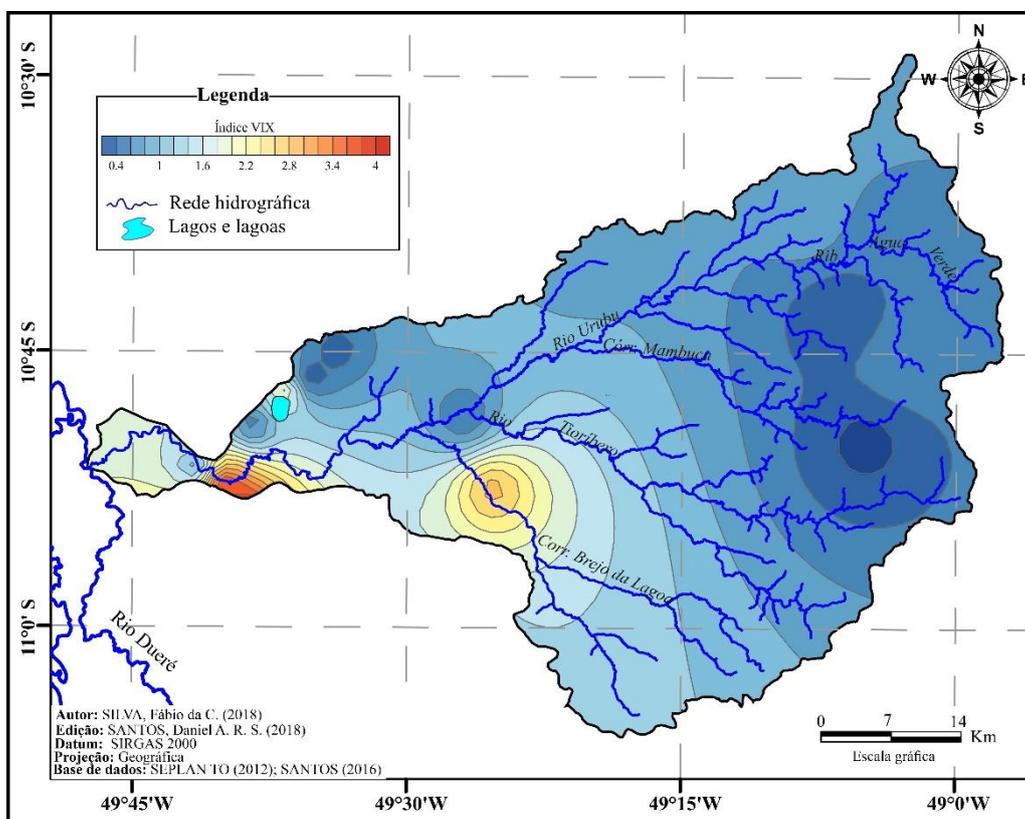
Observa-se que o ponto S15 apresentou o valor de índice VIX de 0,52, isto é, o menor do grupo amostral, enquanto o ponto S3 apresentou o maior valor para esse mesmo índice. O valor médio obtido para o índice de vulnerabilidade VIX da bacia do rio Urubu foi de 1,38.

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  $0,14 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  e  $0,32 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ , com uma média de  $0,22 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  para o grupo amostral, e coeficiente de variação de 30,3%.

A Figura 10 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.

Figura 10 - Mapa do Índice VIX de vulnerabilidade das águas subterrâneas à contaminação da bacia do rio Urubu.



Fonte: Organizado pelos autores e digitalizado por Daniel Santos

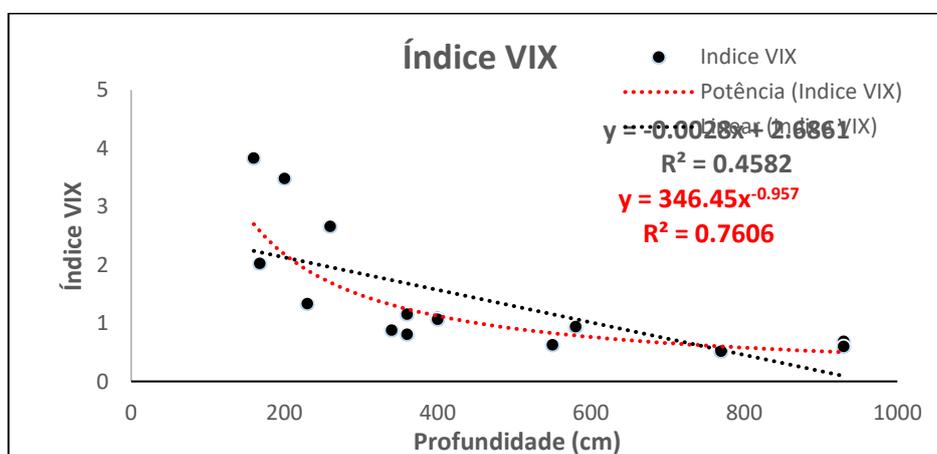
A cores mais frias destacaram as regiões cujos solos são intrinsecamente menos vulneráveis à contaminação.

Conforme evidenciado na Figura 10, 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, p. 1254) 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, p. 73) 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.

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 (Figura 11). 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 11 - Representação gráfica do comportamento da profundidade com relação ao índice VIX.



Fonte: Organizado pelos autores

Ainda com relação à porção oeste, conforme apresentado na Figura 9, 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, p. 364).

Silva et al. (2008, p.41) 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, p. 86) 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 et al. (2006, p. 306) 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. Ainda segundo os autores, 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 significativa 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 (MORAIS, 2017, p. 286).

#### 4.1.6. 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.

#### 4.1.7. Referências Bibliográficas

ARRUDA, Thiago José; VALDEVINO, Adriano Firmino. O Polo Agropecuário de Formoso do Araguaia/TO e sua relação espacial com os estados vizinhos. **Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional**, [s. l.], v. 10, n. 4, p. 362–386, 2014. Disponível em: <<http://www.rbgdr.net/revista/index.php/rbgdr/article/viewFile/1542/420>>. Acesso em: 20 jun. 2017.

BRASIL, Ministério das Minas e Energia. Secretaria Geral. **Projeto RADAMBRASIL. Folha SC. 22. Tocantins: Geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra**. Rio de Janeiro: 1981a. 524 p.

BRENNER, Viviane Carvalho; GUASSELLI, Laurindo Antônio. Índice de diferença normalizada da água (NDWI) para identificação de meandros ativos no leito do canal do rio Gravataí/RS–Brasil. **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, v. 17, p. 3693-3699, 2015.

BRITO, Elizabeth Rodrigues; MARTINS, SEBASTIÃO VENÂNCIO OLIVEIRA FILHO, ARY TEIXEIRA DE SILVA, Elias; SILVA, Alexandre Francisco Da. Estrutura fitossociológica de um fragmento natural de floresta inundável em área de orizicultura irrigada, município de Lagoa da Confusão, Tocantins. **Revista Árvore**, [s. l.], v. 30, n. 5, p. 9, 2006. Disponível em: <<http://www.redalyc.org/html/488/48853017/>>. Acesso em: 14 jul. 2017.

CARDOSO, Renata dos Santos; AMORIM, Margarete Cristiano de Costa Trindade. AVALIAÇÃO DOS ÍNDICES NDVI, NDBI E NDWI COMO FERRAMENTAS AO MAPEAMENTO DO USO E COBERTURA DA TERRA - PDF. In: ANAIS DO VII CBG 2004, Vitória. **Anais...** Vitória: Associação dos Geógrafos Brasileiros, 2004. Disponível em: <<https://docplayer.com.br/14942003-Avaliacao-dos-indices-ndvi-ndbi-e-ndwi-como-ferramentas-ao-mapeamento-do-uso-e-cobertura-da-terra.html>>. Acesso em: 7 jul. 2019.

DOUGLAS, Steven H.; DIXON, Barnali; GRIFFIN, Dale. Assessing intrinsic and specific vulnerability models ability to indicate groundwater vulnerability to groups of similar pesticides: a comparative study. **Physical Geography**, [s. l.], p. 1–19, 2018. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/02723646.2017.1406300>>. Acesso em: 20 abr. 2019.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. rev. atual. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997. Disponível em<[https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Manual+de+Metodos\\_000fvhotqk02wx5ok0q43a0ram31wtr.pdf](https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Manual+de+Metodos_000fvhotqk02wx5ok0q43a0ram31wtr.pdf)>. Acesso em 22 de abr. 2019.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. rev. e ampl. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisas de solos, 2018. Disponível em:

<<http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1094003>>. Acesso em 28 mar 2019

FIQUEROA, Fernando Henrique Vergara. **Gestão de Alto Nível** - Instituto de Atenção às Cidades - IAC. 2017. 22 slides. Disponível em: <[http://www.confea.org.br/sites/default/files/antigos/Palmas\\_FernanVergaraFigueiroa.pdf](http://www.confea.org.br/sites/default/files/antigos/Palmas_FernanVergaraFigueiroa.pdf)>. Acesso em 24 mai. 2019.

GAO, Bo-cai. NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. **Remote Sensing of Environment**, [s. l.], v. 58, n. 3, p. 257–266, 1996. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0034425796000673>>. Acesso em: 29 jul. 2017.

GOGU, R. C.; DASSARGUES, A. Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overlay and index methods. **Environmental Geology**, [s. l.], v. 39, n. 6, p. 549–559, 2000. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s002540050466>>. Acesso em: 18 abr. 2019.

GORAYEB, Paulo. Sérgio de Sousa. **Geologia do Estado do Tocantins: Aspectos Gerais e Conhecimento Atual**. In: MORAIS, Fernando de. (organizador). Contribuições a Geografia Física do Estado do Tocantins. Goiânia: Kelps, 2011.

GORAYEB, P.S.S. **Evolução geológica da região Aragacema – Pequiizeiro, Goiás-Brasil**. 1981. 111f. Dissertação ( Mestrado em Ciências) – Universidade Federal do Pará, Belém, 1981. Disponível em: <[http://cmig.ufpa.br/Disserta%C3%A7%C3%B5es/disserta%C3%A7oes01/paulo\\_sergio\\_de\\_sousa\\_goraye.pdf](http://cmig.ufpa.br/Disserta%C3%A7%C3%B5es/disserta%C3%A7oes01/paulo_sergio_de_sousa_goraye.pdf)>. Acesso em 14 jul 2017.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. rev. e ampl. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisas de solos, 2018. Disponível em: <<http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1094003>>. Acesso em 28 mar 2019.

MARTINS, Alan Elias Kardec et al. Mapeamento de unidades geomofológicas na Fazenda Lago Verde, planície do Araguaia, município de Lagoa da Confusão, estado do Tocantins. In: XII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO 2005, Goiânia. **Anais...** Goiânia: INPE, 2005. Disponível em: <<http://marte.sid.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2004/11.22.18.38/doc/1831.pdf>>. Acesso em: 14 jul. 2017.

MACHIWAL, Deepesh et al. Assessment and mapping of groundwater vulnerability to pollution: Current status and challenges. **Earth-Science Reviews**, [s. l.], v. 185, p. 901–927, 2018. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0012825217304713>>. Acesso em: 18 abr. 2019.

MCFEETERS, Stuart K. Using the normalized difference water index (ndwi) within a geographic information system to detect swimming pools for mosquito abatement: A practical approach. **Remote Sensing**, [s. l.], 2013.

MINGOTI, Rafael; SPADOTTO, Claudio Aparecido; MORAES, Diego Augusto de Campos. 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. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/pab/v51n9/0100-204X-pab-51-09-1252.pdf>>. Acesso em: 18 maio. 2017.

MORAIS, Fernando De. Classificação morfológica das dolinas da região de Lagoa da Confusão – TO. In: ANAIS DO 34º CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA 2017, Ouro Preto. **Anais...** Ouro Preto: Sociedade Brasileira de Espeleologia, 2017. Disponível em: <[http://www.cavernas.org.br/anais34cbe/34cbe\\_283-287.pdf](http://www.cavernas.org.br/anais34cbe/34cbe_283-287.pdf)>. Acesso em: 3 ago. 2019.

