

ANA PAULA LEITE

**DISCRIMINAÇÃO DO USO DA TERRA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO
ARAQUÁ UTILIZANDO ÍNDICES RADIOMÉTRICOS**

Botucatu

2019

ANA PAULA LEITE

**DISCRIMINAÇÃO DO USO DA TERRA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO
ARAQUÁ UTILIZANDO ÍNDICES RADIOMÉTRICOS**

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agrônômicas da Unesp, Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Agronomia (Energia na Agricultura).

Orientador: Prof. Dr. Luís Gustavo Frediani Lessa

Botucatu

2019

L533d

Leite, Ana Paula

Discriminação do uso da terra na bacia hidrográfica do rio Araquá utilizando índices radiométricos / Ana Paula Leite. -- Botucatu, 2019

91 p. : il., tabs.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu

Orientador: Luís Gustavo Frediani Lessa

1. Sensoriamento remoto. 2. Composições de índices físicos.
3. Discriminação da paisagem. 4. Conflito de uso. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

Título: “DISCRIMINAÇÃO DO USO DA TERRA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO
ARAQUÁ UTILIZANDO ÍNDICES RADIOMÉTRICOS”

AUTORA: ANA PAULA LEITE

ORIENTADOR: LUIS GUSTAVO FREDIANI LESSA

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em AGRONOMIA
(ENERGIA NA AGRICULTURA), pela Comissão Examinadora:



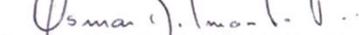
Prof. Dr. LUIS GUSTAVO FREDIANI LESSA

Solos e Recursos Ambientais / Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu



Dr.ª BRUNA SOARES XAVIER DE BARROS

Botucatu - SP /



Prof. Dr. OSMAR DELMANTO JUNIOR

Agronegócio / Faculdade de Tecnologia de Botucatu

Botucatu, 04 de outubro de 2019.

Ao meu marido Bruno, o maior incentivador das realizações dos meus sonhos,

Aos meus pais Suely e Pedro, os pilares da minha formação como ser humano e meus maiores e melhores orientadores na vida,

À memória da minha avó Tereza, maior exemplo de um ser humano íntegro e ético,

Dedico.

AGRADECIMENTOS

À Deus, pelas oportunidades da vida e pela luz nos momentos mais difíceis.

À minha família, pelo carinho e apoio incondicional.

À Faculdade de Ciências Agrônômicas (FCA), pela oportunidade de participar do Curso de Pós-Graduação.

Ao programa de Pós-Graduação em Agronomia (Energia na Agricultura), pela oportunidade oferecida aos pesquisadores com formações diversificadas.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão de bolsa de estudo, fundamental para o desenvolvimento do mestrado.

À Prof.^a Dr.^a Célia Regina Lopes Zimback, pelo acolhimento e oportunidade oferecidos na iniciação científica.

Ao Prof. Dr. Luís Gustavo Frediani Lessa, pela orientação no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Marco Biagioni, pelo apoio e acolhimento nos momentos cruciais desta dissertação.

Aos membros do Grupo de Estudos e Pesquisas Agrárias Georreferenciadas (GEPAG) pelos aprendizados compartilhados.

Aos funcionários do Departamento de Solos e Recursos Naturais, da Seção de Pós-Graduação e da Biblioteca Paulo Carvalho de Mattos da FCA, pelas colaborações durante os anos de convivência.

O meu sincero agradecimento.

RESUMO

O presente estudo baseia-se na aplicação das geotecnologias para discriminar o uso da terra, na bacia hidrográfica do rio Araquá, localizada nos municípios de Botucatu e São Manuel (SP). Teve como objetivo verificar a eficiência da metodologia de associação dos índices radiométricos na identificação de uso da terra, com ênfase nas Áreas de Preservação Permanente, estabelecidas conforme o Código Florestal Brasileiro (Lei nº 12.727/2012). Foram, a partir de imagens do satélite Sentinel-2, produzidas as seguintes associações de índices radiométricos: NDBI-GNDVI-NDWI, NDBI-NDI45-NDWI e NDBI-NDVI-NDWI. Por meio da validação, obtida pela classificação supervisionada gerada em cada uma das três composições, foram identificados usos inadequados. Notou-se o conflito entre a ocupação desordenada de monoculturas canavieiras e as Áreas de Preservação Permanente. A associação NDBI-NDVI-NDWI foi a mais satisfatória para avaliar e discriminar o uso e ocupação da terra na bacia hidrográfica, com coeficiente Kappa de 84%.

Palavras-chave: Sensoriamento remoto. Composições de índices físicos. Discriminação da paisagem. Conflito de uso.

ABSTRACT

This study is based on the application of geotechnologies to discriminate land use in the Araquá river basin, located in the municipalities of Botucatu and São Manuel (SP). The objective was to verify the efficiency of the radiometric indices association methodology in land use identification, with emphasis on the Permanent Preservation Areas, established according to the Brazilian Forest Code (Law No. 12.727 / 2012). From Sentinel-2 satellite images, the following radiometric index associations were produced: NDBI-GNDVI-NDWI, NDBI-NDI45-NDWI and NDBI-NDVI-NDWI. Through validation, obtained by the supervised classification generated in each of the three compositions, inappropriate uses were identified. The conflict between the disorderly occupation of sugarcane and the Permanent Preservation Areas was noted. The NDBI-NDVI-NDWI association was the most satisfactory to evaluate and discriminate land use and occupation in the watershed with a Kappa coefficient of 84%.

Keywords: Remote sensing. Compositions of physical indexes. Discrimination of the landscape. Use conflicts.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | | | |
|-----------|---|---|----|
| Figura 1 | – | Localização da bacia hidrográfica do rio Araquá..... | 45 |
| Figura 2 | – | Composição em cor verdadeira (bandas 4, 3 e 2)..... | 49 |
| Figura 3 | – | Classificação supervisionada na imagem em cor verdadeira..... | 55 |
| Figura 4 | – | Identificação da classe mata..... | 57 |
| Figura 5 | – | Simulação da Área de Preservação Permanente..... | 58 |
| Figura 6 | – | Identificação da classe mata em tela e simulação da APP..... | 59 |
| Figura 7 | – | Índice NDBI..... | 61 |
| Figura 8 | – | Índice NDWI..... | 62 |
| Figura 9 | – | Índice GNDVI..... | 63 |
| Figura 10 | – | Índice NDI45..... | 64 |
| Figura 11 | – | Índice NDVI..... | 65 |
| Figura 12 | – | Índice NDBI, GNDVI e NDWI associados aos canais RGB..... | 66 |
| Figura 13 | – | Classificação supervisionada na imagem NDBI-GNDVI-NDWI..... | 67 |
| Figura 14 | – | Índice NDBI, NDI45 e NDWI associados aos canais RGB..... | 69 |
| Figura 15 | – | Classificação supervisionada na imagem NDBI-NDI45-NDWI..... | 70 |
| Figura 16 | – | Índice NDBI, NDVI e NDWI associados aos canais RGB..... | 72 |
| Figura 17 | – | Classificação supervisionada na imagem NDBI-NDVI-NDWI..... | 73 |
| Figura 18 | – | Conflito de uso em APP na imagem NDBI-NDVI-NDWI..... | 80 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Qualidade da classificação..... | 44 |
| Tabela 2 – Classes de uso da terra na imagem em cor verdadeira..... | 56 |
| Tabela 3 – Conflito de uso em APP..... | 60 |
| Tabela 4 – Matriz de confusão gerada a partir da classificação supervisionada na imagem NDBI-GNDVI-NDWI..... | 68 |
| Tabela 5 – Matriz de confusão gerada a partir da classificação supervisionada na imagem NDBI-NDI45-NDWI..... | 71 |
| Tabela 6 – Matriz de confusão gerada a partir da classificação supervisionada na imagem NDBI-NDVI-NDWI..... | 74 |
| Tabela 7 – Coeficiente Kappa e desempenho das classificações..... | 75 |
| Tabela 8 – Área e porcentagem das classes de uso e da terra conforme imagens classificadas..... | 76 |
| Tabela 9 – Quantificação das classes de uso em APP..... | 78 |
| Tabela 10 – Conflito entre as classes de uso e a APP..... | 79 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|--|----|
| Quadro 1 – Síntese das leis e decretos ambientais instituídos no Brasil..... | 31 |
| Quadro 2 – Resolução espacial das bandas do Sentinel-2A..... | 37 |
| Quadro 3 – Equações dos índices radiométricos..... | 52 |
| Quadro 4 – Associações de índices e bandas aos canais RGB..... | 53 |

LISTA DE EQUAÇÕES

| | |
|------------------------------------|----|
| Equação 1 – NDBI..... | 38 |
| Equação 2 – NDWI..... | 39 |
| Equação 3 – GNDVI..... | 40 |
| Equação 4 – NDI45..... | 40 |
| Equação 5 – NDVI..... | 41 |
| Equação 6 – Coeficiente Kappa..... | 43 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|---------|---|
| ANA | Agência Nacional de Águas |
| APP | Áreas de Preservação Permanente |
| CAR | Cadastro Ambiental Rural |
| CEPAGRI | Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura |
| CF | Código Florestal |
| CR | Constituição da República |
| ESA | Agência Espacial Européia |
| GNDVI | Índice de Vegetação de Diferença Normalizada Verde |
| IBGE | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística |
| IGC | Instituto Geográfico e Cartográfico |
| MDE | Modelo Digital de Elevação |
| MGRS | Sistema de Referência de Grade Militar |
| MSI | Sensor Multispectral Instrument |
| NDBI | Índice de Área Construída por Diferença Normalizada |
| NDI45 | Índice de Vegetação da Diferença Normalizada B4 e B5 |
| NDVI | Índice de Vegetação da Diferença Normalizada |
| NDWI | Índice de Diferença Normalizada da Água |
| NIR | Infravermelho próximo. |
| RE | Vermelho próximo |
| REM | Radiação eletromagnética |
| RGB | Red-Green-Blue |
| SIG | Sistema de Informação Geográfica |
| SIGBH | Sistema Integrado de Gerenciamento de Bacias Hidrográficas |
| SISNAMA | Sistema Nacional do Meio Ambiente |
| SNAP | Sentinel Application Platform |
| SNUC | Sistema Nacional das Unidades de Conservação |
| SR | Sensoriamento Remoto |
| SWIR | Infravermelho médio |
| UTM | Universal Transversa de Mercator |

SUMÁRIO

| | | |
|----------------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 25 |
| 2 | REVISÃO DE LITERATURA..... | 27 |
| 2. 1 | Bacia Hidrográfica | 27 |
| 2. 2 | Legislação ambiental..... | 29 |
| 2. 3 | Geotecnologia e Sistema de Informação Geográfica | 34 |
| 2.3.1 | QGIS | 35 |
| 2.3.2 | Sensoriamento Remoto..... | 35 |
| 2.3.3 | Satélite Sentinel-2 | 36 |
| 2.3.4 | Índices radiométricos | 37 |
| <i>2.3.4.1</i> | <i>NDBI</i> | <i>38</i> |
| <i>2.3.4.2</i> | <i>NDWI</i> | <i>39</i> |
| <i>2.3.4.3</i> | <i>GNDVI.....</i> | <i>39</i> |
| <i>2.3.4.4</i> | <i>NDI45.....</i> | <i>40</i> |
| <i>2.3.4.5</i> | <i>NDVI</i> | <i>41</i> |
| <i>2.3.4.6</i> | <i>Associação dos Índices Radiométricos.....</i> | <i>41</i> |
| 2.3.5 | Classificação supervisionada..... | 42 |
| 2.3.6 | Acurácia..... | 43 |
| 3 | MATERIAL E MÉTODOS..... | 45 |
| 3. 1 | Caracterização da bacia hidrográfica..... | 45 |
| 3. 2 | Material | 47 |
| 3.2.1 | Programas computacionais | 47 |
| 3.2.2 | Banco de dados e base cartográfica..... | 47 |
| 3. 3 | Métodos | 48 |
| 3.3.1 | Aquisição e pré-processamento dos dados..... | 48 |
| 3.3.2 | Classificação supervisionada..... | 49 |
| 3.3.3 | Classificação em tela da vegetação nativa..... | 50 |
| 3.3.4 | Simulação da Área de Preservação Permanente | 51 |
| 3.3.5 | Cruzamento entre a classe mata e a simulação da APP | 51 |
| 3.3.6 | Índices radiométricos | 51 |
| 3.3.7 | Associação de índices de radiométricos, classificação e acurácia | 52 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 55 |

| | | |
|-----|--|----|
| 4.1 | Classificação supervisionada na imagem em cor verdadeira..... | 55 |
| 4.2 | Classificação em tela da vegetação nativa | 57 |
| 4.3 | Simulação da Área de Preservação Permanente | 58 |
| 4.4 | Cruzamento entre a classe mata em tela e a simulação da APP..... | 59 |
| 4.5 | Índices radiométricos | 60 |
| 4.6 | Associação de índices radiométricos e classificação | 65 |
| 4.7 | Acurácia | 75 |
| 4.8 | Conflito de uso em APP | 78 |
| 5 | CONCLUSÕES..... | 81 |
| | REFERÊNCIAS | 83 |

1 INTRODUÇÃO

A ocupação do espaço geográfico ocorre, em muitas vezes, de maneira pouco planejada, resultando na produção de modelos insustentáveis, ou seja, baseados numa produção nociva ao meio ambiente. Tais práticas de uso e ocupação são comuns em países que pautam sua economia no primeiro circuito econômico, onde a pecuária e a agricultura desempenham papéis centrais para o desenvolvimento econômico, ocasionando impactos no equilíbrio da biodiversidade e no crescimento das taxas de desmatamento das florestas.

Com a crescente produção agrícola, que atende a demanda populacional e mercadológica, há a necessidade de um planejamento pautado na esfera ambiental, levando em consideração as dinâmicas econômicas e sociais. De forma que se torna um desafio manter a produção, que visa ao incremento da economia, em consonância com as práticas de manejo sustentáveis, garantindo que os recursos naturais disponíveis se mantenham para as futuras gerações.

Nesse intuito, é imprescindível o monitoramento dos recursos naturais, como o solo, a água e a vegetação, para verificar se as práticas que regem a economia global comprometem a qualidade e a disponibilidade desses recursos.

Dentre os recursos naturais, o solo constitui um recurso extremamente valioso, pois é, a partir desse substrato, que se desenvolvem as espécies vegetais necessárias à produção de alimentos e outros bens de consumo, e a água é um recurso fundamental nos diversos setores da sociedade, que, por ser armazenada nas bacias hidrográficas, torna os estudos dessas de grande importância.