MORAIS, Paula Benevides De; JÚNIOR, Sebastião Nolêto; MARTINS, Iracy Coelho de Menezes. Análise de sustentabilidade do projeto hidroagrícola Javaés/Lagoa, no Estado do Tocantins. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, [s. l.], v. 34, n. 1, p. 83–111, 2017. Disponível em: <<http://seer.sct.embrapa.br/index.php/cct/article/view/26297/13927>>.

Acesso em: 26 fev. 2019.

PEREIRA, Gilney Cardoso.; MORAIS, Fernando. Geofísica aplicada ao estudo dos fluxos subsuperficiais no entorno da Lagoa da Confusão – TO. **Revista Geonorte**, Edição Especial, v. 2, n. 4, p.1475- 1483, 2012.

POLIDORIO, Airton Marco; IMAI, Nilton Nobuhiro; TOMMASELLI, Antonio Maria Garcia. Índice indicador de corpos d'água para imagens multiespectrais. In: (UFPE, Ed.)Simpósio em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação (SIMGEO) 2004, Recife. **Anais...** Recife: UFPE, 2004. Disponível em: <[https://www3.ufpe.br/cgtg/ISIMGEO/CD/html/Fotogrametria e Sensoriamento Remoto/Artigos/f027.pdf](https://www3.ufpe.br/cgtg/ISIMGEO/CD/html/Fotogrametria_e_Sensoriamento_Remoto/Artigos/f027.pdf)>. Acesso em: 7 jul. 2019.

REICHARDT, Klaus; TIMM, Luís Carlos. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. Barueri: Manole, 2004. 478 p.

SARP, Gulcan; OZCELIK, Mehmet. Water body extraction and change detection using time series: A case study of Lake Burdur, Turkey. **Journal of Taibah University for Science**, [s. l.], v. 11, n. 3, p. 381–391, 2017. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1016/j.jtusc.2016.04.005>>. Acesso em: 7 jul. 2019.

SEPLAN - SECRETARIA DE PLANEJAMENTO DO ESTADO DO TOCANTINS. **Atlas do Tocantins**: subsídios ao planejamento da gestão territorial. 5 ed. Palmas: Seplan, 2008.

SEPLAN - SECRETARIA DE PLANEJAMENTO E MEIO AMBIENTE, DIRETORIA DE ZONEAMENTO ECOLÓGICO ECONÔMICO. **ATLAS DO TOCANTINS**: subsídios ao planejamento da gestão territorial. Secretaria do Planejamento e da Modernização da Gestão Pública - SEPLAN. Superintendência de Pesquisa e Zoneamento Ecológico-Econômico. Diretoria de Zoneamento Ecológico Econômico - ZEE. Organizado e atualizado por Paulo Augusto Barros de Sousa, Rodrigo Sabino Teixeira Borges e Ricardo Ribeiro Dias. 6. ed., Rev. Atu. Palmas, Seplan, 2012. 80 p.

SPADOTO, C.A. **Índice de vulnerabilidade de água subterrânea à contaminação – XIX**. Campinas: Embrapa Gestão Territorial, 2014. 3 p. (Embrapa Gestão Territorial. Comunicado técnico, 2).

SILVA, Osmara Fátima Da et al. Impacto socioeconômico e ambiental da soca de arroz produzida na microrregião do Rio Formoso, Estado do Tocantins. **Redes. Revista do Desenvolvimento Regional**, [s. l.], v. 13, n. 1, p. 28–48, 2008. Disponível em: <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=552056855002>>. Acesso em: 23 jun. 2019.

UNESCO. **The United Nations World Water Development Report 2019: Leaving No One Behind**. Paris; 2019. p. 202. Disponível em: <<https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000367306>>. Acesso em 5 abr. 2019.

van GENUCHTEN, M. Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.44, p.892-898, 1980

VÖRÖSMARTY, Charles J. et al. Global Water Resources: Vulnerability from Climate Change and Population Growth. **Science**, [s. l.], v. 289, n. 5477, p. 284–288, 2000. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/10894773>>. Acesso em: 18 abr. 2019.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **Guide to the Global Observing System** – WMO n° 488. Gêneva, 2012. p. 172. Disponível em <[https://www.oceanbestpractices.net/bitstream/handle/11329/117/wmo\\_4882012\\_en.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://www.oceanbestpractices.net/bitstream/handle/11329/117/wmo_4882012_en.pdf?sequence=1&isAllowed=y)>. Acesso em 14 fev 2019.

## **4.2. Qualidade física dos solos e sua relação com o uso da terra na bacia do Rio Urubu, Tocantins** (Artigo a ser submetido à Revista Acta Geográfica. Autores: Fábio da Costa Silva; Fernando Moraes)

### **Fábio da Costa Silva**

Mestrando no Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais da UFT, Campus de Palmas, Palmas (TO).

### **Fernando de Moraes**

Doutor em Evolução Crustal e Recursos Naturais pela Universidade Federal de Ouro Preto. Professor Pesquisador no Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais da UFT, Campus de Palmas, Palmas (TO).

#### 4.2.1. Resumo

O presente estudo descreve o uso, a cobertura da terra e caracterizar a qualidade física de amostras de solos na bacia do rio Urubu, Tocantins. A análise do uso e ocupação da terra foi realizada por meio de classificação supervisionada de imagens do satélite LANDSAT 8. Por meio do programa Qualisolo®, foi calculado o índice S para 15 amostras de solo distribuídas entre as categorias de uso de cobertura identificadas, considerando os parâmetros físicos: densidade globais, de partícula e granulometria. Observou-se que mais de 40% das terras da bacia foram antropizadas, e todas as amostras de solo obtiveram valores de índice S inferiores a 0.035, sendo, portanto, proveniente de solos de baixa qualidade física e possivelmente degradados. Faz-se necessária a adoção de práticas de manejo do solo que sejam mais sustentáveis a fim de garantir o uso eficiente do solo. Recomenda-se a realização de um estudo focado na qualidade física dos solos cujos usos causem mais danos ambientais à bacia, tendo como suporte uma análise multitemporal dos usos e cobertura da terra.

**Palavras-Chaves:** Uso e ocupação da terra, Qualisolo®, índice S, Degradação, Rio Urubu.

#### 4.2.2. Abstract

This study aims to describe the land use and land cover, as well as to characterize the physical quality of soil samples in the Urubu river basin, Tocantins. Land use and occupation analysis was performed by a supervised classification of LANDSAT 8 satellite images. By operating Qualisolo® program, the S index was calculated for 15 soil samples distributed among the identified land use categories, considering the physical parameters: bulk density, particle density and particle size. It was observed that over 40% of the watershed lands were anthropized, and all soil samples obtained S-index values inferior to 0,035, and therefore, they were extracted from low physical quality soil. It is necessary to adopt sustainable soil practices in order to assure an efficient soil use. It is recommended to conduct a study focused on the physical quality of soils whose uses cause more environmental damage to the basin, supported by a multitemporal analysis of land uses and land cover.

**Key-words:** Land cover and land use, Qualisolo®, S index, Degradation, Urubu river.

#### 4.2.3. Introdução

A transformação do espaço geográfico ao longo dos anos tem sido foco de muitos estudos ambientais, pois entende-se que as atividades humanas se tornaram cada vez mais decisivas nos processos de alteração da paisagem.

Dentro do estudo da paisagem, a caracterização do uso e cobertura do solo é uma ferramenta essencial para analisar a dinâmica física e sociocultural do espaço. Tal instrumento faz uso de uma visão mais integrada entre sociedade e o meio, sendo que a abordagem contemporânea dos estudos de uso e cobertura da terra é também fruto da evolução do pensamento geográfico (IBGE, 2013).

A agência norte-americana de Administração Oceânica e Atmosférica Nacional – NOAA (2018) explica que o termo “uso da terra” se refere à maneira como o homem usa/interage com a terra (superfície), isto é, com o fim de explorá-la por vias sustentáveis ou não.

A terminologia “cobertura do solo” está vinculada a cobertura física da terra, como por exemplo, florestas, áreas alagadas, superfícies impermeáveis e corpos hídricos. A caracterização da cobertura do solo pode ser feita por meio de cenas obtidas de sensores

atmosféricos e imagens aéreas (JASEN, GREGORIO, 2002; COMBER WADSWORTH, FISHER, 2008).

Com a maior disponibilidade de satélites, e conseqüentemente, da melhoria na resolução e processamento digital de imagens, estudos ambientais recentes têm apresentado uma tendência de apenas registrar e classificar a “cobertura do solo” em detrimento do “uso do solo”. Tal tendência é mais comum em levantamentos de grande escala. Apesar disso, é necessário ratificar que a componente socioeconômica da terminologia “uso do solo” tem implicações culturais e políticas, as quais não podem ser detectadas por meio de algoritmos modernos (FISHER, WADSWORTH, 2005; COMBER et al. 2016). Portanto, o uso da terra não é determinado diretamente por meio do processamento de imagens obtidas por satélite, mas sim pela interpretação visual do pesquisador (COMBER, WADSWORTH, FISHER, 2008).

IBGE (2013) destacou que os estudos do uso e cobertura do solo devem trilhar uma rota teórico-metodológica que adotem técnicas qualitativas e quantitativas respaldados na coleta de dados, classificação e posterior exposição dos resultados. Dessa forma, a implementação de geotecnologias (sistemas de informações geográficas e imagens com resolução adequada) facilita a identificação e classificação das feições da superfície da terra.

No Brasil, a evolução nas formas de uso da terra tornou-se mais expressiva no século XX, sendo que a criação do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE possibilitou a organização de estudos de uso e cobertura da terra com o apoio paralelo de outras organizações estatais como o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE e a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa (IBGE, 2013).

Na década de 1980, as expedições do Programa RADAM e RADAM Brasil tiveram o objetivo de mapear não apenas as feições físicas da terra, como também questões socioeconômicas do país. Posteriormente, o RADAM Brasil uniu-se ao IBGE e, desde então, as ações destes tiveram um enfoque em análises regionais com vistas ao ordenamento territorial. Quanto aos estudos de uso e cobertura da terra notou-se um direcionamento à análise diagnóstica e ao zoneamento ambiental (IBGE, 2013).

A compreensão da dinâmica de organização do espaço geográfico é fundamental para o planejamento do uso regulamentado de serviços e recursos ambientais de uma região. Nesse sentido, é bastante pertinente a execução de estudos de uso e ocupação do solo em bacias hidrográficas que são intensivamente exploradas por atividades humanas,

uma vez que os compartimentos ambientais dessas áreas estão mais suscetíveis às alterações de natureza física, química, biológica e social.

Na busca por índices de sustentabilidade que contribuam com a gestão de recursos naturais, Dexter (2004) propôs avaliar a qualidade dos solos temperados por meio do índice S, o qual diagnostica o quão impactada se encontra a estrutura física do solo. O índice é capaz de determinar se um dado solo está degradado ou não, e dessa forma, permite aos gestores de bacia propor ações mitigadoras e compensatórias e, quando necessário, a implementação de um plano de recuperação de áreas degradadas (TORMENA et al. 2008; SOUZA, BONOMO, PIRES 2015).

No Tocantins, a bacia do rio Urubu tem se destacado por sua disponibilidade hídrica e relevo favoráveis ao cultivo de leguminosas e cereais em regiões de várzea (TOCANTINS, 2007; LACERDA FILHO, 2013). Além disso, esta bacia tem potencialidades turísticas e áreas passíveis de mineração (DUTRA; ADORNO; SENNA, 2015). No contexto de diversidade biológica, o rio Urubu drena uma área de transição entre biomas e, portanto, sua bacia é o habitat de uma fauna e flora adaptadas às condições ecotonais (MARTINS et al., 2006; BISPO, 2015).

As características naturais da área em estudo a tornam bastante atrativa às atividades do agronegócio, as quais têm impulsionado o aumento do percentual da composição do PIB dos municípios que integram a bacia (SANTOS, RABELO, 2008).