Levando em consideração a necessidade de manutenção dos recursos citados, há de se realizar um monitoramento ambiental, que envolva a coleta das informações e sua sistematização por métodos que permitam analisar o cenário atual, a fim de estabelecer metas para o futuro da sociedade e do meio ambiente.

Com o intuito de minimizar os efeitos do desmatamento e delimitar as áreas a serem conservadas, já que os impactos causados pelo uso e ocupação desordenados da terra causaram impactos negativos ao meio ambiente, foram criadas e reformuladas leis e normas para regular as Áreas de Preservação Permanente (APP) de uma bacia hidrográfica, como as Leis Federais Nº 12.651/2012 e 12.727/2012 do Código Florestal Brasileiro.

Para assegurar a aplicabilidade das leis, as inovações tecnológicas aplicadas nos estudos da superfície da Terra podem contribuir com a caracterização das bacias hidrográficas. Como exemplos dessas tecnologias, há o Sensoriamento Remoto (SR), que permite o monitoramento terrestre a um preço reduzido; o Sistema de Informação Geográfica (SIG) que, a partir do processamento e interpretação das imagens digitais, possibilitam a identificação do uso da terra; os índices radiométricos, que discriminam melhor os aspectos da paisagem e condições da vegetação, do solo e da água por meio de operações algébricas entre faixas específicas do espectro eletromagnético, e, com a associação de índices, é possível distinguir com maior precisão o uso e ocupação da terra.

Diante do exposto, a área escolhida para a realização desse estudo e para a aplicação das técnicas e métodos, bem como a coleta de informações inerentes aos recursos citados anteriormente, foi a bacia hidrográfica do rio Araquá, localizada no estado de São Paulo, entre os municípios de Botucatu e São Manuel.

Tal escolha se justifica por essa ser uma região predominante agrícola, que tem apresentado redução da mata ciliar e que, por se localizar em uma área de relevo irregular, se torna susceptível à erosão e contaminação por defensivos agrícolas. Espera-se assim, a partir da discriminação da paisagem, verificar a conformidade com as leis ambientais e oferecer suporte para um futuro planejamento ambiental.

Essa pesquisa objetivou realizar o mapeamento de uso e ocupação das terras a partir da associação entre os índices radiométricos e, por meio dessas associações, verificar a aplicação da legislação ambiental vigente em Área de Preservação Permanente (APP).

Como objetivos específicos foram definidos:

- a) Elaborar mapa da classificação de uso da terra por meio da verdade terrestre;
- b) Gerar índices radiométricos;
- c) Realizar as associações dos índices;
- d) Produzir mapa de simulação da Área de Preservação Permanente, para averiguar a consonância com a legislação ambiental;
- e) Comparar e validar as classificações realizadas nas associações de índices;
- f) Apresentar a composição de índices radiométricos, que promove melhor discriminação do uso da terra.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Bacia Hidrográfica

Para Christofolletti (1980), bacia hidrográfica pode ser definida como uma área drenada por uma rede fluvial que é influenciada, diretamente ou indiretamente, pelas dinâmicas e características do local em que está inserida, como tipo de solo, condições climáticas, relevo e uso. Com a mesma perspectiva, Ross e Del Prette (1998) discorrem que a bacia hidrográfica constitui um conjunto de elementos naturais, tais como solos, subsolo, flora e fauna, e de elementos sociais, considerando as atividades político-administrativas e econômicas, que interagem entre si.

Santos (2004) destaca que qualquer evento que ocorra na bacia hidrográfica, seja antropogênico ou biogeofísico, interfere na dinâmica ambiental, pois em um sistema, a alteração de um elemento implicará reflexos nos demais. Mas, para Leal (1995) e Guerra e Cunha (1998) os elementos sociais são os principais modificadores desse sistema, isso porque as atividades antrópicas afetam significativamente a quantidade e a qualidade das águas da bacia.

Um ponto em comum, encontrado na definição de bacia hidrográfica por diversos autores, é o destaque da água como elemento integrador e primordial do sistema. Confirmado por Botelho (2005), que descreve a bacia como regiões da superfície terrestre drenadas por cursos d'água e que tem, nas porções mais altas do relevo, o contorno dos seus limites, denominados divisores de água, e, por Santos (2006), que define a bacia como canais de escoamento, alimentados por águas provenientes da superfície e do subterrâneo.

Em relação aos aspectos físicos inerentes às bacias, essas são descritas como um conjunto de terras drenadas por um rio principal e seus afluentes, em que a água escoar dos pontos mais altos do relevo para os mais baixos, por isso é utilização da expressão vale, para se referir a uma bacia hidrográfica (GUERRA; CUNHA, 2008).

Definições semelhantes à anterior são dadas por Pollo et al. (2012), que considera a bacia hidrográfica como um conjunto de águas formado por um rio principal e seus tributários e delimitado pela topografia e por Tucci (2012), que conceitua a bacia como área de armazenamento natural de água.

De acordo com Guerra e Guerra (2008), deve ser atrelada ainda à ideia de dinamismo, pois suas linhas divisórias estão submetidas a alterações provocadas pelos agentes erosivos, que contribuem com sua expansão ou redução. Para os autores citados, deve existir também uma hierarquização da rede hidrográfica, conforme a área de abrangência e o grau de importância dos cursos de água. De modo que o curso do rio principal, do afluente ou do subafluente determina se “a bacia hidrográfica pode ser principal, secundária e mesmo terciária” (GUERRA; GUERRA, 2008, p. 77).

Apesar da fragmentação de bacias maiores em bacias menores, permanece a influência do estado de uma sobre a outra. Isso se dá porque dentro da visão sistêmica, as partes e o conjunto estão condicionados um ao outro, por possuírem propriedades em comum e em virtude das inter-relações entre os elementos (ANDREOZZI, 2005). Como destaca o mesmo autor, a organização e relação entre os elementos e o conjunto resultam em uma totalidade maior que a soma de suas partes.

E, ainda que a delimitação de uma bacia seja estabelecida obrigatoriamente a partir da rede de drenagem, para Porto e Porto (2008), a escala adotada depende da proposta pretendida, ou seja, a delimitação da bacia é dada em função de sua análise, de modo que a definição do tamanho deve levar em consideração a abrangência do fenômeno investigado, resultando na delimitação de bacias de diferentes escalas.

A hierarquização e divisão das bacias permitem compreender a funcionalidade e analisar as problemáticas do sistema como um todo, isso porque os elementos que formam o conjunto podem ser estudados conforme suas características peculiares (ANDREOZZI, 2005).

Moraes e Lorandi (2016) confirmam que o monitoramento e diagnóstico ambiental em áreas menores facilitam a análise, qualitativa e quantitativa, permitindo delimitar as áreas que necessitam de um manejo adequado e correlacionar os impactos a partir da identificação do uso da terra. Isso porque os impactos ambientais, em sua maioria, são gerados devido ao uso inadequado do solo, sendo a melhor forma para aplicação de medidas conservacionistas, o uso adequado à aptidão agrícola (LEPSCH et al., 1991).

Consequentemente, os estudos ambientais e a legislação compactuam com a adoção de bacia hidrográfica, como unidade territorial de planejamento dos recursos

naturais, com ênfase nos recursos hídricos. Neste sentido, Zanata (2014) pondera que o planejamento e manejo das bacias hidrográficas são meios eficientes para assegurar a sustentabilidade dos recursos naturais, mediante estudo e aplicação de técnicas que visem à utilização adequada das terras, conforme as suas características físicas e sua capacidade de uso.

2.2 Legislação ambiental

Para Schmieguel (2010, p. 134), “Lei é o instrumento de que se utiliza o legislador, para atribuir efeitos jurídicos aos atos e fatos, segundo valores socioculturais por ele adotados”. Nesse sentido, a lei é um texto oficial que apresenta um conjunto de normas criadas para regular situações gerais e impessoais com base em valores sócio-culturais e prevê punições para quem as descumprir (MACHADO, 2002; SCHMIEGUEL, 2010). De forma que todos, pessoas físicas ou jurídicas, têm o dever de respeitar as leis e qualquer conduta ou atividade que fuja das regras jurídicas estabelecidas para organização da comunidade é considerada uma infração (VALERA, 2017).

Assim, desde que a sociedade se condicionou à existência de um Estado, sempre houve a criação e estabelecimento de regras, a fim de estabelecer a organização social. E, na esfera ambiental, não poderia ser diferente, visto a necessidade dos recursos ambientais para manutenção da vida e das atividades produtivas. Desta forma, as leis ambientais são estabelecidas no intuito de promover medidas conservacionistas.

Porém, a negligência em relação à execução das leis ambientais, tanto pelo poder público quanto pela sociedade, ainda é um problema. Para Lima (2009), isso ocorre porque o estilo de vida das sociedades ocidentais é predatório, nele a natureza é tida como *habitat* provido de recurso e espaço ilimitados, para sustentar as atividades econômicas e seus resíduos. Ou seja, a natureza é considerada um objeto de consumo, o qual pode ser utilizado com a finalidade de suprir às necessidades humanas, gerando, no meio ambiente, um quadro exploratório e, conseqüentemente, a destruição de paisagens naturais (GONÇALVES; ALISTE, 2016).

Esse estilo de vida proveniente do neoliberalismo, modelo de desenvolvimento econômico capitalista, flexibiliza a produção e reprodução do capital ao promover a

cultura do consumo e expansão das atividades produtivas em detrimento do meio ambiente e até mesmo do bem-estar social, pois tem como principal objetivo a obtenção do lucro (DIAS et al., 2018).

A busca em minimizar a degradação ambiental, gerada pelas atividades produtivas, é desprezada principalmente nos países considerados subdesenvolvidos, que possuem parcela significativa do seu Produto Interno Bruto (PIB) pautado no agronegócio, como o Brasil (ZIEGLER, 2013). Isso porque a ideia de desenvolvimento esteve atrelada apenas à esfera econômica, mas, atualmente, tem-se a compreensão de que o desenvolvimento é decorrente da integração de múltiplas dimensões, social, ambiental, política e econômica, de modo que nenhuma dessas dimensões tenha supremacia sobre a outra (COSTA; LIMA, 2018).

As discussões acerca das políticas ambientais vão ganhar destaque entre os séculos XX e XXI, graças à democracia conquistada pelas sociedades (COSTA; LIMA, 2018). E, no Brasil a abordagem em relação às questões ambientais surge mediante a influência de órgãos e eventos internacionais, de modo que o país contou com uma longa trajetória na formulação de leis e decretos no que tange ao meio ambiente. Para isso, os ambientalistas, o governo e as comunidades civis e acadêmicas se dedicaram à criação de leis, formulação da constituição e desenvolvimento de instituições ambientais (LIMA, 2009).

O Quadro 1 apresenta uma síntese das leis e decretos ambientais instituídos no Brasil:

Quadro 1 – Síntese das Leis e decretos ambientais instituídos no Brasil

(continua)

| Lei / Decreto | Ano | Institui |
|----------------------|------------|---|
| nº 24.643 | 1934 | Código das Águas, que define as águas como recurso natural de domínio público. |
| nº 23.793 | 1934 | Primeiro Código Florestal estabelece áreas de manutenção dos recursos naturais e a classificação das florestas conforme o uso. |
| nº 4.504 | 1964 | Estatuto da Terra, que institui a conservação dos recursos naturais como função social da propriedade, ou seja, o uso da terra passa a estar condicionado a direitos e obrigações. |
| nº 4.771 | 1965 | Código Florestal, que adota uma política intervencionista do Estado sobre a propriedade agrária privada e de preservação dos recursos hídricos e as áreas de risco, instituídas Áreas de Preservação Permanente. O Código Florestal foi alterado diversas vezes através das Medidas Provisórias, sendo a alteração mais recente realizada em 2012 (Lei nº 12.727). |
| nº 6.938 | 1981 | Política Nacional do Meio Ambiente, que instituiu o Sistema Nacional do Meio Ambiente (SISNAMA), formado por órgãos e entidades da esfera federal, estadual e municipal, para promoção da gestão ambiental. |
| CR | 1988 | Constituição Federal, em que são abordados de forma abrangente os assuntos ambientais e reserva à União, Estados, Distrito Federal e Municípios a tarefa de proteger o meio ambiente. |
| nº 8.171 | 1991 | Política Agrícola, que estabelece que os Poderes Públicos devem disciplinar e fiscalizar o uso racional do solo, da água, da fauna e da flora e ordenar a ocupação das atividades econômicas, entre outras medidas. |
| nº 9.433 | 1997 | Política Nacional de Recursos Hídricos, conhecida como Lei das Águas, tem como princípio assegurar a qualidade, a disponibilidade e o uso racional da água. Essa política instituiu normas para a gestão de recursos hídricos através do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, do Plano Nacional de Recursos Hídricos e do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos hídricos, e órgãos para administração e fiscalização dos projetos, como o Conselho Nacional de Recursos Hídricos, os Comitês de Bacias Hidrográficas, as agências de água (responsável pela gestão dos recursos da cobrança do uso da água) e as organizações civis de recursos hídricos. |
| Nº 9.605 | 1998 | Lei de Crimes Ambientais ou Lei da Natureza de, no qual se estabelece punição aos infratores do meio ambiente. |
| Nº 9.795 | 1999 | Institui a Política Nacional de Educação Ambiental. |
| Nº 9.985 | 2000 | Sistema Nacional das Unidades de Conservação – SNUC que cria, delimita e gerencia áreas protegidas. |

Quadro 1 – Síntese das Leis e decretos ambientais instituídos no Brasil

(conclusão)

| Lei / Decreto | Ano | Institui |
|---------------|------|---|
| Nº 9.984 | 2000 | Agência Nacional de Águas – ANA, autarquia com autonomia financeira e administrativa vinculada ao Ministério do Meio Ambiente, com a finalidade de implementar a Política Nacional de Recursos Hídricos, em consonância com o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. |
| Nº 11.445 | 2007 | Política Nacional de Saneamento Básico, visa definir critérios qualitativos, promover o planejamento, a distribuição e o monitoramento do saneamento básico do território nacional; estabelece planos e obrigações para tratar de água, esgoto, limpeza e drenagem. |
| nº 5.487 | 2009 | Política Nacional dos Serviços Ambientais, que institui o Programa Federal de Pagamento por Serviços Ambientais e estabelece formas de controle e financiamento desse programa. |
| 12.305 | 2010 | Política Nacional dos Resíduos Sólidos, que estabelece diretrizes para a gestão dos resíduos sólidos, com vista à prevenção e controle da poluição dos recursos naturais. |
| nº 12.334 | 2010 | Política Nacional de Segurança de Barragens, que estabelece regras protetivas para as barragens e um sistema de informação sobre elas. |
| nº 12.727 | 2012 | Estabelece os limites das Áreas de Preservação Permanente em cursos d'água perenes e intermitentes e não em todos os corpos hídricos; concede anistia florestal para ocupação antrópica consolidada até 22 de julho de 2008; e define a obrigatoriedade do proprietário na manutenção de espaços protegidos (Reserva Legal e Áreas de preservação Permanente); criação do Cadastro Ambiental Rural (CAR) com a finalidade de integrar as informações ambientais das áreas rurais para controle, monitoramento e planejamento ambiental. |

Fonte: Adaptado de Garcia (2014) e Sirvinskas (2018).

As leis ambientais instituídas em âmbito federal ou estadual devem ainda ser complementadas conforme as peculiaridades locais pelos órgãos municipais (GARCIA, 2012). E, apesar de o Estado ser o responsável pela implementação e fiscalização das políticas públicas, a sociedade civil possui a responsabilidade social de exigir o cumprimento dos seus direitos, nas esferas municipal, estadual e federal (COSTA; LIMA, 2018).

Conforme o artigo 225, da Constituição da República de 1988, o meio ambiente é um bem comum que deve ser preservado e defendido por todos.

Art. 225 da CR/1988. Todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao Poder Público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações [...] (BRASIL, 1988).

Ainda com base na legislação, a Lei nº 12.727, de 17 de outubro de 2012, instituiu no Código Florestal, a adoção de boas práticas agronômicas e medidas de conservação do solo, para manter a fertilidade, controlar a degradação do solo e assegurar a qualidade e a disponibilidade desse recurso (BRASIL, 2012). A Lei supracitada decreta como “Área de Preservação Permanente, em zonas rurais ou urbanas, as faixas marginais de qualquer curso d’água natural, desde a borda da calha do leito regular” (BRASIL, CÓDIGO FLORESTAL, Lei nº. 12.727). Isso porque, de acordo com o Código Florestal Brasileiro, essas áreas das bacias hidrográficas são prioritárias para o desenvolvimento da fauna e flora, a estabilidade geológica, a proteção do solo e a preservação da biodiversidade, da paisagem e do bem-estar das populações humanas (BRASIL, 2012).

As Áreas de Preservação Permanente são delimitadas para restringir o uso inadequado da terra, visto que a expansão das atividades antrópicas resulta na diminuição da vegetação natural, aumento da ação erosiva, poluição do recurso hídrico, entre outros prejuízos ao ecossistema de uma bacia hidrográfica (SILVA et al., 2011). Sendo consideradas Áreas de Preservação Permanente os locais que, por determinação legislativa, exceto em caso de utilidade pública, a vegetação não pode ser alterada, no intuito de assegurar a manutenção dos recursos naturais (GARCIA et al., 2013).

A Lei nº 12.727, de 17 de outubro de 2012, em seu Art. 4º, estabelece a largura mínima das faixas marginais dos cursos d’água natural:

- a) 30 (trinta) metros, para os cursos d’água de menos de 10 (dez) metros de largura;
- b) 50 (cinquenta) metros, para os cursos d’água que tenham de 10 (dez) a 50 (cinquenta) metros de largura;
- c) 100 (cem) metros, para os cursos d’água que tenham de 50 (cinquenta) a 200 (duzentos) metros de largura;
- d) 200 (duzentos) metros, para os cursos d’água que tenham de 200 (duzentos) a 600 (seiscentos) metros de largura;
- e) 500 (quinhentos) metros, para os cursos d’água que tenham largura superior a 600 (seiscentos) metros; [...]. (BRASIL, CÓDIGO FLORESTAL, Lei nº. 12.727).

Diante do que foi citado, o estudo das bacias hidrográficas, que são unidades de conservação, planejamento e recuperação dos recursos naturais, é de suma importância para a proteção ambiental.

2.3 Geotecnologia e Sistema de Informação Geográfica

Todas as tecnologias aplicadas a geociências são denominadas geotecnologias. Trata-se de um conjunto de técnicas e metodologias relacionadas a diversas ciências, que visam ao monitoramento e gerenciamento do espaço geográfico por meio de satélites, radares, sensores, computadores e modelos matemáticos (BRAZ, 2017).

Devido às diversas vantagens, tais como facilidades de localização, medições geométricas e físicas de uma área, rapidez e, em alguns casos, baixo custo de aquisição das imagens, que as geotecnologias estão sendo progressivamente utilizadas no monitoramento e análises temporais dos fenômenos geográficos (CHAGAS et al., 2007). Elas representam também uma alternativa viável, do ponto de vista econômico e espacial, para promover a fiscalização no cumprimento das leis, auxiliando nos estudos e no planejamento do território (LUPPI et al., 2015).

Incluso nesse conjunto de geotecnologias, tem-se o Sistema de Informação Geográfica (SIG), que são instrumentos e programas computacionais que permitem adquirir, processar e gerar dados espacializados (PIROLI, 2002).

É possível, mediante o uso de um SIG e a partir dos dados georreferenciados, aplicar as técnicas de geoprocessamento, permitindo a manipulação, o tratamento, a produção de informações e a proposição de soluções por meio de simulações e modelagens dos dados espacializados (PIROLI, 2002).

Para Macedo, Mendes e Costa (2018), o SIG é uma ferramenta que, ao associar a cartografia a um banco de dados, permite correlacionar os aspectos morfoclimáticos, socioeconômicos, políticos e ambientais e, por isso, é muito eficaz na realização de diagnósticos ambientais.

Em síntese, Piroli (2002) e Moreira (2001) concordam que o SIG pode ser compreendido como uma ferramenta operacional no contexto das geotecnologias, auxiliando na tomada de decisões e no monitoramento da aplicação de leis ambientais.

2.3.1 QGIS

O QGIS é um programa computacional que, desenvolvido pela *Open Source Geospatial Foundation* (OSGeo), permite manipular os dados espaciais e suporta vários formatos de imagens e vetores.

Dentre os vários programas que permitem a manipulação de dados geoespacializados, o QGIS se destaca pela sua versatilidade e acessibilidade, já que é um programa computacional gratuito e livre, ou seja, é disponibilizado sem custo algum e possui código aberto para que programadores contribuam, desenvolvendo atualizações e correções, aprimorando cada vez mais seu desempenho (BRUNO, 2017).

2.3.2 Sensoriamento Remoto

O sensoriamento remoto é uma tecnologia que possibilita a aquisição de vários tipos de dados pelo registro de energia refletida e emitida pela Terra (Florenzano, 2011). De modo que, a partir do sensoriamento remoto, é possível a “obtenção de imagens dos objetos da superfície terrestre sem que haja um contato físico de qualquer espécie entre o sensor e o objeto” (MENESES; ALMEIDA, 2012).

Para Jensen (2009), o sensoriamento remoto é uma ciência responsável pela aquisição, armazenamento, tratamento e interpretação de dados obtidos de um alvo ou fenômeno, sem nenhum contato físico com o mesmo, por meio da detecção e medição das interações da radiação eletromagnética. Sendo que, para coletar dados a distâncias remotas, essa ciência necessita recorrer a diversos ramos do conhecimento como matemática, biologia, informática, ciências da terra, entre outras (FLORENZANO, 2011).

A obtenção das imagens, provenientes do sensoriamento remoto, é realizada por intermédio de sensores imageadores multiespectrais acoplados em satélites artificiais, que registram a interação da radiação eletromagnética (REM) com os alvos (MENESES; ALMEIDA, 2012). A REM se propaga pelo espaço vazio na forma de onda e energia, que, ao atingir o alvo, pode ser absorvida, refletida ou transmitida (NOVO, 2008).

A energia eletromagnética interage com os alvos de diferentes maneiras, de acordo com suas propriedades físicas e químicas e é registrada por sensores que

captam diferentes faixas do comprimento de ondas (FLORENZANO, 2011). De forma que, quanto maior o número de sensores que operam em diferentes faixas do espectro eletromagnético, melhor será o nível de detalhamento (OLIVEIRA et al., 2012).

Segundo Cardoso e Amorim (2014), o sensoriamento remoto tornou acessível a aquisição de imagens de média e alta resolução, espacial e temporal, contribuindo com o aumento do número de estudos direcionados ao planejamento do uso da terra. Isso porque pesquisas que envolvem a ocorrência de fenômenos terrestres dependem de dados confiáveis, que possam representar corretamente a realidade, como é o caso das imagens de satélite, que permitem a identificação das alterações biofísicas e antrópicas e a realização de análises multitemporais da superfície terrestre (PELUZIO et al., 2013).

O sensoriamento remoto possibilita ainda, por meio de cálculos entre os canais radiométricos das imagens de satélite, a obtenção de índices físicos. Esses índices são usados, isoladamente ou integrados, para diferenciar a cobertura da terra, pois os seus valores variam de acordo com o material encontrado na superfície e com as condições climáticas (RAFAEL, 2014).

2.3.3 Satélite Sentinel-2

As imagens de satélite são produtos do sensoriamento remoto, pois captam dados sem que ocorra o contato direto com o objeto. Dentre os vários satélites de observação terrestre, o Sentinel-2 se destaca pela acessibilidade, suas imagens são disponibilizadas gratuitamente, e pela alta resolução espacial, permitindo obter informações da superfície terrestre com bom nível de detalhamento.

A Agência Espacial Europeia (ESA) desenvolveu, para o programa Copernicus, dois satélites com o sensor projetado de forma idêntica, o Sentinel-2A e o Sentinel-2B, visando o estudo de áreas terrestres e costeiras. O Sentinel-2A foi lançado em 23 de junho de 2015 e, posteriormente, para diminuir o tempo de revisada de 10 para 5 dias, foi lançado o Sentinel-2B, em 7 de março de 2017 (CHEN, et al., 2018).

A bordo dos satélites está um *Imageador Multiespectral (MSI)* de alta resolução, que possui 13 bandas espectrais de 10, 20 ou 60 metros de resolução espacial (ESA, 2019). No Quadro 2, estão representadas as resoluções espaciais e

espectrais das bandas das imagens do Sentinel-2A, que foram utilizadas neste estudo.

Quadro 2 – Resolução espacial das bandas do Sentinel-2A

| Resolução | Número da banda | Nome da banda | Comprimento de onda (nanômetro) |
|-----------|-----------------|-----------------------------|---------------------------------|
| 10 m | B02 | Blue (azul) | 490 |
| | B03 | Green (verde) | 560 |
| | B04 | Red (vermelho) | 665 |
| | B05 | RE (vermelho próximo) | 705 |
| | B08 | NIR (infravermelho próximo) | 842 |
| 20 m | B11 | SWIR (infravermelho médio) | 1610 |

Fonte: Adaptado de ESA (2019).

2.3.4 Índices radiométricos

Os índices radiométricos são modelos matemáticos desenvolvidos para discernir as respostas espectrais de determinados alvos imageados na superfície terrestre (OLIVEIRA et al., 2009).

Os índices são úteis para orientar o manejo adequado dos recursos naturais e permitem apontar quando a exploração dos recursos florestais, hídricos e do solo está de acordo com a capacidade de recuperação dos sistemas agrícolas e com a legislação ou com o planejamento ambiental e urbano (NOVO, 2008).

Como apontaram Lobato et al. (2010), os índices radiométricos são geralmente utilizados para produção de mapas temáticos, sendo obtidos por meio das equações entre as bandas espectrais, que ressaltam aspectos inerentes a determinado índice (MARCUSI et al., 2010). Esses mapas permitem a melhoria da visibilidade das áreas monitoradas e diminuem, consideravelmente, a onerosidade do processo de avaliação de extensas áreas (QUINTO et al., 2012).

A escolha do índice depende do alvo que se objetiva ressaltar e apesar da aplicação dos índices radiométricos ser de grande eficiência na avaliação da cobertura terrestre, é necessária a busca por maior nível de detalhamento. Nesse

sentido, a composição de índices pode ser uma técnica eficaz para melhorar o contraste e, conseqüentemente, obter uma classificação mais precisa dos elementos que compõem a paisagem.

As composições supracitadas referem-se às associações de índices radiométricos aos canais *RGB* (*Red-Green-Blue*), que objetiva distinguir melhor os alvos ao realçar o contraste dos índices utilizados, distinguindo áreas vegetativas, solo exposto, corpos de água e áreas construídas (FRANÇA; TAVARES JUNIOR; MOREIRA FILHO, 2012).

Existem vários índices que são utilizados nos estudos agrônômicos e a escolha do índice depende do que se pretende estudar. É importante ressaltar que existem poucos estudos associando os índices aos canais *RGB* no processamento de imagens digitais.

2.3.4.1 NDBI

O Índice de Área Construída por Diferença Normalizada foi desenvolvido por Zha, Gao e Ni, em 2003, para identificação do solo coberto e/ou não permeável (SILVA; COSTA JUNIOR; LIMA, 2014).

A resposta espectral das áreas impermeáveis é obtida a partir dos números digitais das bandas do infravermelho médio e próximo, gerando uma imagem em que os *pixels* de áreas impermeabilizadas apresentam valores positivos (JENSEN, 2009).

A escala do NDBI vai de -1 a 1, em que valores negativos indicam superfícies com cobertura vegetal, florestas ou culturas agrícolas, e acima de zero representam superfícies urbanizadas e/ou impermeabilizadas (SILVA; COSTA JUNIOR; LIMA, 2014). O NDBI é obtido pela Equação 1.

$$NDBI = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR} \quad (1)$$

O *NIR* corresponde à banda que ressalta a reflectância do infravermelho próximo e o *SWIR*, à banda do infravermelho médio.

O índice NDBI tem sido amplamente utilizado para analisar áreas construídas, porém apresenta limitações, como constatado no trabalho de Penachio (2017), pois áreas de solo exposto ou em início de desenvolvimento vegetativo podem apresentar

a mesma resposta espectral das áreas impermeabilizadas, sendo necessária a análise e distinção pelo operador.

2.3.4.2 NDWI

Existem diferentes métodos para obtenção do Índice de Diferença Normalizada da Água, propostos por Gao (1996), McFeeters (1996) e Xu (2006).

Optou-se por aplicar o método de Xu, que maximiza a reflectância da água na banda do verde e minimiza a reflectância na banda do infravermelho médio (DU et al., 2016).

Esse índice permite delimitar os corpos d'água e medir a umidade presente na vegetação, pois realça a resposta espectral da água (BORGES et al., 2015). Assim, valores positivos de NDWI representam áreas com vegetação sadia e valores negativos representam vegetação seca, solo exposto ou áreas impermeabilizadas (FERREIRA et al., 2012).