Em 2016, a região da planície do Araguaia foi bastante impactada pelo severo período de estiagem que causou um forte déficit hídrico, cujos efeitos repousaram não somente nas comunidades ribeirinhas e indígenas, mas também reduziram consideravelmente a vazão dos maiores rios daquela região. Dentre as bacias que foram afetadas, a bacia do Rio Urubu foi citada com frequência na mídia em virtude dela aportar grandes projetos de irrigação voltado para o cultivo de grãos (FLEISHMANN, 2016; MORAIS, NOLETO JÚNIOR, MARTINS, 2017).

Considerando o contexto de vulnerabilidade hídrica que a bacia do rio Urubu começa a enfrentar, faz-se necessário a implementação de estratégias de gestão voltadas a conservação do solo, assim como a adoção de práticas sustentáveis no manejo da terra, pois a medida que os solos da bacia ficam mais degradados, as taxas de infiltração no solo diminuem, fato esses que provocam os volumes precipitados tendem a escoar, ocasionando a perda de solo por erosão e o assoreamento dos cursos d'água devido ao aporte de sedimentos (MINELLA et al., 2015).

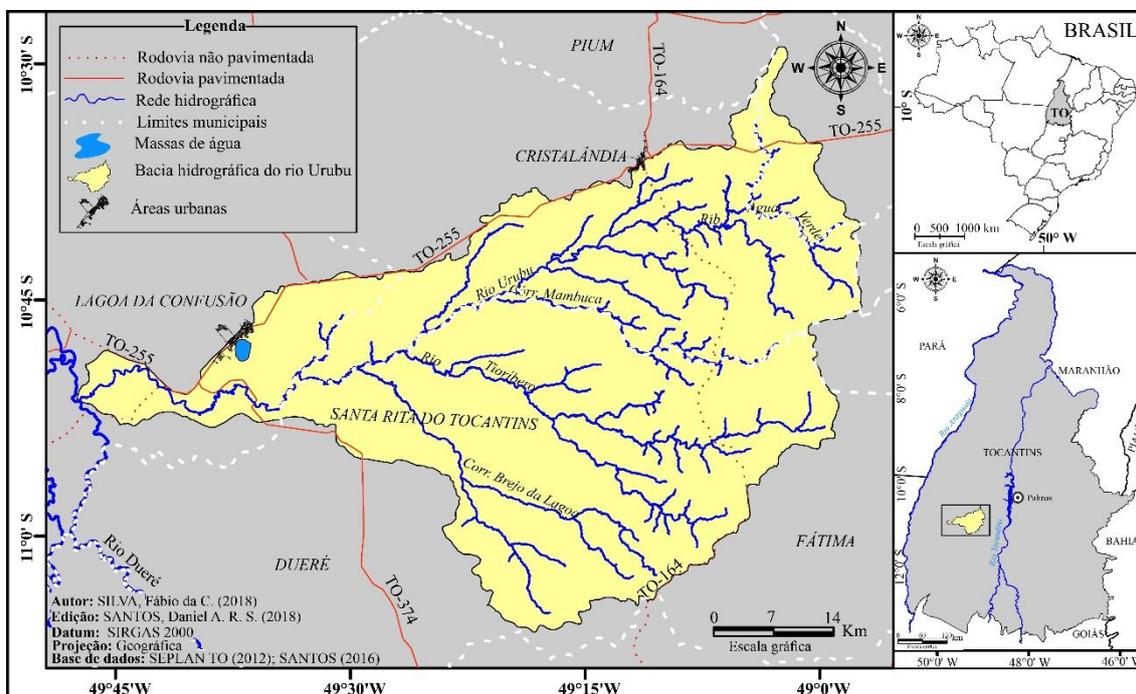
Dado os cenários atuais de exploração dos recursos naturais na região do rio Urubu, o presente estudo busca identificar as classes de uso e cobertura da terra na bacia do rio Urubu, Estado do Tocantins, e posteriormente, avaliar a qualidade da estrutura física dos solos dessas classes por meio do índice S.

#### 4.2.4. Material e métodos

##### 4.2.4.1. Área de estudo

Localizada na região sudoeste do Estado do Tocantins, a bacia do rio Urubu drena uma área de 2640 km<sup>2</sup>, a qual representa 0.97% da área total do Estado. A bacia do rio Urubu abrange partes de sete municípios, sendo eles: Cristalândia, Crixás do Tocantins, Fátima, Lagoa da Confusão, Pium, Nova Rosalândia e Santa Rita do Tocantins. A bacia se estende dentro do quadrante de coordenadas geográficas com 49° 15' 2" e 48° 57' 52" de Longitude Oeste e, 10° 30' 3" e 11° 4' 37" de Latitude Sul (Figura 12).

Figura 12 - Mapa de localização da área de estudo.



Fonte: Organizado pelos autores e digitalizado por Daniel Santos.

A Figura 12 permite visualizar os principais acessos à área de pesquisa. Destacam-se as rodovias pavimentadas TO-255 e TO-374, as quais, respectivamente, cortam a bacia

nos sentidos Sul-Norte e Leste-Oeste. Outra importante rodovia estadual não pavimentada que percorre a bacia de norte a sul é a TO-164, a qual conecta os municípios de Cristalândia e Aliança do Tocantins.

A região norte da bacia é drenada pelo ribeirão Barreiro, enquanto o lado sul apresenta o rio Tioribero como o contribuinte mais expressivo. No exutório da bacia observou-se que a vazão de referência para 90% dos dados de descarga – Q90 - é de 1.245 m<sup>3</sup>/s no período de estiagem e 28.627 m<sup>3</sup>/s na fase mais úmida (FIQUEROA, 2017).

É válido destacar que a bacia do rio Urubu é uma das seis sub-bacias que compõem o sistema do rio Formoso. Nesse contexto, o rio Urubu é responsável por escoar os volumes precipitados nas porções norte da bacia do rio Formoso, sendo que esta, posteriormente, contribui para o rio Araguaia.

No que se refere aos aspectos geomorfológicos, 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 (SEPLAN, 2012).

Outros domínios presentes na região são os Patamares do Interflúvio Araguaia-Tocantins, que correspondem às áreas de maior altitude (entre 250 e 300 m), sendo dessa forma, importantes para a recarga hídrica da bacia (MARTINS, 2004). A unidade geomorfológica denominada de Depressão do Médio Araguaia, localmente representada pela Depressão Urubu-Dueré, intercala as planícies e o patamares anteriormente descritos (SEPLAN, 2008).

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. A temperatura média anual varia de 25 a 26°C, com precipitação média 1800 a 2000 mm (SEPLAN, 2012).

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 1400 e 1.700 mm. Na sua porção oeste, a bacia se caracteriza pelas condições de clima úmido subúmido com moderada deficiência hídrica no inverno (C2wA´a´), e evapotranspiração média anual em torno de 1500 mm (SEPLAN, 2012).

As condições climáticas e topográficas colaboraram para a predominância de Gleissolos, Plintossolos e Latossolos Vermelho-Amarelos. As áreas adjacentes aos rios

são fortemente influenciadas pela dinâmica do lençol freático, e por isso, nessas áreas são encontrados Gleissolos e Plintossolos, que se distinguem pelo fato de que os Gleissolos apresentarem cor acinzentada nos primeiros 60 cm do horizonte A (EMBRAPA, 2018).

Observa-se que as variações do lençol freático proporcionam reações de oxidação e redução, responsáveis pelas cores existentes nos perfis dessas duas classes de solo. 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 profundidade alcançada pelos mesmos (EMBRAPA, 2018).

As formações geológicas da bacia estão circunscritas ao Grupo Tocantins, que é constituído pelas Formações Couto Magalhães e Pequizeiro. Essas formações apresentam fácies metamórficas de filito, quartizitos, ardósias, xistos, muscovita-clorita-quartzo, metarenitos, metacosios e metacalcários. Ambas as formações se encontram sobrepostas por sedimentos quarternários pertencentes à Cobertura Sedimentar do Bananal. A Formação Araguaia, também chamada de Cobertura Sedimentar do Bananal é composta por sedimentos inconsolidados que formam uma camada de 170 a 320 m de espessura (GORAYEB, 1981, 2011; PEREIRA; MORAIS, 2012).

Foram selecionadas as cenas 222/068 e 223/067 do satélite LANDSAT 8, sensor OLI, com datas de passagem em 28/08/2017 e 18/07/2017, respectivamente. Tais cenas, já georreferenciadas, foram obtidas gratuitamente na plataforma do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE. Com o auxílio do programa de sistema de informações geográficas QGIS versão 2.18 - Las Palmas, as imagens foram pré-processadas com o objetivo de realizar correções geométricas. As imagens foram também realçadas a fim de melhorar a visibilidade das feições, e por fim, submetidas à técnica de classificação supervisionada, em que as classes foram identificadas por meio de similaridade das amostras de cada classe conforme apontadas pelo usuário.

A nomenclatura das classes adotadas neste trabalho foi extraída de IBGE (2013). Foram usadas as seguintes classes: área urbana, agricultura, agropecuária, formações florestais, formações savânicas e águas continentais. As classes identificadas foram destacadas com as cores que também foram fornecidas pelo Manual de cobertura e uso da terra do IBGE.

Uma vez que a área de estudo apresenta uma diversidade de atividades agrícolas, para simplificar a análise, quando as feições remeteram a culturas temporárias ou permanentes, tais atividades foram agrupadas em “agricultura”. Enquanto o termo

“agropecuária” foi usado no sentido de compreender as atividades de trato de animais de pequeno a grande porte (IBGE (2013).

A distribuição dos pontos para coleta levou em consideração às variedades de solos, usos e cobertura identificados em etapas anteriores deste mesmo estudo. Além disso, a distribuição dos pontos utilizou da análise do índice de diferença normalizada de água (NDWI em inglês) com intuito de identificar áreas da bacia com o potencial de acumulação de água conforme indicado por GAO (1996). Assim, buscou-se contemplar todas as classes identificadas pelo estudo de cobertura e uso do solo, sendo que um total de 15 áreas foram selecionadas.

Foi atribuída uma pontuação para cada classe de solo da bacia de acordo com o seu comportamento quanto à drenagem natural (Quadro 7). Foram atribuídos valores entre 1 e -1, uma vez que o mesmo intervalo é registrado pelos valores de NDWI (BRENNER; GIASSELLI, 2015). Os Gleissolos receberam o valor máximo em virtude dessa classe se encontrar permanentemente ou periodicamente saturados por água. Os Latossolos receberam a menor pontuação em virtude de apresentarem uma melhor drenagem e maior profundidade (EMBRAPA, 2018).

**Quadro 6 - Classes de solo e respectiva pontuação quanto à capacidade de drenagem**

Solos	Pontuação
Latossolos	0
Plintossolos	0,75
Gleissolos	1

**Fonte: Elaborado pelos autores.**

A álgebra dos mapas foi realizada com o auxílio do programa ESRI Arcgis, versão 2010, conforme as seguintes etapas:

1. Foram processadas a camada de NDWI e a camada com as classes dos solos cuja pontuação fora previamente adicionada à tabela de atributos (Quadro 7). A camada obtida na álgebra apresentou pixels cujos valores podiam variar entre 1 e -1, sendo que quanto mais próximo de 1, mais significativa era a interação do solo com a água, quer seja por acumulação (NDWI) ou por drenagem insuficiente.

2. A camada gerada pela álgebra foi sobreposta à camada contendo as classes de uso e cobertura do solo. Dessa forma, selecionou-se áreas da bacia que tiveram pontuações elevadas (próximas a 1) e que contemplassem todas as categorias de uso de cobertura do solo da bacia em estudo.

#### 4.2.4.2. Índice S de qualidade do solo

O cálculo do índice S demandou a realização de campanhas de coleta de amostras de solos da bacia do rio Urubu, pois o índice leva em consideração valores de densidade global do solo, densidade de partícula e as porcentagens das frações granulométricas e respectivos diâmetros de partícula.