O NDWI é produto da refletância do verde e infravermelho médio, conforme a Equação 2.

$$NDWI = \frac{GREEN - SWIR}{GREEN + SWIR} \quad (2)$$

GREEN corresponde à banda que ressalta a reflectância do verde e *SWIR* é a banda que ressalta a reflectância do infravermelho médio.

Penha et al. (2017), ao avaliar o potencial do NDWI na detecção de corpos hídricos em imagens da série Sentinel-2, comprovou a eficiência desse índice com algumas limitações, pois alguns *pixels* captam a mesma resposta espectral para áreas construídas e corpos hídricos.

2.3.4.3 GNDVI

O Índice de Vegetação de Diferença Normalizada Verde é uma adaptação do NDVI, proposta por Gitelson, Kaufman, e Merzlyak (1996). Nele substitui-se a banda do vermelho pela banda do verde, pois a faixa do verde é mais sensível à variação na concentração de clorofila, resultando em maior reflectância que a banda do vermelho (GITELSON; KAUFMAN; MERZLYAK, 1996).

Ghosh et al. (2018) apontam que o GNDVI apresenta maior correlação com a biomassa e capacidade superior em identificar a vegetação em estado de estresse e início de desenvolvimento, quando comparado ao NDVI.

Segundo Immitzer, Vuolo e Atzberger (2016), a classificação de imagens do Sentinel-2 se torna mais eficaz quando se utiliza do canal espectral verde. Isso porque o canal verde, sendo mais sensível aos valores moderados e altos de clorofila, promove maior contraste entre as vegetações (HATIFIELD; SCHEPERS, 2008).

A escala de variação do GNDVI vai de -1 a 1. Os valores próximos a 1 são correspondentes às áreas com vegetação abundante e o inverso para os números próximos a -1, que apresentam escassez vegetativa. O GNDVI é obtido por meio da Equação 3.

$$GNDVI = \frac{GREEN - NIR}{GREEN + NIR} \quad (3)$$

Sendo que *GREEN* corresponde à refletância na banda do verde e *NIR*, na banda do infravermelho próximo.

2.3.4.4 NDI45

O Índice de Vegetação da Diferença Normalizada B4 e B5 foi proposto por Delegido et al. (2011), como uma das variações do NDVI, teve a banda do infravermelho substituída pela banda do vermelho próximo.

Esse índice tem sido aplicado em imagens do Sentinel-2, para monitoramento agrícola em diferentes tipos de culturas (GHOSH et al., 2018). Assim, a escolha desse índice se justifica devido à região estudada ter o predomínio de cultivos agrícolas.

Os valores de NDI45 também variam de -1 a 1, de modo que, quanto maior for o seu valor, maior será a densidade vegetal apresentada. O NDI45 é definido pela Equação 4.

$$NDI45 = \frac{RE - RED}{RE + RED} \quad (4)$$

Em que *RED* corresponde à faixa espectral do canal do vermelho e *RE* a do vermelho próximo.

2.3.4.5 NDVI

O Índice de Vegetação da Diferença Normalizada foi desenvolvido por Rouse et al. (1973), é um dos índices mais utilizados em estudos ambientais para detectar a densidade e a condição da vegetação (BEZERRA; SILVA; BEZERRA, 2011).

Esse índice é produto da diferença de reflectância entre a faixa do infravermelho próximo e a faixa do vermelho. Isso porque a vegetação sadia apresenta maior absorção da luz visível incidente e maior reflectância da luz infravermelha, enquanto o inverso acontece quando a vegetação não se encontra saudável (RODRIGUES; RIBEIRO; VAZ, 2013).

Também para o NDVI, os valores variam de -1 a 1, sendo os valores mais próximos de 1 identificam maior densidade vegetal. De acordo com os alvos espectrais os valores de NDVI podem sofrer variações, sendo que valores com intervalo próximo a 0,20 e 0,80 correspondem às áreas de vegetação sadia ou densa (ROUSE et al., 1973); valores próximos de 0 correspondem às áreas não vegetadas e valores negativos na identificação de corpos d'água ou nuvens (ALVARENGA; MORAES, 2014); mas, valores próximos de 0, também são obtidos para áreas de pastagem e em início de desenvolvimento da vegetação e valores negativos para áreas urbanizadas, com pastagem degradadas e solo exposto (ALMEIDA; ROCHA, 2018). A obtenção do NDVI é dada pela Equação 5.

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (5)$$

Sendo que *NIR* é a banda do infravermelho próximo e *RED* é a banda do vermelho.

2.3.4.6 Associação dos Índices Radiométricos

Devido às limitações de aplicabilidade dos índices de vegetação que, em alguns casos, identificam a mesma assinatura espectral para áreas de usos diferentes, a metodologia de associação de índices físicos aos canais RGB

(R→NDBI, G→NDVI, B→NDWI; R→NDBI, G→GNDVI, B→NDWI; R→NDBI, G→DVI45, B→NDWI) foi empregada por França et al. (2012), que obteve resultados satisfatórios da discriminação dos usos da terra para as regiões costeiras dos municípios de Recife.

Cardoso e Amorim (2014) adotaram essa metodologia no estudo das áreas urbanas e periurbanas do município de Presidente Prudente, para identificação das seguintes classes de uso e cobertura da terra: áreas construídas, solo exposto, vegetação arbórea, vegetação rasteira, cultivos, áreas de pastagem e água.

Moreira Filho e Tavares Junior (2016), também, utilizam os índices radiométricos associados aos canais RGB para obter contrastes mais bem definidos no entorno da Lagoa Olho D'Água, localizada em Jaboatão dos Guararapes-PE, para a identificação de águas do mar, águas abrigadas da Lagoa Olho D'Água, vegetação de mangue e de restinga, área urbana e áreas de transição.

Em ambos os estudos supracitados foram obtidos bons resultados com o método de combinações de índices aos canais RGB, porém ao utilizarem imagens de um satélite de menor resolução espacial, ocorreram confusões entre alvos com comportamento espectral semelhantes.

2.3.5 Classificação supervisionada

Com os produtos obtidos por meio das composições de imagens e de índices radiométricos é possível realizar a classificação de imagens, a fim de produzir um mapa temático com a discriminação de uso e ocupação da terra.

Existem muitas técnicas de classificação, sendo a supervisionada uma das mais utilizadas (JENSEN, 2009). A classificação supervisionada é realizada identificando e associando os *pixels* de uma cena, que possuem características semelhantes de tonalidade e textura, a uma categoria de uso (RAFAEL, 2014). Nesse processo, ocorre a identificação da resposta espectral do alvo na imagem e a associação deste alvo com a categoria determinada pelo analista.

O processo de identificação dos alvos terrestres se dá pelo reconhecimento das diferentes formas, texturas e coloração dos alvos imageados na superfície terrestre (FLORENZANO, 2008). Bem como, pela comparação das amostras de treinamento (áreas de controle), identificadas nas imagens de satélite, com estudos semelhantes.

Para Meneses e Almeida (2012) um mapa digital gerado pela classificação supervisionada é um produto estatístico e probabilístico, ou seja, é uma aproximação da realidade. E, por isso, é necessário validar o desempenho da classificação, estimando a precisão de sua acurácia (RODRIGUES, 2015).

2.3.6 Acurácia

Existem diferentes métodos para validar a qualidade do mapeamento e um deles é a matriz de confusão, que relaciona a imagem classificada com a verdade terrestre e, assim, permite comparar pontualmente as classes da imagem de referência com o mapeamento gerado (SERRA; PONS, 2008).

Na matriz de confusão os *pixels* são distribuídos em linhas e colunas, sendo identificados na diagonal principal os *pixels* corretamente classificados. E, a partir das colunas, é possível verificar os *pixels* associados erroneamente a outras classes.

Assim, na matriz, com exceção da diagonal principal, as colunas identificam os erros de comissão, que são os pixels incluídos erroneamente em cada classe, e os erros de omissão, consiste nos *pixels* que foram excluídos na classificação (FERREIRA et al. 2007).

Para Congalton e Green (1999), o cálculo do coeficiente Kappa, que é produzido a partir dos elementos da matriz de confusão, é o melhor método para a análise da confiança da classificação. E, devido a sua elevada eficiência, esse é o método de acurácia mais utilizado (RODRIGUES, 2015).

O coeficiente Kappa determina a probabilidade de um *pixel* estar corretamente classificado (JENSEN, 1986; GONG; HOWARTH, 1990; DEMARCHI et. al, 2011). Para isso realiza a concordância das amostras de treinamento com a verdade, identificando os *pixels* corretamente e erroneamente classificados, para obter a porcentagem de valores corretos (FERREIRA; DANTAS; MORAIS, 2007). O valor kappa é obtido a partir da equação 6.

$$k = \frac{N \sum_{i=1}^r x_{ij} - \sum_{i=1}^r (x_{i+} x_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^r (x_{i+} x_{+i})} \quad (6)$$

Sendo que r é o número de classes, x_{ij} é o número de elementos classificados corretamente, x_{i+} é o total de elementos de referência amostrados para uma categoria i e N é o número total de amostras.

A Tabela 1 apresenta os intervalos do índice Kappa e o desempenho qualitativo, de cada intervalo, em relação à verdade terrestre.

Tabela 1 – Qualidade da classificação

| Índice Kappa | Desempenho |
|---------------------|-------------------|
| <0 | Péssimo |
| $0 < k \leq 0,2$ | Ruim |
| $0,2 < k \leq 0,4$ | Razoável |
| $0,4 < k \leq 0,6$ | Bom |
| $0,6 < k \leq 0,8$ | Muito Bom |
| $0,8 < k \leq 1,0$ | Excelente |

Fonte: Fonseca (2000).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização da bacia hidrográfica

A bacia hidrográfica do rio Araquá (FIGURA 1) é afluente da margem esquerda do rio Tietê. Pertence à bacia hidrográfica do Paraná e, segundo o Sistema Integrado de Gerenciamento de Bacias Hidrográficas (SIGBH), integra a Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRH-10) Sorocaba Médio Tietê (SILVA, 2011).

A bacia abrange a área total de 331,90 Km² e abriga uma rede de drenagem com comprimento total de 287,60 km. Localiza-se nos municípios de Botucatu e São Manuel, região centro oeste do estado de São Paulo, entre as coordenadas 22° 54' e 22° 38' latitude sul e 48° 34' e 48° 23' longitude oeste do Meridiano de Greenwich (SANTOS, 2011; SILVA, 2011).

Figura 1 – Localização da bacia hidrográfica do rio Araquá



Fonte: Elaboração própria.

Em relação às características morfológicas, a bacia hidrográfica do rio Araquá apresenta uma rede de drenagem dendrítica em formato alongado, com baixa

sinuosidade do curso principal, indicando um baixo risco de enchentes e elevada velocidade na dispersão de poluentes; a densidade de drenagem baixa indica o escoamento lento de suas águas e permite inferir que a permeabilidade e a infiltração são elevadas; o relevo é ondulado, com declividade média de 10,62%, favorecendo a ocorrência de processos erosivos e contaminação das águas dos rios (OLIVEIRA et al., 2015).

O Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura descreve que os municípios de Botucatu e São Manuel apresentam verão quente e chuvoso e inverno frio e seco, com temperatura média aproximada de 20,8°C, sendo a menor temperatura média no mês de julho (17,1°C) e a maior em fevereiro (23,1°C) (CEPAGRI, 2014).

Segundo a classificação de Köppen, o clima dos municípios em que a bacia está inserida é definido como mesotérmico Cwa, caracterizando o clima temperado quente.

Cunha e Martins (2009) destacam que as duas cidades possuem clima úmido, com reduzido déficit hídrico entre os meses de abril e agosto e índices hídricos consideravelmente elevados entre final de setembro e o início de março, sendo que, ao longo do ano, o índice pluviométrico varia entre 900 a 1900 mm.

No contexto geológico, a bacia hidrográfica do rio Araquá está localizada na Cuesta Basáltica, composta basicamente por arenitos e basaltos. O relevo apresenta características diversificadas, devido às diferenças de altitude entre o Front, o Reverso e a Depressão Periférica da Cuesta, com cotas altimétricas que variam de 450 metros a 920 metros (ZIMBACK, 2008).

De acordo com a classificação do relevo, proposta pelo Sistema Brasileiro de Classificação Solos, a declividade varia de suave a ondulada na Depressão Periférica e no Reverso da Cuesta, respectivamente e acentuada no Front da Cuesta (SILVA, 2011).

Santos (2011) constatou que as nascentes da bacia estão na região do Reverso da Cuesta, enquanto a foz está na Depressão Periférica, onde o relevo é suave a suave-ondulado. No Front da Cuesta, ocorre a formação de quedas d'água devido aos acentuados declives (EMBRAPA, 2006).

No que tange ao uso da terra, notou-se uma grande diversidade, em que a vegetação original, composta por mata latifoliada tropical, higrófilas e cerrado, foi substituída pela cultura de café durante o século XVIII (OLIVEIRA et al., 2015).

Foi a partir do século XX que o cultivo de cana-de-açúcar passou a ocupar grande parte dessas terras, seguido por pastagem, vegetação nativa, silvicultura, pousio, citros, café e outros usos de menor representatividade (SILVA, 2011).

Belluta et al. (2014) apontam que as matas nativas, ao serem substituídas, tornaram a bacia suscetível à contaminação por defensivos agrícolas.

3.2 Material

3.2.1 Programas computacionais

Para processamento dos dados, geração de arquivos vetoriais e matriciais, cálculos e composições dos índices de vegetação, análise dos dados e produção dos mapas foi utilizado o QGIS, versão 2.8.5.

E, para realizar a reamostragem das cenas com resolução espacial de 20 metros para 10 metros, foi utilizado o programa computacional *Sentinel Application Platform* (SNAP), desenvolvido e disponibilizado pela Agência Espacial Europeia (ESA).

3.2.2 Banco de dados e base cartográfica

Os dados para a realização da pesquisa integram diversas fontes em formatos digitais, imagens e vetores, compatíveis com o uso no Sistema de Informação Geográfica.

Como fontes de dados da área foram utilizados:

- a) Vetores da Rede de Drenagem do Brasil, da Agência Nacional de Águas (ANA) em escala 1:50.000;
- b) Limites das sub-bacias hidrográficas do estado de São Paulo obtidas na plataforma da Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo, delimitadas com base na rede de drenagem extraída do Modelo Digital de Elevação (MDE) desenvolvido a partir de curvas de nível das cartas do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), em escala 1:50.000;
- c) Limites municipais do estado de São Paulo, em escala 1:50.000, obtidos na plataforma do Instituto Geográfico e Cartográfico (IGC);

d) Imagens orbitais do satélite Sentinel-2, com resolução espacial de 10 e 20 metros, adquiridas por meio da plataforma *Copernicus*.