O índice S determina a qualidade física dos solos por meio do ponto de inflexão do modelo da curva retenção de água dos solos estudados. Maia (2011) mostrou que solos com valores de índice S superiores a 0.035 são fisicamente bem estruturados. Por outro lado, solos que apresentam índices S inferiores a este valor, estão associados a solos de qualidade física baixa ou ruim.

A concepção do índice S baseia-se no conceito de que solos com boa qualidade física apresentam características estruturais que condicionam o bom funcionamento físico deste. Dessa forma, fatores como textura, matéria orgânica e porosidade podem influenciar nos valores de índice S obtidos (DEXTER, 2004). Além de manter uma boa estrutura, resistir às pressões e à compactação, um solo de boa qualidade deve também proporcionar o crescimento radicular e possuir taxas de infiltração que colaborem no armazenamento de água (TOPP et al., 1997).

Para obter o índice S foi necessário o uso do programa Qualisolo® – Embrapa Solos. O programa possui uma interface que permite a inserção das seguintes variáveis físicas das amostras de solo: densidade global ( $\text{g/cm}^3$ ), frações texturais (%) com respectivos diâmetros de partícula e a densidade de partícula ( $\text{g/cm}^3$ ). O algoritmo do programa considera o modelo de Arya e Paris (1981) para estimar a curva de retenção de água do solo e, posteriormente, identifica o ponto de inflexão da curva de retenção (Equação 21), obtendo assim, o índice S da amostra (NANIERE et al., 2009; DEXTER, 2004).

$$S = -n(\theta_{Sat} - \theta_{res}) \left[ 1 + \frac{1}{m} \right]^{-(1+m)} \quad 21$$

Onde  $S$ ,  $\theta_{Sat}$  e  $\theta_{res}$  são, respectivamente, índice  $S$  (adimensional) e as umidades de saturação e residual, em kg/kg, e  $n$  e  $m$  ( $m = 1-1/n$ ) são parâmetros empíricos adimensionais de ajuste (DEXTER, 2004).

#### 4.2.5. Resultados e Discussão

A Tabela 3 fornece as áreas das classes de cobertura e usos identificados, assim como as respectivas porcentagens em relação à área total da bacia. Observa-se que mais de 40% das terras da bacia do rio Urubu foram ocupadas por atividades de intensa intervenção antrópica, sendo que a agropecuária foi o uso de maior destaque, uma vez que, dentro da escala de observação, correspondeu a 30 % das terras circunscritas na área de estudo.

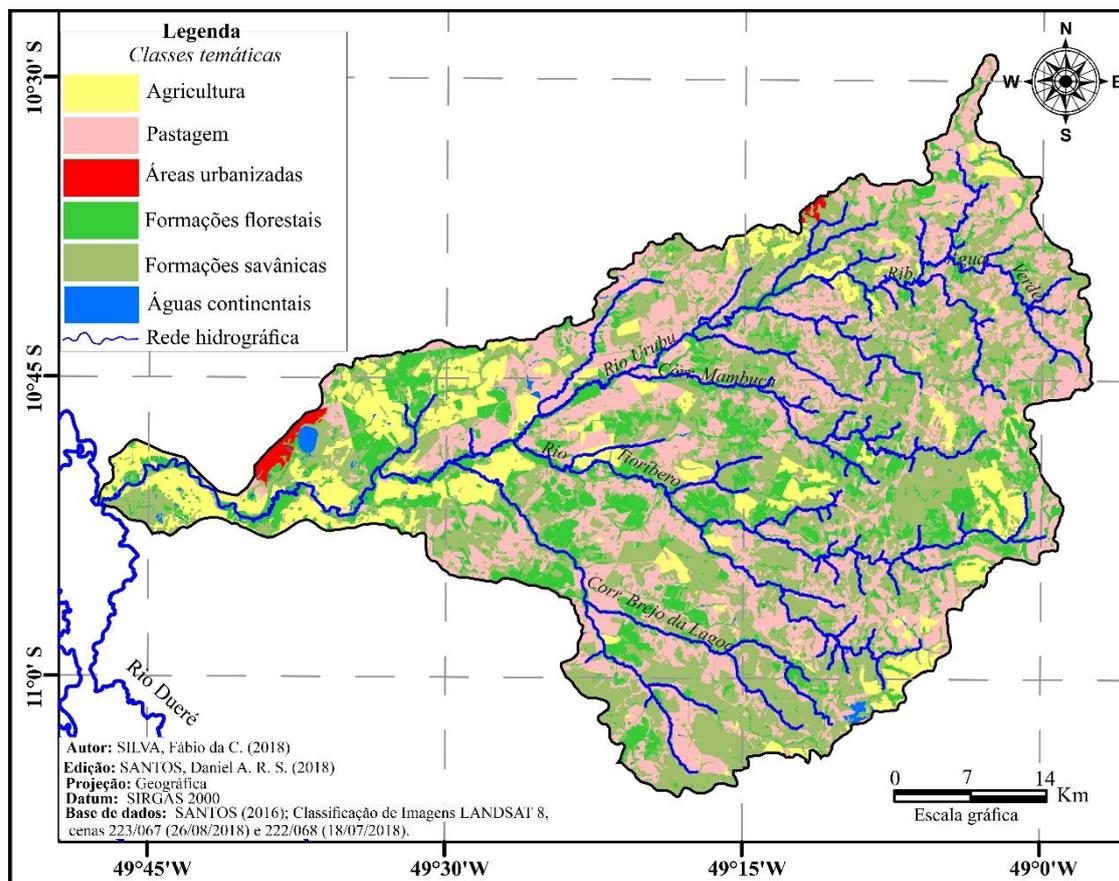
**Tabela 3 - Distribuição porcentual do uso e da cobertura das terras da bacia do rio Urubu.**

<b>Classes</b>	<b>Área (km<sup>2</sup>)</b>	<b>%</b>
Águas continentais	15,84	0,6
Formações Florestais	493,68	18,7
Formações Savânicas	1032,24	39,1
Pastagens	792	30,0
Agricultura temporária	295,68	11,2
Áreas Urbanizadas	13,2	0,5
<b>Área total da bacia</b>	<b>2642,64</b>	<b>100</b>

Fonte: Elaborado pelos autores.

As áreas urbanizadas foram destacadas em vermelho na Figura 13. A mancha de urbanização representou 0,5% da área total da bacia do rio Urubu, correspondendo aos dois municípios mais populosos da bacia: Lagoa da Confusão e Cristalândia. De acordo com IBGE (2010a, 2010b), as densidades demográficas para a Lagoa da Confusão e Cristalândia foram, respectivamente, 0,97 hab/km<sup>2</sup> e 3,91 hab/km<sup>2</sup>. Os baixos índices demográficos podem ser atribuídos ao tamanho da área de cada município, uma vez que ambos não apresentaram grandes contingentes populacionais.

Figura 13 - Mapa de uso e cobertura da bacia do rio Urubu, TO.



Fonte: Organizado pelos autores e digitalizado por Daniel Santos

Ambas as cidades, Cristalândia e Lagoa da Confusão, possuem históricos de ocupação vinculados às atividades minerais, no entanto, a expansão das fronteiras agrícolas sobre o Cerrado tocantinense alterou a estrutura econômica regional, de modo que, a matriz de atividades agropecuárias geradoras de renda se tornou mais diversificada e mais produtiva. A Tabela 4 apresenta dados a respeito das áreas de cereais e grãos colhidas nos anos de 2010 e 2015 (IBGE, 2019). Conforme verificado, o município da Lagoa da Confusão teve um considerável aumento na área colhida, com destaque para produção de soja, arroz e melancia.

**Tabela 4 - Áreas utilizadas pelo cultivo de arroz, milho, melancia e soja nos municípios de Lagoa da Confusão e Cristalândia no intervalo de 2010-2015.**

Municípios	Cultura	Área (hectares)		
		2010	2015	%
Lagoa da Confusão	Arroz	31000	43600	40,65
	Milho	60	2700	4400,00
	Melancia	2080	8000	284,62
	Soja	13000	43824	237,11
Cristalândia	Arroz	2450	3100	26,53
	Milho	500	120	-76,00
	Melancia	-	-	-
	Soja	*	3250	-

Fonte: IBGE – Produção Agrícola Municipal (2019)

Nota: \* Não houve registro de plantio de soja em 2010.

A região do baixo rio Urubu possui projetos agrícolas sob condições de irrigação. Foram feitos volumosos investimentos para a implementação do Projeto Lagoa da Confusão, o qual integra o Projeto de Irrigação das Várzeas do Araguaia conforme estabelecido no Programa Estadual de Irrigação – PEI (BISPO, 2015; MORAIS, NOLETO JÚNIOR, MARTINS, 2017).

Em 2016, a bacia do rio Urubu enfrentou um severo período de estiagem que comprometeu a vazão de seus cursos d'água. O cenário de *déficit* hídrico culminou na interrupção da captação de água do rio Urubu, pois as agências reguladoras suspenderam temporariamente as outorgas em virtude dos riscos ambientais inerentes a uma situação de escassez. Apesar da questão climática, Alves et al. (2015) destacaram que o conflito de uso, gerado principalmente pelas atividades agropecuárias, contribui no processo de deterioração da qualidade dos recursos hídricos da região sudoeste do Tocantins, assim como na diminuição da disponibilidade dos mesmos, uma vez que tais atividades reduzem a função ambiental das áreas naturais de proteção (matas ciliares) dos recursos hídricos.

Sousa (2018) evidencia que a variedade de uso e ocupação do solo existente na bacia do Urubu impacta a qualidade físico-química de corpos hídricos superficiais e subterrâneos. O autor alerta para as condições de vulnerabilidade das formações cársticas da bacia as quais são influenciadas pelas alterações sazonais do lençol freático. Nesse sentido, a forte presença de atividades agropecuárias na área de estudo pode levar a deterioração da qualidade das águas subterrâneas, pois diante da necessidade do aumento de produtividade e dos danos causados por pragas às lavouras, os produtores empregam

defensivos agrícolas e fertilizantes que, sob condições de plantio irrigado ou alagado, podem impactar os corpos hídricos subterrâneos. Além disso, o uso de maquinário agrícola pode ocasionar a compactação das camadas superiores, e dessa forma, diminuir a infiltração de água, reduzindo as áreas de recarga do aquíferos (MENEZES, 2012).

A Tabela 5 apresenta os valores de índice S das amostras de solo e seus respectivos valores de densidade global e porosidade total.

**Tabela 5 - Valores de Índice S, porosidade, densidade global e frações texturais das amostras coletas.**

Ponto	Classe de Uso e Cobertura da terra	Índice S	Densidade Porosidade		Qualidade do Solo	Areia %	Silte %	Argila %
			Global (g/cm <sup>3</sup> )	Total (%)				
S1	Áreas Urbanizadas	0,01493	1,5	44,44	Pobre	39,1	13,7	47,2
S2	Áreas Urbanizadas	0,01981	1,19	55,93	Pobre	24,6	23,4	51,9
S3	Formação Savânica	0,01619	1,61	40,37	Pobre	66,3	12,5	21,1
S4	Agricultura Temporária	0,02747	1,35	49,44	Pobre	73	10,4	16,5
S5	Agricultura Temporária	0,00838	1,44	45,25	Pobre	16,8	17,8	65,4
S6	Pastagens	0,00789	1,58	41,48	Pobre	26,3	11,4	62,2
S7	Pastagens	0,02091	1,48	43,73	Pobre	70,7	7,6	21,7
S8	Formações Savânicas	0,02455	1,38	47,53	Pobre	55,9	13,2	30,9
S9	Pastagens	0,03378	1,36	49,63	Pobre	72,3	9,9	17,8
S10	Formações Florestais	0,03202	1,04	56,30	Pobre	36,2	19,8	44
S11	Pastagens	0,01855	1,5	45,26	Pobre	50,6	14,7	34,6
S12	Pastagens	0,01848	1,34	49,05	Pobre	51,2	5,1	43,7
S13	Pastagens	0,01721	1,61	41,24	Pobre	67,6	4,6	27,7
S14	Formações Savânicas	0,02109	1,34	50,37	Pobre	48,4	6	45,5
S15	Formações Savânicas	0,01171	1,79	33,70	Pobre	65	9,9	25,1
	Médias	0,020	1,43	46,25	-	50,93	12	37,02
	Coefficiente de Variação (%)	39.00	12.76	12.85	-			

Fonte: Elaborada pelos autores.