3.3 Métodos

3.3.1 Aquisição e pré-processamento dos dados

As imagens orbitais utilizadas são produtos do *Sensor Multispectral Instrument* (MSI) a bordo do satélite Sentinel-2, disponibilizadas gratuitamente na plataforma do Programa de Observação da Terra da União Europeia, *Copernicus*, gerido pela Agência Espacial Europeia – ESA (ESA, 2019).

As imagens são disponibilizadas com correção atmosférica, em que a refletância das bandas é corrigida para eliminar a interferência dos gases e particulados da atmosfera, realizada pela própria ESA por meio do complemento *Sen2core* (ESA, 2019).

Preocupou-se, inicialmente, em selecionar cenas com baixo percentual de cobertura de nuvens, sendo selecionadas cenas do dia 24 de junho de 2019, por apresentar percentual de cobertura de nuvens menor de 2%.

Para a completa abrangência da área de estudo foram necessárias duas cenas, com identificação 22KGA e 22KGV no Sistema de Referência de Grade Militar – MGRS. Como as cenas são disponibilizadas no formato JP2, realizou-se a transformação para GeoTiff, que é o formato compatível com os procedimentos e programas computacionais utilizados neste trabalho, mediante o complemento Conversão do QGIS. Posteriormente, as cenas foram unidas, mediante a ferramenta Miscelânea, também do QGIS, e, conseqüentemente, produzidos os mosaicos referentes a cada banda.

Como a cena utilizada possui bandas de diferentes resoluções espaciais, foi necessária a uniformização entre elas para composição da imagem em cor verdadeira e produção dos índices. Para isso foi realizado o processo de reamostragem, aplicando o método vizinho mais próximo (*Nearest Neighbor*), por meio do programa computacional *Sentinel Application Platform* (SNAP).

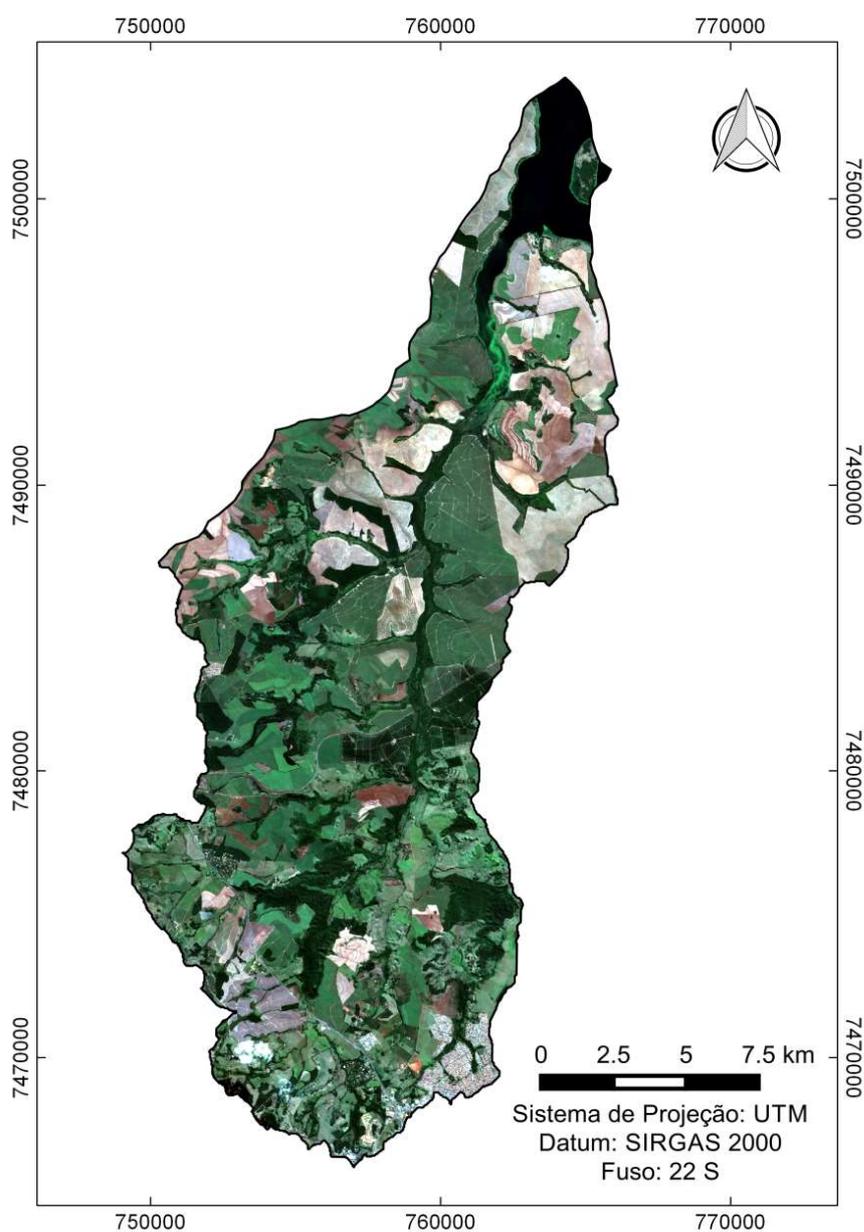
Após uniformizadas, as bandas utilizadas foram reprojetaadas para a projeção cartográfica SIRGAS 2000, no fuso 22 sul do sistema de projeção UTM (Universal

Transversa de Mercator). Em seguida, as cenas foram recortadas de acordo com o vetor de delimitação da bacia hidrográfica do rio Araquá.

3.3.2 Classificação supervisionada

Inicialmente realizou-se a produção do mapa na composição em cor verdadeira, obtida pela união das bandas 4, 3 e 2, que captam o comprimentos de ondas do vermelho, do verde e do azul, respectivamente (FIGURA 2).

Figura 2 – Composição cor verdadeira (Bandas 4, 3 e 2)



Fonte: Elaboração própria.

Posteriormente, efetuou-se a identificação de uso da terra mediante a análise da cor e textura dos *pixels* da imagem de satélite para coleta da amostragem. Foram coletadas 2043 amostras, a partir da criação de vetores que identificaram oito classes de uso da terra, sendo elas: água, cana, citros, mata, brotação, solo pós-cultivo, pastagem e edificações.

A coleta das amostras de treinamento foi feita na imagem em cor verdadeira por meio da produção de vetores em polígonos, discernindo os alvos conforme a assinatura espectral e delimitando os *pixels* com aspetos semelhantes.

Para facilitar a identificação do uso e vetorização das amostras, foi utilizado o *Quick Map Services*, complemento do QGIS que permite adicionar bases de mapas virtuais disponibilizadas por diversos servidores, sendo utilizado para esta pesquisa o serviço de mapeamento do Google Satélite.

Para fins de classificação, o plantio de cana-de-açúcar foi diferenciado em duas classes, pois se notam cultivos em diferentes estágios de desenvolvimento vegetativo e, conseqüentemente, possuem assinaturas espectrais distintas.

Assim, tem-se a classe brotação, que corresponde ao cultivo em início de desenvolvimento vegetativo, e a classe cana, que identifica o plantio, em período de crescimento, a maturação.

As áreas identificadas com solo exposto são áreas utilizadas para fins agrícolas, mas que, no momento de aquisição da imagem, teriam passado pelo período de colheita e foram representadas pela classe denominada solo pós-cultivo.

As terras utilizadas para plantio de laranja são classificadas como citros; a classe mata representa a mata ciliar, a vegetação nativa ou a área de reposição florestal; a classe que identifica a presença de pasto é classificada como pastagem; e a classe edificações corresponde às infraestruturas urbanas, estradas e rodovias.

A classificação do uso da terra foi realizada com o complemento *Dzetsaka*, disponível no QGIS que, para determinar as classes, utiliza o modelo de Mistura Gaussiana (FAUVEL et al., 2015). E, a partir dessa classificação supervisionada, é realizado o cálculo das áreas ocupadas por cada categoria de uso.

3.3.3 Classificação em tela da vegetação nativa

Na classificação em tela, a interpretação da imagem permite que o operador seja capaz de distinguir com maior precisão uma classe das demais, mesmo que

apresentem semelhanças, e, na classificação automática, o classificador pode confundir as classes que possuem similaridades espectrais (RODRIGUES, 2015).

Por isso, a partir da imagem em cor verdadeira, foi realizada a identificação em tela da classe mata, obtendo, assim, informações pontuais de localização e área ocupada pela mata ciliar, vegetação nativa e de reposição florestal. E, por meio da calculadora da tabela de atributos do QGIS, obteve-se a área para a referida classe.

3.3.4 Simulação da Área de Preservação Permanente

Para essa etapa foi simulada as APP da bacia por meio da identificação das nascentes, da rede de drenagem e do limite da represa. Mediante o uso da ferramenta *Buffers*, do QGIS, são criados vetores que delimitam a APP, de acordo com o espaço definido na legislação e dado pelo operador.

Desse modo, o limite da APP no entorno do reservatório, decorrente do represamento d'água, é de 100 metros, valor esse definido conforme a licença ambiental do empreendimento. Nas nascentes, foram criados vetores com raio de 50 metros e, nas redes de drenagem, como o leito regular do curso d'água possui largura inferior a 10 metros, foram produzidos vetores com 30 metros em cada margem do curso hídrico, seguindo a legislação – Lei nº 12.727, de 17 de outubro de 2012.

3.3.5 Cruzamento entre a classe mata e a simulação da APP

Para essa etapa foi realizada a sobreposição do mapa de Simulação da Área de Preservação Permanente (APP) com o mapa de identificação da mata. Tornando possível identificar as áreas que apresentam conflito de uso, ou seja, que não estão de acordo com o estabelecido pela legislação ambiental vigente.

3.3.6 Índices radiométricos

Os índices radiométricos, obtidos a partir de equações entre as bandas espectrais, depende dos alvos que se pretende distinguir. Os índices NDBI, NDWI, GNDVI, NDI45 e NDVI foram utilizados como produtos para geração da composição de índices. Isso porque o método de associar os índices físicos tem mostrado

resultados eficientes, como mencionado nos trabalhos de França, Tavares Junior e Moreira Filho (2012) e Cardoso e Amorim (2014).

Com base na proposta desse estudo e nos alvos presentes na região estudada, os índices NDBI e NDWI foram utilizados em todas as associações, já que são aplicados para captar as respostas espectrais de áreas impermeabilizadas e a presença de corpos d'água, respectivamente. Os índices GNDVI, NDI45 e NDVI foram utilizados com a finalidade de verificar o que melhor discrimina as respostas espectrais da vegetação.

O Quadro 3 apresenta as equações entre os canais espectrais e as respectivas bandas do Sentinel-2A, para cálculo dos índices radiométricos.

Quadro 3 – Equações dos índices radiométricos

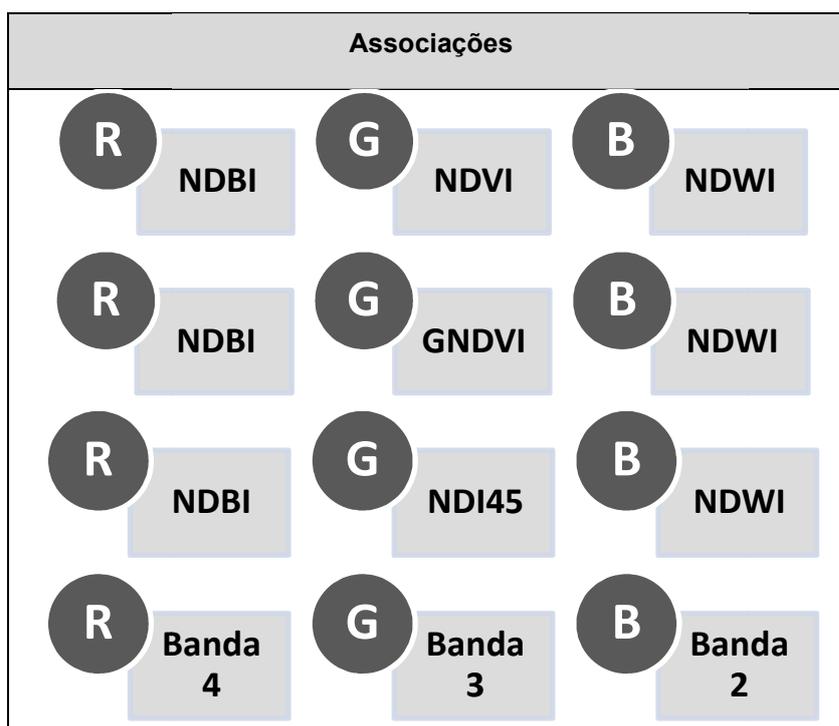
| Índices radiométricos | Canais espectrais | Bandas do Sentinel-2A |
|-----------------------|---------------------|-----------------------|
| NDBI | <u>NIR – SWIR</u> | <u>B8 – B11</u> |
| | NIR + SWIR | B8 + B11 |
| NDWI | <u>GREEN - SWIR</u> | <u>B3 – B11</u> |
| | GREEN + SWIR | B3 + B11 |
| GNDVI | <u>NIR – GREEN</u> | <u>B8 – B3</u> |
| | NIR + GREEN | B8 + B3 |
| NDI45 | <u>RE – RED</u> | <u>B5 – B4</u> |
| | RE + RED | B5 + B4 |
| NDVI | <u>NIR – RED</u> | <u>B8 – B4</u> |
| | NIR + RED | B8 + B4 |

Fonte: Elaboração própria.

3.3.7 Associação de índices de radiométricos, classificação e acurácia

A partir dos índices radiométricos, são efetuadas as composições com os índices, associando os índices aos canais RGB (QUADRO 4), pois as associações dos índices aos canais RGB podem melhorar a identificação dos alvos e, assim, gerar a classificação com maior precisão.

Quadro 4 – Associações de índices e bandas aos canais RGB



Fonte: Elaboração própria.

Nas associações dos índices NDBI-NDVI-NDWI, NDBI-GNDVI-NDWI e NDBI-NDI45-NDWI e na associação RGB, que corresponde à associação das bandas 4, 3 e 2, do satélite Sentinel-2A, para composição da imagem em cor verdadeira, foram realizadas as classificações supervisionadas com o uso de uma ferramenta instalada no QGIS, o *Dzetsaka*.

O *Dzetsaka* foi criado por Nicolas Kasariak e utiliza o algoritmo do Modelo de Mistura Gaussiana, desenvolvido por Mathieu Fauvel. Esse classificador tem mostrado bom desempenho no processo de classificação supervisionada, como mostram os trabalhos de Fauvel et al. (2015) e Fitz, Vieira e Soares (2019).

Porém, os métodos de classificação supervisionada não geram informações com completa exatidão, uma vez que são baseados em variáveis e probabilidades e, por isso, é necessária a acurácia dos resultados produzidos.

A acurácia é realizada a fim de identificar a associação de índices que apresenta melhor distinção entre os alvos imageados e foi feita mediante determinação da matriz de confusão e do coeficiente Kappa.

A obtenção da acurácia, tanto das matrizes de confusão quanto do coeficiente Kappa, foi realizada mediante funcionalidades do QGIS. Sendo, por meio do

complemento *Accuracy Assessment*, gerada a matriz de confusão e por meio do Dzetsaka, se obtém o coeficiente Kappa.

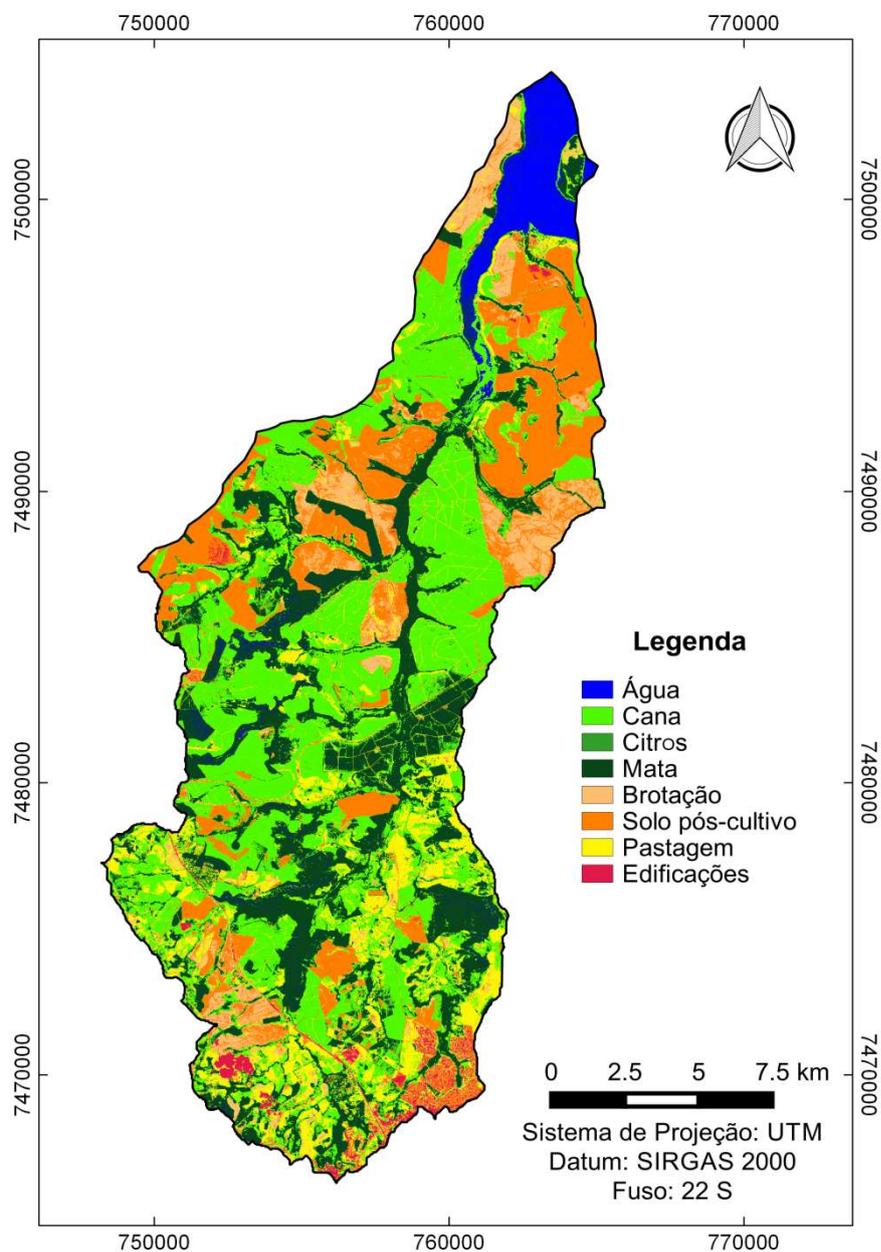
Assim, a validação é produzida relacionando o mapa de referência com a imagem classificada, que ao gerar uma matriz de confusão, possibilita a quantificação dos *pixels* de cada classe em um arquivo compatível com o Excel.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Classificação supervisionada na imagem em cor verdadeira

Como observado na Figura 3, há a predominância do cultivo de cana-de-açúcar em diferentes estágios de desenvolvimento vegetativo, pois o uso das técnicas de irrigação permite o plantio e a colheita ao longo do ano.

Figura 3 – Classificação supervisionada na imagem em cor verdadeira



Fonte: Elaboração própria.

Conforme Tabela 2, as classes brotação e cana, que representam o mesmo gênero agrícola, abrangem o total de 143 km². Sendo que a presença da classe cana, que representa o plantio de cana-de-açúcar em estágio de maturação, é mais constante na imagem coletada para o estudo, ocupando 118,6 km², e a classe brotação é quantitativamente inferior, com área total de 24,4 km², distribuída ao longo da bacia, muitas vezes próxima à área de solo pós-colheita e/ou pastagem.

Tabela 2 – Classes de uso da terra na imagem em cor verdadeira

| Classes | Área (km²) |
|-------------------------|------------------------------|
| Água | 14,00 |
| Pastagem | 35,10 |
| Edificações | 6,00 |
| Solo pós-cultivo | 57,30 |
| Cana | 118,60 |
| Mata | 71,60 |
| Citros | 4,90 |
| Brotação | 24,40 |
| Total | 331,80 |

Fonte: Elaboração própria.

O uso da terra para pastagem corresponde à 35,1 km² e se concentra na porção sul da bacia. O predomínio das edificações urbanas também ocorre ao sul da bacia hidrográfica, ocupando 6 km². As áreas identificadas com o solo exposto, que foram classificadas como solo pós-colheita por serem utilizadas para fins agrícolas, predominam nas regiões nordeste e noroeste da bacia, porém pequenos fragmentos são encontrados distribuídos ao longo da área de estudo, gerando o total de 57,3 km².

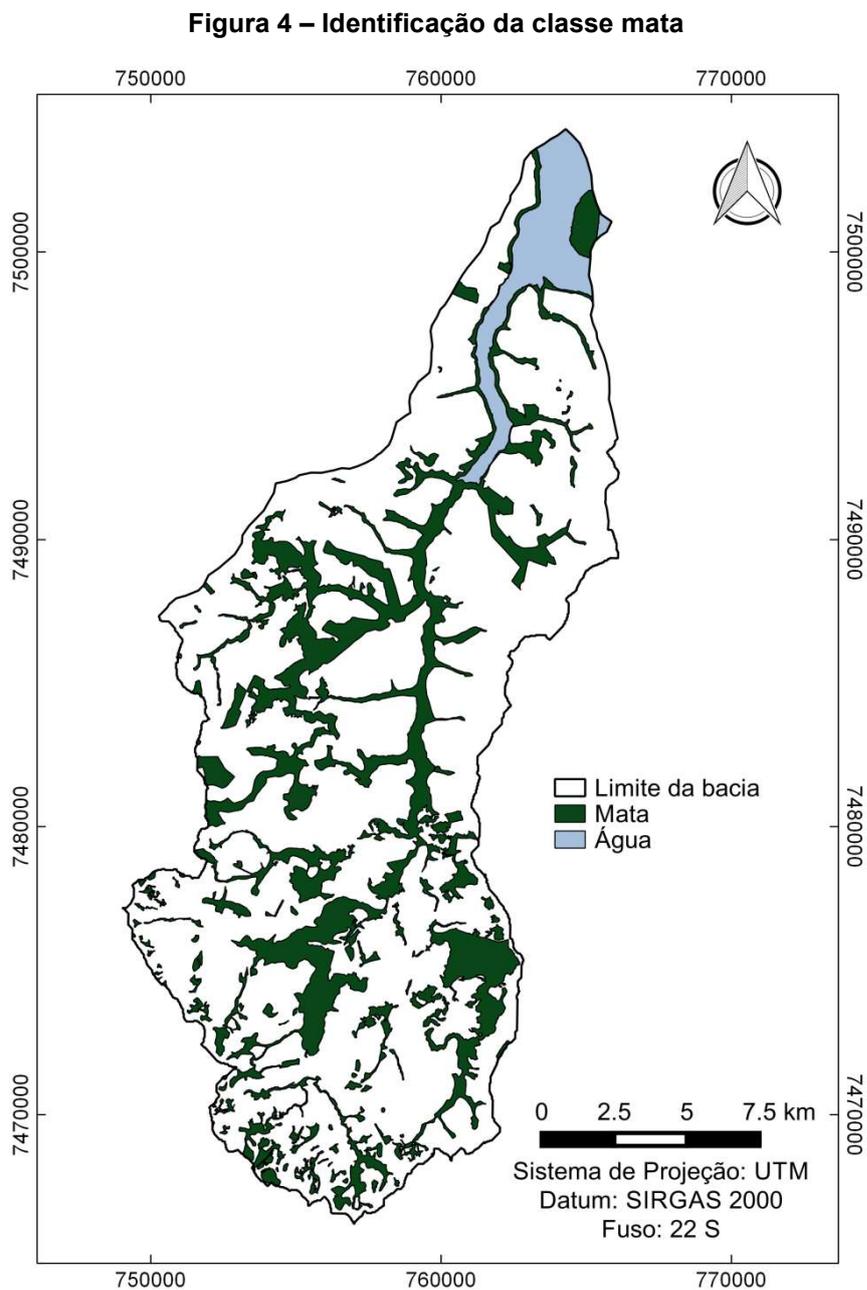
A classe mata representa as matas ciliares, vegetações nativas e/ou áreas de reposição florestal e está concentrada ao longo dos cursos hídricos e em porções fragmentadas da bacia, que apresentam elevada declividade. Essa classe ocupa 71,6 km² da área da bacia hidrográfica.

A classe água ocupa 14 km² e corresponde, predominantemente, à área da represa, já que os rios apresentam a superfície coberta pelas copas das árvores localizadas em suas margens.

4.2 Classificação em tela da vegetação nativa

A classificação em tela da classe mata, que corresponde às áreas de mata ciliar, vegetação nativa e de reposição florestal, permitiu quantificar e localizar pontualmente essa classe (FIGURA 4).

Assim, a área ocupada, na bacia hidrográfica, pela classe mata corresponde a 71,64 km².

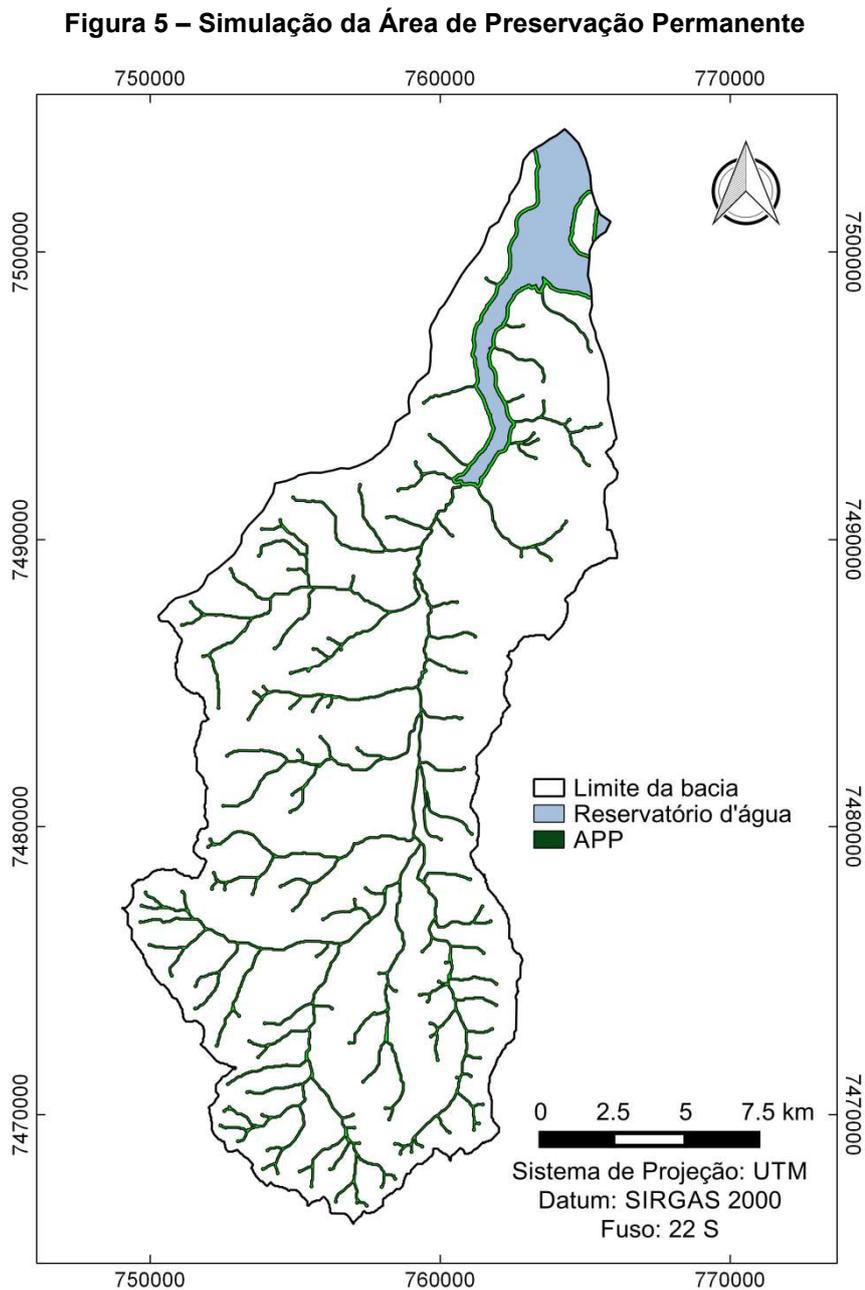


Fonte: Elaboração própria.

4.3 Simulação da Área de Preservação Permanente

A simulação das APP (FIGURA 5), produzida com base na legislação, mostra o espaço que deveria ser identificado com a classe mata, com a ocupação dada por mata ciliar, vegetação nativa ou reposição florestal.