Os dados referentes à densidade global variaram entre 1,04 g/cm<sup>3</sup> e 1,79 g/cm<sup>3</sup>, resultando no baixo coeficiente de variação de 12,76%. A porosidade total das amostras teve um coeficiente similar, alcançando o valor de 12,85%. Observa-se ainda que todas as amostras possuem baixa qualidade física.

A amostra S6 apresentou o menor valor de índice S do grupo analisado. Sua densidade global foi de 1,58 g/cm<sup>3</sup>. Contudo, na Tabela 3, observou-se que a densidade global da amostra S6 foi ligeiramente acima da média do grupo, e ainda que tal variável seja uma importante componente física utilizada no cálculo do índice S, isoladamente, ela não justifica as variações de índice S, pois as amostras possuem diferentes distribuições texturais.

A fração argila constituiu 62,2% da amostra S6, e por isso, a amostra tende a formar uma maior quantidade de microporos se comparada às amostras arenosas (Tabela 5). A literatura mostra que a macroporosidade tem correlação positiva com o índice S, portanto, solos com predominância de microporos tendem a fornecer baixos valores de índice S (DEXTER, 2004; SILVA et al., 2012; OLIVEIRA et al., 2013).

A predominância de valores de índice S inferiores a 0,035 sinalizou a necessidade da adoção de práticas sustentáveis de manejo do solo, em especial nas áreas que comportam usos que impactam o tamanho dos poros do solo, isto é, afetam a estrutura física, levando-o à compactação. Dexter (2004), Tormena et al. (2008) e Souza, Bonomo e Pires (2015) argumentam que solos com maior densidade global (mais compactados) geram índices S que os qualificam como de baixa qualidade física.

Naderi-Boldaji e Keller (2016) apontaram que o grau de compactação do solo tem alta correlação positiva com o índice S, e por isso, os autores sugerem que tais variáveis sejam permutáveis quanto ao diagnóstico de áreas de solos degradados.

O uso irracional do solo da bacia tem impacto direto na qualidade e disponibilidade de recursos hídricos, pois solos degradados apresentam baixas taxas de infiltração que levam ao aumento do escoamento superficial. Dessa maneira, os processos erosivos são acentuados por toda a bacia, e conseqüentemente, problemas ambientais como a perda de solos, carreamento de sedimentos, assoreamento das margens de rios e córregos, e a alteração da turbidez da água levam a deterioração dos recursos hídricos da bacia do rio Urubu (MERTEN, MINELLA, 2002; ALVES et al., 2014)

Independente do uso e ocupação existente na área, todas as amostras apresentaram valores de índice S inferiores ao valor de referência proposto por Maia (2011), o qual

propôs  $S < 0,035$  como valor determinante para caracterizar o solo como fisicamente degradado. Dos 15 pontos analisados, 11 tiveram índices  $S$  inferiores ao valor limitante proposto por Andrade e Stone (2009). Segundo esses autores, os solos de cerrado que estão completamente degradados apresentaram valores de índice  $S \leq 0,025$ , e sob essas condições de degradação, o solo pode oferecer resistência à penetração de raízes, afetando diretamente a produtividade das áreas com agricultura temporária.

Observou-se ainda que as amostras coletadas em áreas cobertas por formações savânicas e florestais também obtiveram índices  $S$  que contradizem a expectativa concernente aos solos de regiões com pouca ou nenhuma intervenção humana recente. Os baixos valores do índice  $S$  e porosidade total, juntamente aos elevados valores de densidade global para essas áreas, podem estar vinculados às questões pedogenéticas (MARTINS, 2006), ou ainda ter sido influenciados por práticas inadequadas de manejo anteriores a um possível processo de regeneração da área. Para considerar a última opção, será necessário o estudo cronológico do uso e ocupação da área a fim de verificar de que forma aqueles solos foram manejados nos últimos anos.

#### 4.2.6. Conclusão

A bacia do rio Urubu apresentou uma matriz de uso e ocupação bem diversificada, sendo que os usos diretamente relacionados com intervenções antrópicas corresponderam a 40% das terras da bacia. Apesar de expressiva atividade agropecuária, a área de estudo ainda tem 58% de suas terras cobertas por vegetação nativa (formações savânicas e florestais).

Observou-se que todas as áreas amostradas na bacia do rio Urubu, inclusive aquelas com cobertura vegetal nativa, obtiveram valores de índice  $S$  inferiores a 0,035, sendo um indicativo de baixa qualidade física dos solos. Dessa forma, o índice  $S$  mostrou-se eficaz no diagnóstico da qualidade física dos solos. Tal contexto demanda a adoção de práticas de manejo de solo mais sustentáveis, em especial quanto ao uso de maquinário pesado e ao excesso de irrigação.

Visto que as áreas que se encontraram com cobertura vegetal preservada também obtiveram baixos valores de índice  $S$ , recomenda-se a realização de estudos futuros focados na relação entre o índice  $S$ , as propriedades físicas dos solos e o histórico de perturbações da bacia fornecido por uma análise multitemporal do uso e cobertura do solo.

Considerando as dimensões da bacia e seus diferentes usos, recomenda-se a execução de estudos adicionais da qualidade física dos solos focados em usos e cobertura do solo específicos, pois ao focar em usos do solo mais impactantes como a agricultura, os resultados obtidos terão uma maior relevância/aplicabilidade na gestão dos recursos ambientais da bacia.

#### 4.2.7. Referências bibliográficas

ALVES, Kaio Cesar Cardoso de Lima Fonseca. Caracterização do regime pluvial e de conflitos de uso do solo em APP's da bacia hidrográfica do rio Formoso, TO. 2014. 84f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais e Ambientais) – Universidade Federal do Tocantins, Palmas. 2014.

ALVES, Kaio Cesar Cardoso de Lima Fonseca et al. Avaliação temporal dos conflitos de uso do solo na bacia hidrográfica do rio Formoso, Tocantins. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 35, n. 83, p. 271-283, set. 2015. Disponível em: <<https://pfb.cnpf.embrapa.br/pfb/index.php/pfb/article/view/820>>. Acesso em: 05 abr. 2019.

ANDRADE, Rui da S.; STONE, Luís F.. Índice S como indicador da qualidade física de solos do cerrado brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, n. 4, p. 382-388, ago. 2009. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S141543662009000400003&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S141543662009000400003&lng=en&nrm=iso)>. Acesso em 01 apr. 2019.

ARYA, L. M.; PARIS, J. F. A. physicoempirical model to predict soil moisture characteristics from particle-size distribution and bulk density data. **Journal Soil Science Society of America**, Madison, v. 45, p. 1023-1030, 1981. Disponível em: <<https://dl.sciencesocieties.org/publications/sssaj/abstracts/45/6/SS0450061023?access=0&view=pdf>>. Acesso em 12 ago. 2019.

BRENNER, V. C.; GUASSELLI, L. A. Índice de diferença normalizada da água (NDWI) para identificação de meandros ativos no leito do canal do rio Gravataí/RS–Brasil. **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, v. 17, p. 3693-3699, 2015.

BISPO, MARCILÉIA OLIVEIRA. O cerrado tocantinense: agronegócio e o Prodoeste. **Produção acadêmica**, Porto Nacional, v. 1, n. 1, p. 178, jun. 2015. Disponível em <<https://sistemas.uft.edu.br/periodicos/index.php/producaoacademica/article/view/1937>>. Acesso em 1 mar. 2019.

COMBER, Alexis J. et al. Mapping coastal land use changes 1965-2014: methods for handling historical thematic data. **Transactions of the Institute of British Geographers**, [s. l.], v. 41, p. 442–459, 2016. Disponível em: <<https://rgs-ibg.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/tran.12128>>. Acesso em: 5 abr. 2019.

COMBER, A. J.; WADSWORTH, R. A.; FISHER, P. F. Using semantics to clarify the conceptual confusion between *land cover* and *land use* : the example of ‘forest’. **Journal of Land Use Science**, v. 3, n. 2–3, p. 185–198, 2008. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/17474230802434187>>. Acesso em: 22 fev. 2019.

CRISTINE DE BRITTO, Monique; DE CASTRO, Cássia; FERREIRA, Martins. PAISAGEM E AS DIFERENTES ABORDAGENS GEOGRÁFICAS. **Revista de Geografia – PPGeo – UFJF**, [s. l.], v. 2, n. 1, p. 1–10, 2011. Disponível em: <[http://geoplan.net.br/material\\_didatico/Britto\\_Ferreira\\_Paisagem\\_e\\_diferentes\\_abordagens\\_2011.pdf](http://geoplan.net.br/material_didatico/Britto_Ferreira_Paisagem_e_diferentes_abordagens_2011.pdf)>. Acesso em: 5 abr. 2019.

DEXTER, A.R. Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, v. 120, n° 3–4, p. 201-214. Jun. 2004. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2003.09.004>>. Acesso em 03 de mar. 2019.

DUTRA, V. C. ; ADORNO, L. F. M. ; SENNA, M. L. G. S. . Analysis of the Key Indicators of Sustainable Tourism: A Case Study in Lagoa da Confusão, Brazil. **International Journal of Social, Behavioral, Educational, Economic, Business and Industrial Engineering**, v. 9, p. 2941-2950, 2015. Disponível em <<https://waset.org/publications/10002784/analysis-of-the-key-indicators-of-sustainable-tourism-a-case-study-in-lagoa-da-confus%C3%A3o-brazil>>. Acesso em 1 mar. 2019.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. rev. e ampl. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisas de solos, 2018. Disponível em: <<http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1094003>>. Acesso em 28 mar 2019.

FILHO, Luiz Lacerda Magalhães et al. AVALIAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS MORFOMÉTRICAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO FORMOSO - TO. **Revista de Ciências Ambientais**, Canoas, v. 7, n. 1, p. 37–48, 2013. Disponível em: <<https://revistas.unilasalle.edu.br/index.php/Rbca/article/view/578>>. Acesso em: 7 abr. 2019.

FISHER, Peter; WADSWORTH, Richard. Land use and Land cover: Contradiction or Complement. **Re-presenting GIS**, 2005. Disponível em: <[https://www.academia.edu/14493546/Land\\_use\\_and\\_Land\\_cover\\_Contradiction\\_or\\_Complement?auto=download](https://www.academia.edu/14493546/Land_use_and_Land_cover_Contradiction_or_Complement?auto=download)>. Acesso em: 22 fev. 2019.

FLEISCHMANN, Ayan Santos et al. Avaliação da seca de 2016 do Rio Javaés (bacia do Rio Araguaia) com uso de dados de múltiplos satélites. In: ANAIS DO SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2017,, **Anais eletrônicos...** Campinas, GALOÁ, 2018. Disponível em: <<https://proceedings.science/sbsr/papers/avaliacao-da-seca-de-2016-do-rio-javaes--bacia-do-rio-araguaia--com-uso-de-dados-de-multiplos-satelites?lang=pt-br>> Acesso em: 11 abr. 2019.

GORAYEB, Paulo. Sérgio de Sousa. **Geologia do Estado do Tocantins: Aspectos Gerais e Conhecimento Atual**. In: MORAIS, Fernando de. (organizador). **Contribuições a Geografia Física do Estado do Tocantins**. Goiânia: Kelps, 2011.