A área de APP, simulada para a região da bacia hidrográfica, corresponde a 19,29 km².

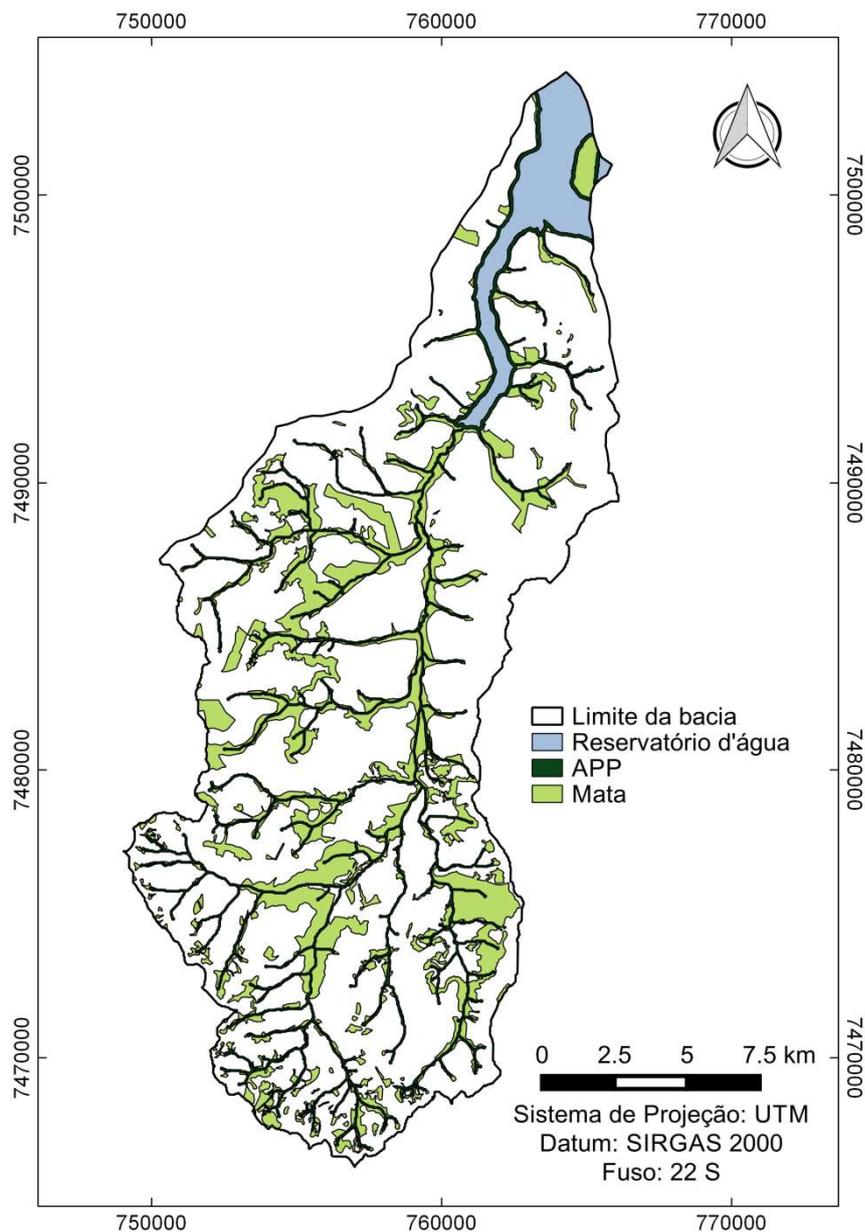


Fonte: Elaboração própria.

4.4 Cruzamento entre a classe mata em tela e a simulação da APP

A Figura 6 apresenta a sobreposição dos vetores de identificação em tela da classe mata (FIGURA 4) e simulação da Área de Preservação Permanente (FIGURA 5). A partir dela é possível verificar o conflito na APP, mas ainda sem as especificações das classes conflitantes, pois o uso e a ocupação da terra não respeitam os limites estabelecidos na legislação, conforme a Lei nº 12.727, de 17 de outubro de 2012.

Figura 6 – Identificação da classe mata em tela e simulação da APP



Fonte: Elaboração própria.

Da área total estabelecida para APP, que é de 19,29 km², são mantidos 12,48 km² (64,7%) de acordo com a legislação e, uma área de 6,81 km² (35,3%) apresenta uso indevido (TABELA 3).

Tabela 3 – Conflito de uso em APP

| Vetores | Área (km²) | Porcentagem (%) |
|-------------------------|------------------------------|------------------------|
| Simulação da APP | 19,29 | 100 |
| APP existente | 12,48 | 64,7 |
| Área em conflito | 6,81 | 35,3 |

Fonte: Elaboração própria.

4.5 Índices Radiométricos

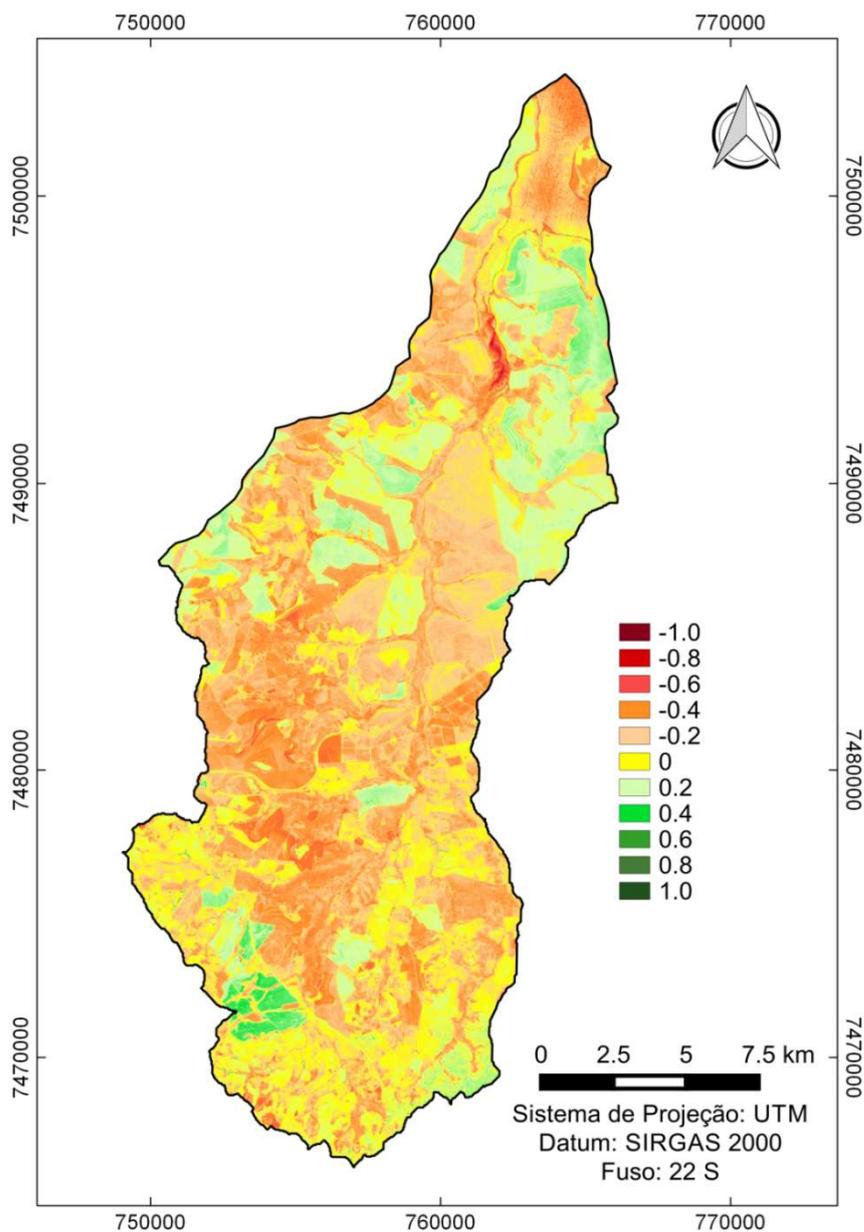
Os mapas dos índices radiométricos apresentam cores e valores das legendas padronizados para todos os índices, assim, em todos ocorre a variação de -1 a 1.

Os índices NDBI e NDWI, presentes em todas as associações realizadas, são utilizados para identificar as áreas impermeabilizadas e os corpos d'água, respectivamente.

Para NDBI (FIGURA 7) os valores mais elevados, ou seja, mais próximos a 1, identificam porções impermeabilizadas. A ocupação pelas infraestruturas urbanas se dá, predominantemente, na região sudeste da bacia hidrográfica e apresenta valores entre 0,2 e 0,6.

Outras regiões apresentam resultados semelhantes, porém correspondem às áreas com solo exposto. Isso ocorre porque, tanto o solo exposto quanto às edificações urbanas apresentam elevado albedo, resultando em respostas espectrais semelhantes.

Figura 7 – NDBI

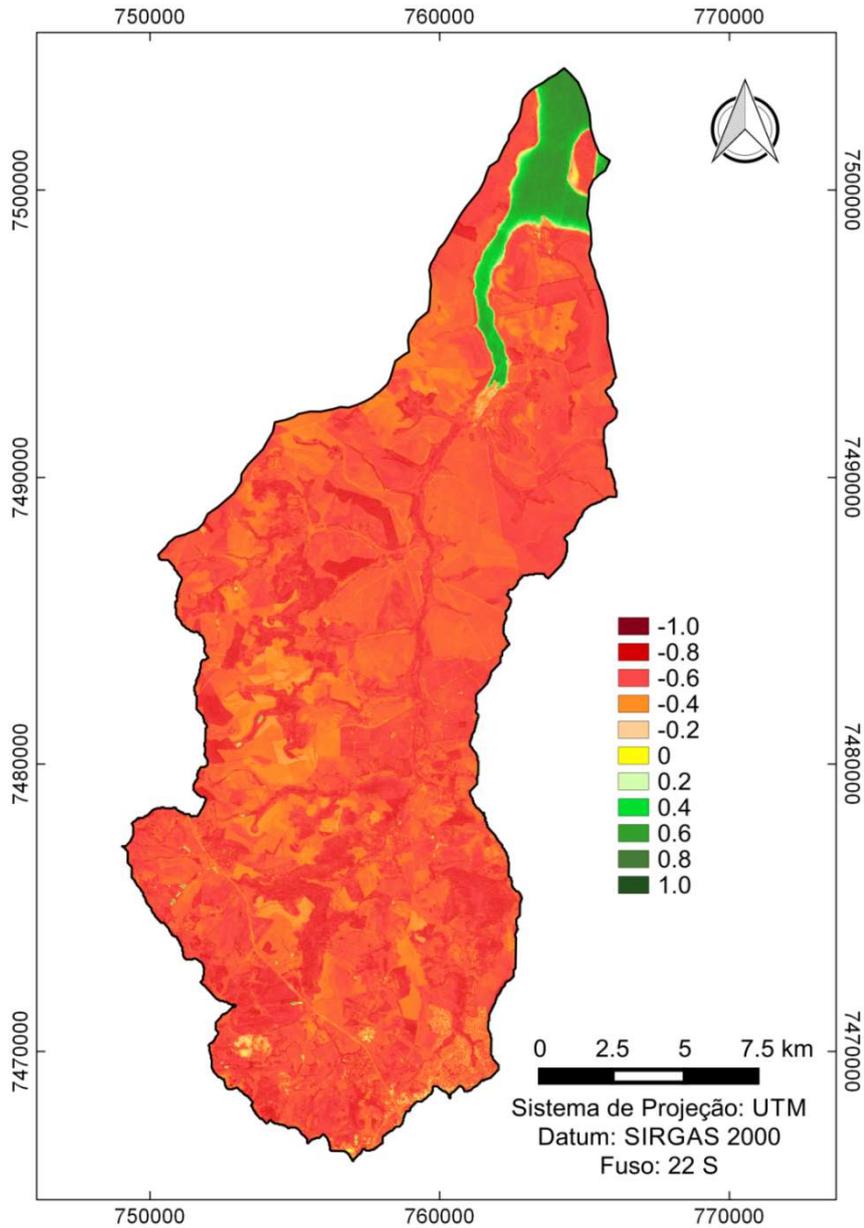


Fonte: Elaboração própria.

No índice NDWI (FIGURA 8), valores próximos de 1 identificam a presença de água, sendo que os sedimentos em suspensão interferem na resposta espectral dos corpos hídricos e, por isso, valores entre 0,2 e 0,8 já correspondem aos corpos d'água.

Devido aos rios apresentarem mata ciliar em suas margens, sua superfície é coberta pelas copas das árvores, impossibilitando a resposta espectral das águas ao longo do percurso dos rios. Por isso, a porção identificada na imagem com valores mais próximos a 1 corresponde, predominantemente, a área da represa.