GORAYEB, P.S.S. **Evolução geológica da região Aragacema – Pequizeiro, Goiás-Brasil**. 1981. 111f. Dissertação ( Mestrado em Ciências) – Universidade Federal do Pará, Belém, 1981. Disponível em: <[http://cmig.ufpa.br/Disserta%C3%A7%C3%B5es/disserta%C3%A7oes01/paulo\\_s](http://cmig.ufpa.br/Disserta%C3%A7%C3%B5es/disserta%C3%A7oes01/paulo_s)>

ergio\_de\_sousa\_goraye.pdf>. Acesso em 14 jul 2017.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Lagoa da Confusão – Panorama**. 2010a. Disponível em: < <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/to/lagoa-da-confusao/panorama> >. Acesso em: 1 fev 2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Cristalândia – Panorama**. 2010b. Disponível em: < <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/to/cristalandia/panorama> >. Acesso em: 1 fev 2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Manual Técnico de Uso da Terra**. Rio de Janeiro, 2013.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Manual técnico de uso da terra**. Manuais Técnicos em Geociências, n. 7. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2013.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Produção Agrícola Municipal**, Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br>>. Acesso em 07 de mai de 2019.

JANSEN, Louisa J. M.; GREGORIO, Antonio Di. Parametric land cover and land-use classifications as tools for environmental change detection. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, [s. l.], v. 91, n. 1–3, p. 89–100, 2002. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167880901002432>>. Acesso em: 7 abr. 2019.

MAIA, Celsemy Eleutério. Índice S para avaliação da qualidade física de solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 6, p. 1959–1965, 2011. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-06832011000600012&lng=pt&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832011000600012&lng=pt&tlng=pt)>. Acesso em: 10 mar. 2019.

MARTINS, A. K. **Ipucas da Planície do Araguaia, Estado do Tocantins: Ambiente físico de ocorrência, solos e uso da terra**. 2004. 134f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2004.

MARTINS, A. K. E. et al. Relações solo-geoambiente em áreas de ipucas na planície do médio Araguaia, Estado do Tocantins. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 30, n. 2, p. 297-310, 2006.

MARTINS, I. C. M. Avaliação qualitativa de impactos ambientais decorrentes de agricultura irrigada em regiões de Ipucas no Estado do Tocantins. 2005. 650 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

MENEZES, João Paulo Cunha de. Influência do uso e ocupação da terra na qualidade da água subterrânea e sua adequação para consumo humano e uso na agricultura. 2012. 83f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória. 2012.

MORAIS, Paula Benevides De; JÚNIOR, Sebastião Nolêto; MARTINS, Iracy Coelho de Menezes. Cadernos de ciência & tecnologia. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, [s. l.], v. 34, n. 1, p. 83–111, 2017. Disponível em: <<http://seer.sct.embrapa.br/index.php/cct/article/view/26297/13927>>. Acesso em: 26 fev. 2019.

MINELLA, João Paolo Gomes et al. **Dinâmica da erosão na escala de bacia hidrográfica: Uma experiência de pesquisa no Estado do Rio Grande do Sul. In: TIECHER, Tales (organizador)**. Manejo e conservação do solo e da água em pequenas propriedades rurais no Sul do Brasil: contextualizando as atividades agropecuárias e os problemas erosivos. Frederico Westphalen: URI. 2015. 152 p. Disponível em:< [https://www.researchgate.net/publication/287778646\\_Manejo\\_e\\_conservacao\\_do\\_solo\\_e\\_da\\_agua\\_em\\_pequenas\\_propriedades\\_rurais\\_no\\_sul\\_do\\_Brasil\\_contextualizando\\_as\\_atividades\\_agropecuarias\\_e\\_os\\_problemas\\_erosivos/link/5679383e08ae70e8e48163bc/download](https://www.researchgate.net/publication/287778646_Manejo_e_conservacao_do_solo_e_da_agua_em_pequenas_propriedades_rurais_no_sul_do_Brasil_contextualizando_as_atividades_agropecuarias_e_os_problemas_erosivos/link/5679383e08ae70e8e48163bc/download)>. Acesso em 8 ago. 2019.

NADERI-BOLDAJI, Mojtaba; KELLER, Thomas. Degree of soil compactness is highly correlated with the soil physical quality index S. **Soil and Tillage Research**, [s. l.], v. 159, p. 41–46, 2016. Disponível em:

<<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167198716300101>>. Acesso em: 3 abr. 2019

NOAA. **What is the difference between land cover and land use?**. 2018. Disponível em: <<https://oceanservice.noaa.gov/facts/lclu.html>>. Acesso em 28 mar 2019.

PEREIRA, Gilney C.; MORAIS, Fernando de. Geofísica aplicada ao estudo dos fluxos subsuperficiais no entorno da Lagoa da Confusão – TO. **Revista Geonorte**, Edição Especial, v. 2, n. 4, p.1475- 1483, 2012.

RANIERE, Juliana Maria et al. **Aplicação do Modelo de Arya e Paris para Estimativa da Qualidade Física do Solo**. São Carlos: Embrapa Instrumentação Agropecuária, 2009, 4 p. (Embrapa Instrumentação Agropecuária. Comunicado Técnico, 104).

OLIVEIRA, Paula Regina de et al. Qualidade estrutural de um latossolo vermelho submetido à compactação (1). **Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v. 37, p. 604–612, 2013. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/75281/2-s2.084880746133.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 10 abr. 2019.

SANTOS, Alberto Baêta dos.; RABELO, Raimundo Ricardo. **Informações técnicas para a cultura do arroz irrigado no Estado do Tocantins**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2008. 136 p. (Documentos/ Embrapa Arroz e Feijão, 218). Disponível em: <[https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CNPAF/26762/1/doc\\_218.pdf](https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CNPAF/26762/1/doc_218.pdf)>. Acesso em: 8 ago 2017.

SEPLAN - SECRETARIA DE PLANEJAMENTO DO ESTADO DO TOCANTINS. **Atlas do Tocantins**: subsídios ao planejamento da gestão territorial. 5 ed. Palmas: Seplan, 2008.

SEPLAN - SECRETARIA DE PLANEJAMENTO E MEIO AMBIENTE, DIRETORIA DE ZONEAMENTO ECOLÓGICO ECONÔMICO. **Atlas do Tocantins**: subsídios ao planejamento da gestão territorial. Secretaria do Planejamento e da Modernização da Gestão Pública - SEPLAN. Superintendência de Pesquisa e Zoneamento Ecológico-Econômico. Diretoria de Zoneamento Ecológico Econômico - ZEE. Organizado e

atualizado por Paulo Augusto Barros de Sousa, Rodrigo Sabino Teixeira Borges e Ricardo Ribeiro Dias. 6. ed., Rev. Atu. Palmas, Seplan, 2012. 80 p.

SOUSA, Erlan Silva de. Caracterização hidroquímica e isotópica das águas superficiais e subterrâneas no entorno da Lagoa da Confusão, Tocantins, Brasil. 2018. 101f. Dissertação (Mestrado em Ciências do Ambiente) – Universidade Federal do Tocantins, Palmas. 2018.

SOUZA, Joabe Martins De; BONOMO, Diego Zancanella; PIRES, Fábio Ribeiro. ÍNDICE S EM SOLO SUBSOLADO DA REGIÃO DOS TABULEIROS COSTEIROS, ESPÍRITO SANTO. **MAGISTRA**, Cruz das Almas, v. 27, n. 1, p. 14–22, 2015. Disponível em: <<https://magistraonline.ufrb.edu.br/index.php/magistra/article/view/361>>. Acesso em: 31 mar. 2019.

SILVA, Bruno Montoani et al. Índices no diagnóstico da qualidade estrutural de latossolo muito argiloso sob manejo intensivo = S index in structural quality diagnostic of a very clayey oxisol under intense management. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 28, n. 3, p. 338–345, 2012. Disponível em: <<http://www.seer.ufu.br/index.php/biosciencejournal/article/view/13235>>. Acesso em: 2 abr. 2019.

TOCANTINS. Secretaria de Recursos Hídricos e Meio Ambiente. Plano de bacia hidrográfica do rio Formoso – PBH Rio Formoso, no Estado do Tocantins: relatório síntese. Palmas, TO: SRHMA, 2007. 70 p. Disponível em <<https://semarh.to.gov.br/diretorias/diretoria-de-planejamento-e-recursos-hidricos/planos-estaduais-de-bacias-hidrograficas/plano-da-bacia-hidrografica-do-rio-formoso/>>. Acesso em 15 mar. 2019.

TOPP, George Clark et al. Physical attributes of soil quality. **Developments in Soil Science**, [s. l.], v. 25, p. 21–58, 1997. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166248197800293>>. Acesso em: 15 ago. 2019.

TORMENA, Cássio Antonio et al. Quantification of the soil physical quality of a tropical oxisol using the S index. **Scientia Agricola**, Curitiba, v. 65, n. 1, p. 56–60, 2008. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0103-90162008000100008&lng=en&tlng=en](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-90162008000100008&lng=en&tlng=en)>. Acesso em: 31 mar. 2019.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A bacia do rio Urubu está localizada na região sudoeste do Estado do Tocantins. Tal região apresenta condições climáticas e edáficas que tem atraído as atividades agrícolas voltadas à pecuária de corte e ao plantio de lavouras.

O mapa de cobertura e uso do solo resultou na identificação das seguintes classes: formações savânicas (39,1%), formações florestais (18,7%), agricultura temporária (11,2%), agropecuária (30%), área urbanizada (0,5%) e às águas continentais (0,6%).

Os registros históricos apontam que o processo de antropização da bacia se tornou mais intenso na década de 1940, resultando na antropização de 41,2 % da área de estudo. Portanto, para garantir o uso sustentável dos recursos naturais locais, recomenda-se que os órgãos ambientais reguladores acompanhem a expansão das atividades agrícolas (pecuária e culturas temporárias/permanentes) e não agrícolas (mineração).

Quanto a caracterização do grau de vulnerabilidade das águas subterrâneas à contaminação por meio do índice VIX, o estudo evidenciou que a porção oeste da bacia se mostrou mais vulnerável em virtude da pouca profundidade em que se encontra o lençol freático da região. No entanto, as porções norte e leste se apresentaram menos suscetíveis à contaminação graças à maior profundidade do lençol freático.

Dessa forma, além de aumentar o grupo amostral, recomenda-se ainda a realização de estudos que utilizem o índice VIX em áreas cujos usos sejam mais impactantes ao ecossistema local, a exemplo das áreas usadas para o plantio irrigado e pecuária extensiva. A aplicação do índice VIX nessas áreas pode melhorar o modelo de uso do solo existente no sentido de incentivar práticas de manejo de solo que conservem a qualidade das águas subterrâneas.

O índice de diferença normalizada de água – NDWI tem sido empregado na caracterização do conteúdo de água no solo. Foi observado por meio dos valores de NDWI que na região do baixo curso do rio Urubu, porção oeste da bacia, o solo se

apresentou mais propenso ao acúmulo de água, o que pode ser justificado também pela pouca profundidade do lençol freático e pela topografia existente.

Contudo, houve limitações quanto ao uso do índice NDWI, pois este não foi eficaz na identificação de áreas úmidas cobertas por formações florestais (matas ciliares), posto que a resposta espectral da vegetação interferiu na reflectância dessas áreas.

Ademais, os segmentos urbanizados apresentaram valores de NDWI análogos aos ambientes mais úmidos em virtude da maior reflectância do asfalto e outras feições antrópicas como telhados e construções. Diante de tais limitações, recomenda-se que a interpretação do índice NDWI seja complementada por visitas de campo às áreas que apresentem valores de NDWI incoerentes com o uso e cobertura encontrados, permitindo uma maior precisão na identificação de áreas mais úmidas da bacia.

O presente estudo utilizou o índice S para caracterizar a qualidade física dos solos no intuito de identificar áreas degradadas dentro da área de pesquisa. Nesse sentido, os baixos valores de índice S obtidos apontaram que todas as 15 amostras de solo possuem qualidade física ruim e por isso se encontram degradadas.

É interessante frisar que até mesmo as regiões cujos usos e cobertura propiciam uma melhor qualidade física do solo apresentaram índice S baixos, o que pode indicar o quão naturalmente frágeis são os solos dessa região. Portanto, os resultados obtidos evidenciaram a necessidade de um sistema de manejo do solo que implemente práticas de conservação do solo.

A eficiência do índice S foi restrita ao tamanho do grupo amostral, pois, dadas as proporções da bacia, o número de amostras pode ainda ser aumentado em estudos futuros. Assim sendo, recomenda-se também:

- Investigar a relação entre a qualidade física do solo e as características intrínsecas dos solos da região.
- Implementar estudos que correlacionem à resistência dos solos à penetração de raízes com os valores de índice S encontrados para os diferentes usos e cobertura encontrados na área de estudo.
- Analisar a relação silte/argila com intuito de indicar o grau de intemperismo dos solos que foram previamente avaliados pelo índice S.

De modo geral, considerando as limitações do tamanho do grupo amostral de áreas na aplicação do índice VIX, os sistemas de armazenamento de água subterrânea da região oeste da bacia do rio Urubu se apresentaram mais vulneráveis à contaminação.

Além disso, a análise do NDWI corroborou os resultados do índice VIX, pois mostrou que a porção mais ocidental da bacia tem maior conteúdo de água no solo, e dessa forma, apresenta maior interação entre as atividades antrópicas e as águas subterrâneas.

É importante adicionar que o índice S mostrou que o cenário de degradação dos solos da bacia evidencia que ela necessita de uma gestão eficiente dos recursos naturais para garantir a qualidade ambiental não somente dos solos, mas também das águas superficiais e subterrâneas, as quais condicionam o atual modelo de uso e cobertura da terra que se baseia em atividades que fomentam o agronegócio.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLER, L., BENNET, T., LEHR, J.H., PETTY, R.J., HACKETT, G. 1987. **DRASTIC: A Standardized System for Evaluating Groundwater Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings**. US Environmental Protection Agency. Ada, Oklahoma. EPA/600/2-87-036. Disponível em: <<https://nepis.epa.gov/v/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=20007K U4.TXT>>. Acesso em 17 de jun 2017.

ANA. O comitê de bacias hidrográficas: o que é e o que faz?. Brasília: SAG, 2011. Disponível em:<<http://arquivos.ana.gov.br/institucional/sge/CEDOC/Catalogo/2012/CadernosDeCapacitacao1.pdf>>. Acesso em 22 de jun 2017.

ANA. Atlas Brasil: abastecimento urbano de água por estado. 2010. vol. 2. Brasília. Agência Nacional de Águas, Engecorps/Cobrape.

ANTONAKOS, A. K.; LAMBRAKIS, N. J. Development and testing of three hybrid methods for the assessment of aquifer vulnerability to nitrates, based on the drastic model, an example from NE Korinthia, Greece. **Journal of Hydrology**, v. 333, n. 2–4, p. 288–304, fev. 2007.

ARRUDA, T. J.; VALDEVINO, F, A. O Polo Agropecuário de Formoso do Araguaia/TO e sua relação espacial com os estados vizinhos. **Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional**. v.10, n.4, 2014. Disponível em:< <http://www.rbgdr.net/revista/index.php/rbgdr/article/view/1542/420>>. Acesso em 22 de jun 2017.

BATISTA, Carla Sales Polon et al. Aplicação do método GOD para avaliação de vulnerabilidade de aquífero livre em bacia hidrográfica. In: Anais do XIX Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. 2016, São Paulo. **Anais de Eventos**. São Paulo, 2016. Disponível em <<https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/28686/18596>>. Acesso em 14 fev. 2019.

BISPO, M. O.; OLIVEIRA, F.S. Difusão do agronegócio e as dinâmicas territoriais no cerrado, Vale do Javaés-Tocantins. **Entre-Lugar**, v. 6, n. 12, p. 28-40, 2017.

BRAGA, B.N. et al. **Introdução a Engenharia Ambiental**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Plano de Manejo do Parque Nacional do Araguaia**. MMA, 2001. 103 p.

BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual Técnico de uso da terra**. Rio de Janeiro: IBGE. 2003, 58 p.

BRENNER, V. C.; GUASSELLI, L. A. Índice de diferença normalizada da água (NDWI) para identificação de meandros ativos no leito do canal do rio Gravataí/RS–Brasil. **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, v. 17, p. 3693-3699, 2015.

CAMPOS, J. E.G. Hidrogeologia do Distrito Federal: bases para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 34, n. 1, p. 41-48, 2016.

CALIJURI, M.C.; CUNHA, D.G.F. **Engenharia Ambiental: conceitos, tecnologia e gestão**. Rio de Janeiro: Elsevier, 789p. 2013.

CONEJO, J. G. L.; COSTA, M. P. da.; e ZOBY, J. L. G. Panorama do Enquadramento dos Corpos d'água do Brasil, e, Panorama da Qualidade das águas subterrâneas no Brasil. **Caderno de Recursos Hídricos**, 5. 124 p. Brasília: ANA, 2007.

DEXTER, A.R. Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, v. 120, n° 3–4, p. 201-214. Jun. 2004. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2003.09.004>.> Acesso em 22 de jun. 2017.

DNPM – DEPARTAMENTO NACIONAL DE PESQUISA MINERAL. SIGMINE. Sistema de Informação Geográfica da Mineração. 2017. Disponível em: <<http://sigmine.dnpm.gov.br/webmap/>>. Acesso em 26 jul 2017.

DUARTE, M.L. et al. Vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas no município de Humaitá, Amazonas, Brasil. **An Interdisciplinary Journal of Applied Science Rev. Ambient. Água Taubaté – Apr**, v. 11, n. 2, 2016.

DUARTE, S.C. **Avaliação do programa de desenvolvimento do oeste do Tocantins - PRODOESTE**. 2016. 111 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Exatas e da Terra) - Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, 2016.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. rev. atual. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos,

1997. Disponível em <[https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Manual+de+Metodos\\_000fvhotqk02wx5ok0q43a0ram31wtr.pdf](https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Manual+de+Metodos_000fvhotqk02wx5ok0q43a0ram31wtr.pdf)>. Acesso em 22 de jun. 2017.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. rev. e ampl. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisas de solos, 2018. Disponível em: <<http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1094003>>. Acesso em 28 mar 2019.

FERREIRA, J.P.C. Vulnerabilidade à poluição de águas subterrâneas: fundamentos e conceitos para uma melhor gestão e proteção dos aquíferos de Portugal. In: **IV Congresso da Água. Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos**. Lisboa. 1998.

Disponível em: <[https://www.researchgate.net/profile/Joao-Paulo\\_Lobo-Ferreira/publication/\\_VULNERABILIDADE\\_A\\_POLUICAO\\_DE\\_AGUAS\\_SUBTERRANEAS\\_FUNDAMENTOS\\_E\\_CONCEITOS\\_PARA\\_UMA\\_MELHOR\\_GESTAO\\_E\\_PROTECCAO\\_DOS\\_AQUIFEROS\\_DE\\_PORTUGAL/links/548711aa0cf289302e2ebdbf.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Joao-Paulo_Lobo-Ferreira/publication/_VULNERABILIDADE_A_POLUICAO_DE_AGUAS_SUBTERRANEAS_FUNDAMENTOS_E_CONCEITOS_PARA_UMA_MELHOR_GESTAO_E_PROTECCAO_DOS_AQUIFEROS_DE_PORTUGAL/links/548711aa0cf289302e2ebdbf.pdf)>. Acesso em 22 de jun. 2017.

FOSTER, Stephen. et al. **Groundwater Quality Protection a guide for water utilities, municipal authorities, and environment agencies**, 2012. Disponível em: <<http://documents.worldbank.org/curated/en/913221468028147970/Groundwater-quality-protection-a-guide-for-water-utilities-municipal-authorities-and-environment-agencies>> Acesso em 21 de jun 2017.

GUERRA, A. M. **Processos de carstificação e hidrogeologia do Grupo Bambuí na região de Irecê-Bahia**. 1986. Tese (Doutorado em Geologia Geral e de Aplicação) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1986. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44131/tde-16072015-102536/pt-br.php>> Acesso em 21 de jun 2017.

GORAYEB, Paulo. Sérgio de Sousa. **Geologia do Estado do Tocantins: Aspectos Gerais e Conhecimento Atual**. In: MORAIS, Fernando de. (organizador). Contribuições a Geografia Física do Estado do Tocantins. Goiânia: Kelps, 2011.

GORAYEB, P.S.S. **Evolução geológica da região Aragacema – Pequizeiro, Goiás-Brasil**. 1981. 111f. Dissertação ( Mestrado em Ciências) – Universidade Federal do Pará, Belém, 1981. Disponível em: <[http://cmig.ufpa.br/Disserta%C3%A7%C3%B5es/disserta%C3%A7oes01/paulo\\_sergio\\_de\\_sousa\\_goraye.pdf](http://cmig.ufpa.br/Disserta%C3%A7%C3%B5es/disserta%C3%A7oes01/paulo_sergio_de_sousa_goraye.pdf)>. Acesso em 14 jul 2017.

HIRATA, R.; ZOBY, J. L.G; OLIVEIRA, F.R. **Água subterrânea: Reserva estratégica ou**

**emergencial**. 2010. In: BICUDO et al. (org.) . Águas do Brasil. Análise estratégica. São Paulo: 2010. pág.141-57. Disponível em: < <https://www.abc.org.br/IMG/pdf/doc-6820.pdf>>. Acesso em 14 jul 2017.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e estatística. **Lagoa da Confusão – História e fotos**. 2019a. Disponível em: < <https://cidades.ibge.gov.br/v4/brasil/to/lagoa-da-confusao/panorama>>. Acesso em: 25 mar 2019.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e estatística. **Cristalândia – Panorama**. 2019b. Disponível em: < <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/to/cristalandia/panorama> >. Acesso em: 1 fev 2019.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e estatística. **Pium – História e fotos**. 2019c. Disponível em: < <https://cidades.ibge.gov.br/v4/brasil/to/pium/historico>>. Acesso em: 25 mar 2019.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e estatística. **Cristalândia – História e fotos**. 2019b. Disponível em: < <https://cidades.ibge.gov.br/v4/brasil/to/cristalandia/historico>>. Acesso em: 25 mar 2019.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e estatística. **Crixás do Tocantins – História e fotos**. 2019d. Disponível em: < <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/to/crixas-do-tocantins/historico>>. Acesso em: 25 mar 2019.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e estatística. **Santa Rita – História e fotos**. 2019e. Disponível em: < <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/to/santa-rita-do-tocantins/historico>>. Acesso em: 25 mar 2019.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e estatística. **Nova Rosalândia – História e fotos**. 2019f. Disponível em: < <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/to/nova-rosalandia/historico>>. Acesso em: 25 mar 2019.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e estatística. **Fátima – História e fotos**. 2019g. Disponível em: < <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/to/fatima/historico>>. Acesso em: 25 mar 2019.

JACOMINE, P. K. T. A nova classificação brasileira de solos. **Anais da Academia Pernambucana de Ciência Agronômica**. v. 5, p. 161-179, out. 2013. Disponível em:

<<http://www.journals.ufrpe.br/index.php/apca/article/view/178/161>>. Acesso em: 31 jul. 2017.

LEAL, O. **Sistema de Informações para Gestão Territorial da Região Metropolitana do Recife - Projeto SINGRE; Vulnerabilidade das Águas Subterrâneas da Região Metropolitana do Recife**. Recife: CPRM/FIDEM, 1994. Disponível em: <[http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/bitstream/handle/doc/8734/rel\\_vulnerab\\_aguas\\_sub\\_recife.pdf?sequence=1](http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/bitstream/handle/doc/8734/rel_vulnerab_aguas_sub_recife.pdf?sequence=1)> Acesso em 27 abr 2018

MAMEDE, L. et al. 22-Tocantins. Geomorfologia. In: Ministério das Minas e Energia/Departamento Nacional de Produção Mineral – Projeto RADAMBRASIL, 1981. Rio de Janeiro: Folha SC. 22, p.197-235. 1981.

MARTINS, A. K. **Ipucas da Planície do Araguaia, Estado do Tocantins: Ambiente físico de ocorrência, solos e uso da terra**. 2004. 134f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2004.

MARTINS, A. K. E.; SCHAEFER, C. E. G. R.; SILVA, E.; SOARES, V. P.; CÔRREA, G. R.; MENDONÇA, B. A. F. Relações solo-geoambiente em áreas de ipucas na planície do médio Araguaia, Estado do Tocantins. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 30, n. 2, p. 297-310, 2006.

MARTINS, I. C. M; SOARES, V. P., SILVA, E. BRITES, R. S. Diagnóstico ambiental no contexto da paisagem de fragmentos florestais naturais "ipucas" no município de Lagoa da Confusão, Tocantins. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 26, n. 3, Mai. 2002

MCFEETERS, S. K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. **International Journal of Remote Sensing**, v. 17, n. 7, p. 1425-1432, 1996.

MESTRINHO, S.P.; LUZ, A. G.; PORCIÚNCULA, C. L. Análise da vulnerabilidade intrínseca das águas subterrâneas na bacia do rio Itapicuru, Bahia In: XIV CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. Natal. Disponível em: <<https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/issue/view/1185/showToc>>. Acesso em 22 de jun 2017.

MINGOTI, R.; SPADOTTO, C. A.; MORAES, D. A. C. Suscetibilidade à contaminação da água subterrânea em função de propriedades dos solos no Cerrado brasileiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 51, n. 9, p. 1252-1260, setembro, 2016.

Disponível em <[http://www.cielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100204X2016000901252&lng=en&nrm=iso](http://www.cielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100204X2016000901252&lng=en&nrm=iso)>. Acesso em 14 fev. 2019.

MORETON, L. C. Programa Levantamentos geológicos Básicos do Brasil. **Iporá. (Folha SE. 22-VB). Escala 1. 250.000**, 2001.

MMA/IBAMA – Ministério do Meio Ambiente/Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Plano de Manejo do Parque Nacional do Araguaia. Brasília, 2000.

NANINI, A. S.; TEDESCO, M. A.; FREITAS, M. A.; BINOTTO, R. B. Vulnerabilidade natural e risco de contaminação do aquífero Serra Geral pela Suinocultura na Região das Missões - RS. In: XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2005, João Pessoa. **Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 2005. Disponível em <<https://periodicos.ufsm.br/cienciaenatura/article/download/9598/5740>>. Acesso em 14 fev 2019.

NEGREIRO NETO, J. **Caracterização para aproveitamento agrícola de resíduo de calcário**. 2015. 67f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Universidade Federal do Tocantins, Gurupi, 2015.

NOBRE, Antônio Donato et al. Height above the nearest drainage – hydrologically relevant new terrain model. volume 404, n. 1 e 2. p. 13-29. 2011. **Journal of Hydrology**. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169411002599>>. Acesso em 14 fev 2019.

OLIVEIRA, R. G. **Sistema de Informações para Gestão Territorial da Região Metropolitana do Recife - Projeto SINGRE; Levantamento Gravimétrico da Área Sedimentar da Região Metropolitana do Recife**. Recife: CPRM/FIDEM, 1994.

OLIVEIRA, K.B.M. **Estudo dos fluxos hídricos do entorno da Lagoa da Confusão – TO**. 2014, 196f. Dissertação (Mestrado em Ciências do Ambiente) - Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2014.

PEREIRA, G.C. **Contribuições à Geomorfologia da Lagoa da Confusão – TO**. 2016, 126f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal do Tocantins, Porto Nacional, 2016.

PEREIRA, G. C.; MORAIS, F. Geofísica aplicada ao estudo dos fluxos subsuperficiais no entorno da Lagoa da Confusão – TO. **Revista Geonorte**, Edição Especial, v. 2, n. 4, p.1475-1483, 2012.

- REICHARDT, Klaus; TIMM, Luís Carlos. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. Barueri: Manole, 2004. 478 p.
- RIBEIRO, J. E.; WALTER, B. M. T. Fitofisionomias do bioma Cerrado In: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P. (ed.). **Cerrado: ambiente e flora**. Brasília, Embrapa Cerrados, 1998, p.87-166.
- RIBEIRO, Maria Lúcia et al. Contaminação de águas subterrâneas por pesticidas: Avaliação preliminar. **Química Nova**, [s. l.], v. 30, n. 3, p. 688–694, 2007.
- RODRIGUES, W. B.; MORAIS, F.; PASCHOAL, L. G. Índice de diferença normalizada da água (NDWI) calculado para estações chuvosas e secas na bacia do Córrego Barreiro, Lagoa da Confusão – TO. **Os Desafios da Geografia Física na Fronteira do Conhecimento**, Campinas, v. 1, p. 254-263, jul. 2017.
- SABADINI, S. C; RUCHKYS, Ú.A.; VELÁSQUEZ, L.N. M.; TAYER, T. C. Potencial de vulnerabilidade natural de aquíferos à contaminação no quadrilátero ferrífero, Minas Gerais e sua relação com a atividade minerária de ouro / Natural vulnerability of potential contamination to aquifers in the Iron Quadrangle (...). **Caderno de Geografia**, Belo Horizonte, v. 27, n. 49, p. 340-352, mai. 2017. Disponível em: <<http://periodicos.pucminas.br/index.php/geografia/article/view/p.2318-2962.2017v27n49p340>>. Acesso em: 01 Mai. 2018.
- SANTOS, R. A.; CRUZ, M. J. M.; NASCIMENTO, S. A. M. **Avaliação da vulnerabilidade natural de aquíferos cársticos: subsídios para uma gestão dos recursos hídricos subterrâneos**. Cadernos de Geociências, n. 7, p. 54-62, 2010.
- SANTOS, D. **A rede de drenagem e seu significado geomorfológico: anomalias de drenagens e tectônica recente na bacia do rio Formoso, Tocantins**. 2016, 158 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2016
- SANTOS, Humberto Gonçalves et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de solos**. 10. ed. Brasília: Embrapa, 2018. 590 p.
- SANTOS, D.; MORAIS, F.. A assimetria de bacias hidrográficas e influências litoestruturais na geomorfologia do rio Formoso, TO. **Caminhos de Geografia**, [S.l.], v. 18, n. 61, p.180-199, mar. 2017. ISSN 1678-6343. Disponível em: <<http://www.seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/article/view/35915/20061>>. Acesso em: 31 jul. 2017.

SEPLAN - SECRETARIA DE PLANEJAMENTO DO ESTADO DO TOCANTINS. **Atlas do Tocantins**: subsídios ao planejamento da gestão territorial. 5 ed. Palmas: Seplan, 2008.

SEPLAN - SECRETARIA DE PLANEJAMENTO E MEIO AMBIENTE, DIRETORIA DE ZONEAMENTO ECOLÓGICO ECONÔMICO. **ATLAS DO TOCANTINS**: subsídios ao planejamento da gestão territorial. Secretaria do Planejamento e da Modernização da Gestão Pública - SEPLAN. Superintendência de Pesquisa e Zoneamento Ecológico-Econômico. Diretoria de Zoneamento Ecológico Econômico - ZEE. Organizado e atualizado por Paulo Augusto Barros de Sousa, Rodrigo Sabino Teixeira Borges e Ricardo Ribeiro Dias. 6. ed., Rev. Atu. Palmas, Seplan, 2012. 80 p.

SECRETARIA DO PLANEJAMENTO E DA MODERNIZAÇÃO DA GESTÃO PÚBLICA. **Mapeamento das Regiões Fitoecológicas e Inventário Florestal do Estado do Tocantins**. Palmas: SEPLAN, 2013. 338p.

SPADOTO, C.A. **Índice de vulnerabilidade de água subterrânea à contaminação – VIX**. Campinas: Embrapa Gestão Territorial. (Embrapa Gestão Territorial. Comunicado técnico, 2).

SCHWARTZ, F. W.; ZHANG, H. **Groundwater**. New York: John Wiley & Sons Inc. 2003. 577p.

SILVA, Geraldo César et al. Índice S no diagnóstico da qualidade estrutural de Latossolo muito argiloso sob manejo intensivo. **Bioscience Journal**, Campinas, v. 28, n. 3, p. 338-345, 2012.

SILVA, J. L. S.; DESCOVI FILHO, L. L. V; LORENSI, R. P.; CRUZ, J.C.; ELTZ, F. L.F. Vulnerabilidade do aquífero Serra Geral à contaminação no município de Erechim - Rio Grande do Sul - Brasil. **Ciência e Natura**. v. 35. n. 1, p. 10-23, 2013. Disponível em < <https://periodicos.ufsm.br/cienciaenatura/article/download/9598/5740>>. Acesso em 14 fev 2019.

TOCANTINS, SECRETARIA DE RECURSOS HÍDRICOS E MEIO AMBIENTE DO ESTADO DO TOCANTINS (SRHMA). **Plano de Bacia Hidrográfica do Rio Formoso – PBH Rio Formoso, Relatório Síntese**. Estado Do Tocantins, Palmas, 2007.

UNESCO – WWAP. The United Nations World Water Development Report 4: Managing Water under Uncertainty and Risk. Paris. 2012. Disponível em: <http://unesdoc.unesco.org/images/0021/002156/215644e.pdf>>. Acesso em 22 de jun 2017.

van GENUCHTEN, M. Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.44, p.892-898, 1980

VALENTE, C. R. **Controles físicos na evolução das unidades geoambientais da bacia do rio Araguaia, Brasil Central**. 2007. 156p. (Tese Doutorado em Ciências Ambientais) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia.

VIANA, J. H. M.; MACHADO, D. A.; LOUREIRO, C. de O. **Vulnerabilidade natural das águas subterrâneas no entorno da Embrapa Milho e Sorgo**. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA - Lages. *Conservação do solo e da água no Brasil: preceitos e ações no ensino, na pesquisa e na extensão: Anais...* Rio de Janeiro: SBCS, 2012.

VIEIRA, P.A. **Caracterização das Unidades Geomorfológicas Geoambientais da Planície do Bananal**. 2002. 148f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Instituto de Estudos Sócio-Ambientais, UFG-Universidade Federal do Tocantins, Goiânia, 2003. Disponível em: <[http://www.labogef.iesa.ufg.br/labogef/arquivos/downloads/Caracterizacao\\_PedroVieira\\_2002\\_24194\\_68388.pdf](http://www.labogef.iesa.ufg.br/labogef/arquivos/downloads/Caracterizacao_PedroVieira_2002_24194_68388.pdf)>. Acesso em 14 de jul 2017

WALKIN, V.R. **Valoração Ambiental: Uso do método dose-resposta na mensuração do impacto na lucratividade da produção de arroz irrigado na microrregião de Formoso do Araguaia-TO**. 2010, 89 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Regional e Agronegócio). Universidade Federal do Tocantins. 2010.

WALPOLE, R. E. et al. **Probabilidade e estatística para engenharia e ciências**. 8. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2009.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **Guide to the Global Observing System** – WMO n° 488. Gêneva, 2012. p. 172. Disponível em <[https://www.oceanbestpractices.net/bitstream/handle/11329/117/wmo\\_4882012\\_en.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://www.oceanbestpractices.net/bitstream/handle/11329/117/wmo_4882012_en.pdf?sequence=1&isAllowed=y)>. Acesso em 14 fev 2019.

ZOBY, J. L. G. Panorama da qualidade das águas subterrâneas no Brasil. Revista Águas Subterrâneas, Natal, Supl. XV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 2008.

ZAPOROZEC, Alexander. **Concept of groundwater vulnerability**. In: VRBA, Jaroslav; ZAPOROZEC, Alexander (organizadores). Guidebook on mapping groundwater vulnerability. Hannover: Heise, 1994. Disponível em:< <https://iah.org/education/professionals/out-of-print-books> >. Acesso em 18 de fev. 2019.