Figura 8 – NDWI



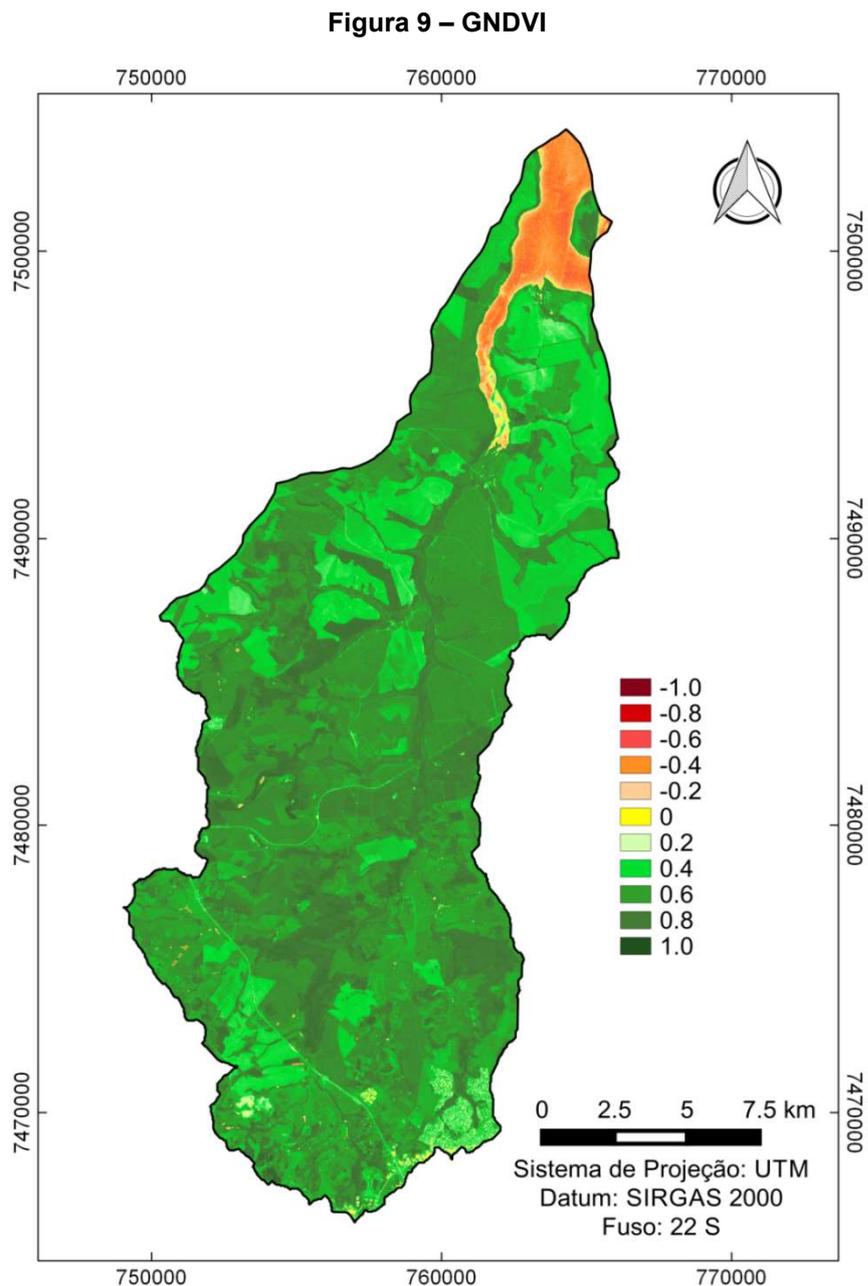
Fonte: Elaboração própria.

Os índices GNDVI (FIGURA 9), NDI45 (FIGURA 10) e NDVI (FIGURA 11) são utilizados com a finalidade de verificar o índice que melhor discrimina as respostas espectrais da vegetação, sendo que os valores mais próximos a 1 identificam áreas que apresentam maior vigor vegetativo.

É importante salientar que os índices de vegetação que apresentam intervalos maiores de variação, na detecção da cobertura vegetal, conseguem discriminar com maior precisão os diferentes usos, já que apresentam valores específicos para cada característica vegetal.

Na Figura 9, é possível verificar que, o índice GNDVI apresenta pequena amplitude na diferenciação das classes vegetativas.

No GNDVI ocorre a variação de 0,4 a 0,8 na identificação das vegetações, o que dificulta a precisão no processo de distinção das classes de usos agrícolas e da classe mata.

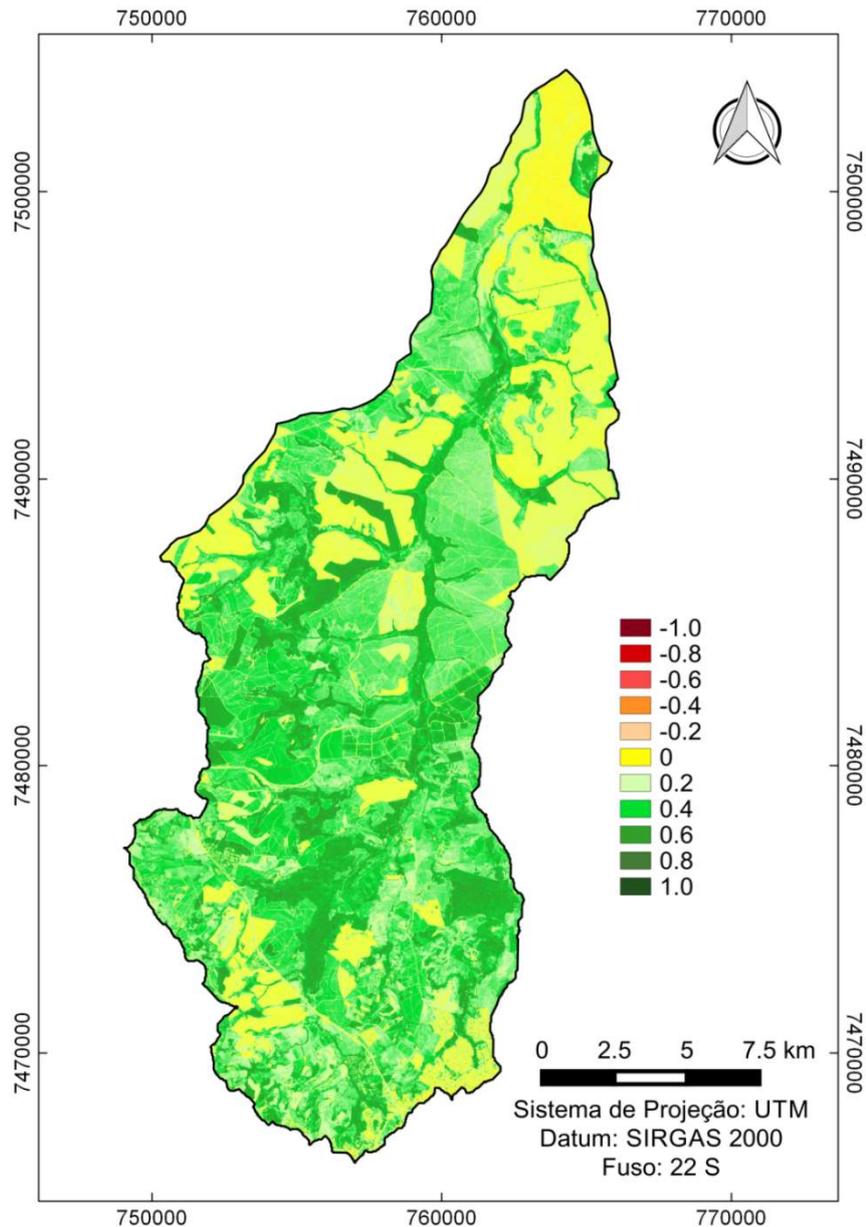


Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 10, nota-se que o índice NDI45 apresenta valores entre 0 e 0,6 para identificação da vegetação.

Essa maior amplitude permite discernir melhor os aspectos vegetativos e, conseqüentemente, possibilita na discriminação entre as áreas cultiváveis.

Figura 10 – NDI45

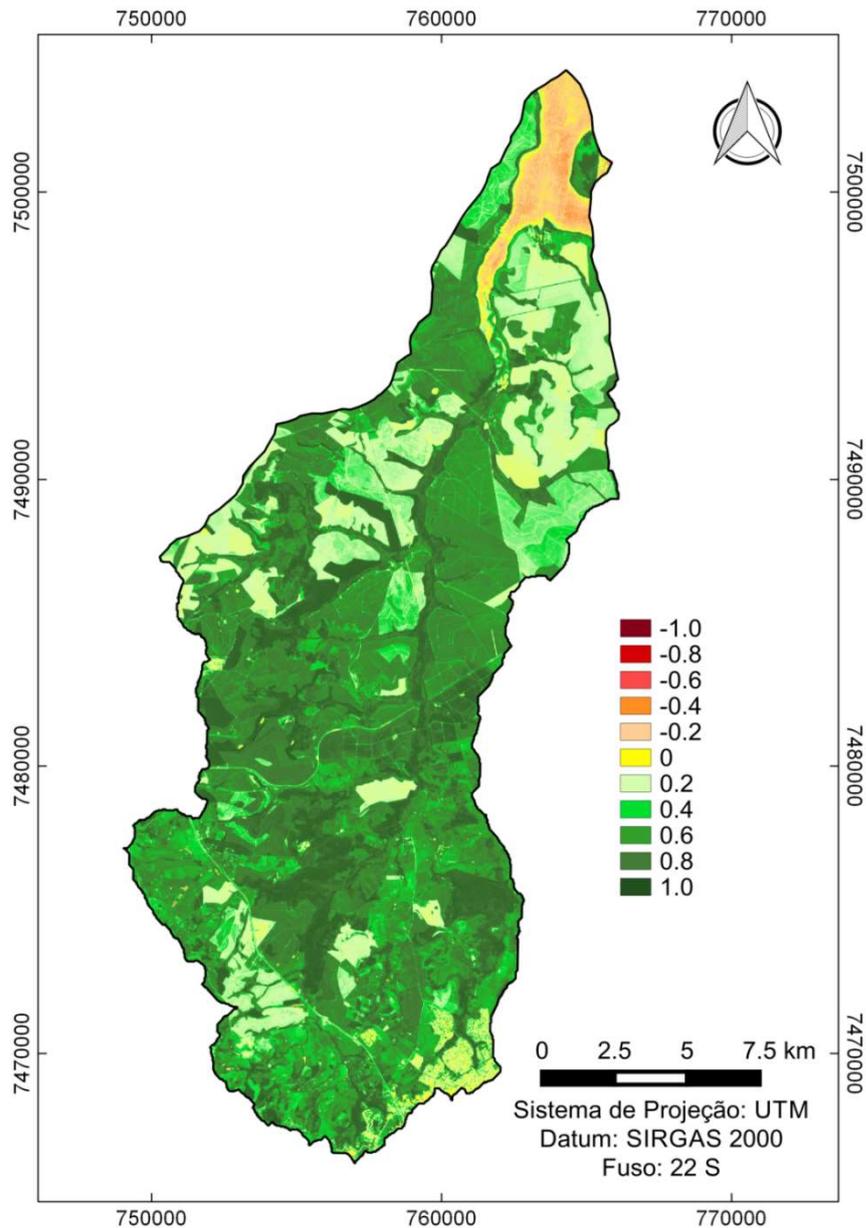


Fonte: Elaboração própria.

O NDVI (FIGURA 11) apresentou a maior amplitude na discriminação na identificação da vegetação, com distribuição entre os valores 0 e 0,8.

Por isso, esse índice apresenta melhor desempenho na discriminação dos alvos vegetativos em relação aos demais índices. Visto que a maior amplitude lhe garante uma maior diferenciação das vegetações imageadas.

Figura 11 – NDVI



Fonte: Elaboração própria.

4.6 Associação de índices radiométricos e classificação

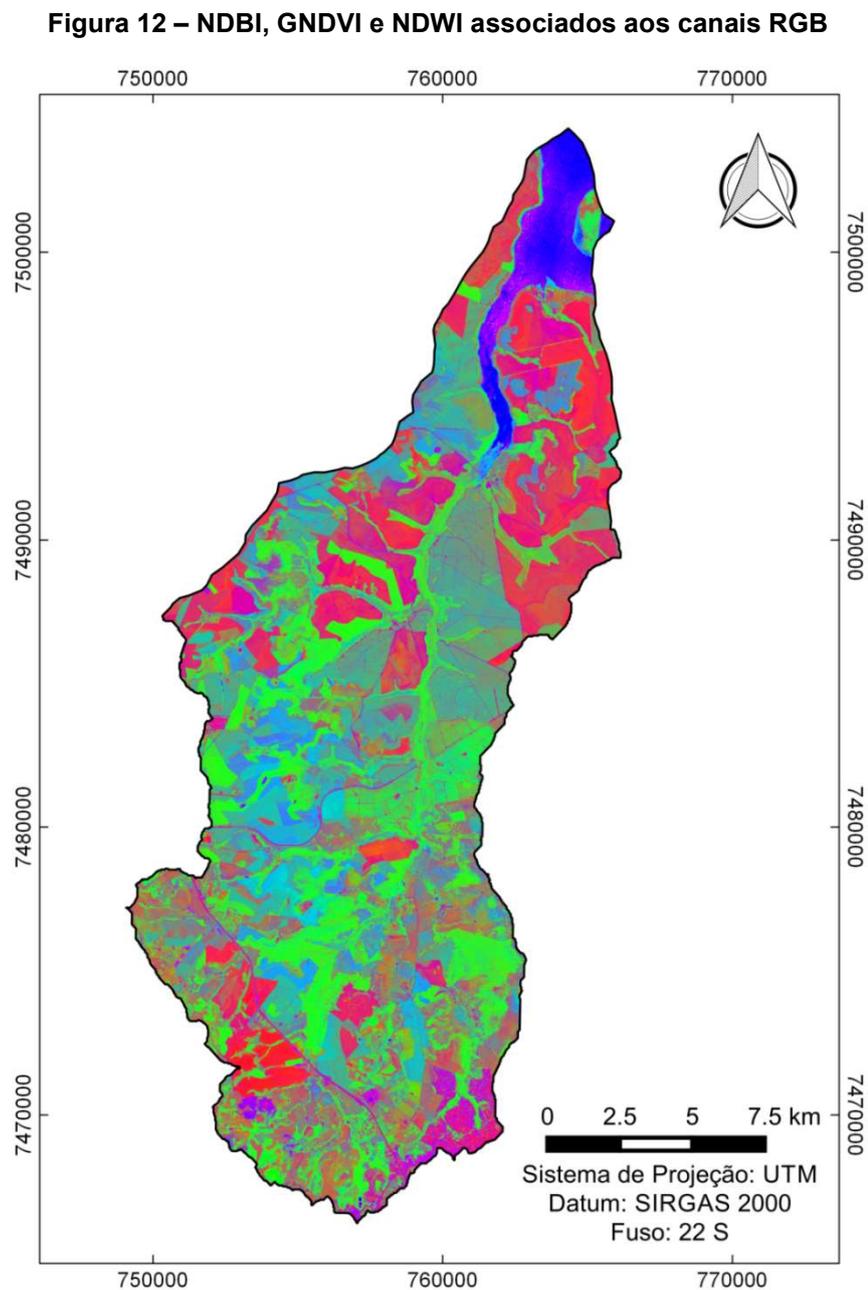
Por meio da associação dos índices aos canais RGB, foram produzidas imagens compostas por três índices cada uma, as imagens NDBI-GNDVI-NDWI, NDBI-NDI45-NDWI e NDBI-NDVI-NDWI.

Nas Figuras 12, 14 e 16, é possível perceber uma diferenciação, mesmo que sutil, das associações em relação à discriminação dos alvos. Mas, só a partir da classificação supervisionada dessas associações, que correspondem as Figuras 13,

14 e 15, respectivamente, é que foi obtida a validação dos dados, por meio da matriz de confusão e do coeficiente Kappa.

Isso porque, numa matriz de confusão, é possível identificar os *pixels* corretamente classificados, na diagonal da matriz, e os *pixels* erroneamente classificados em cada classe. E, por meio da matriz de confusão, é produzido o índice Kappa, que identifica o desempenho das classificações

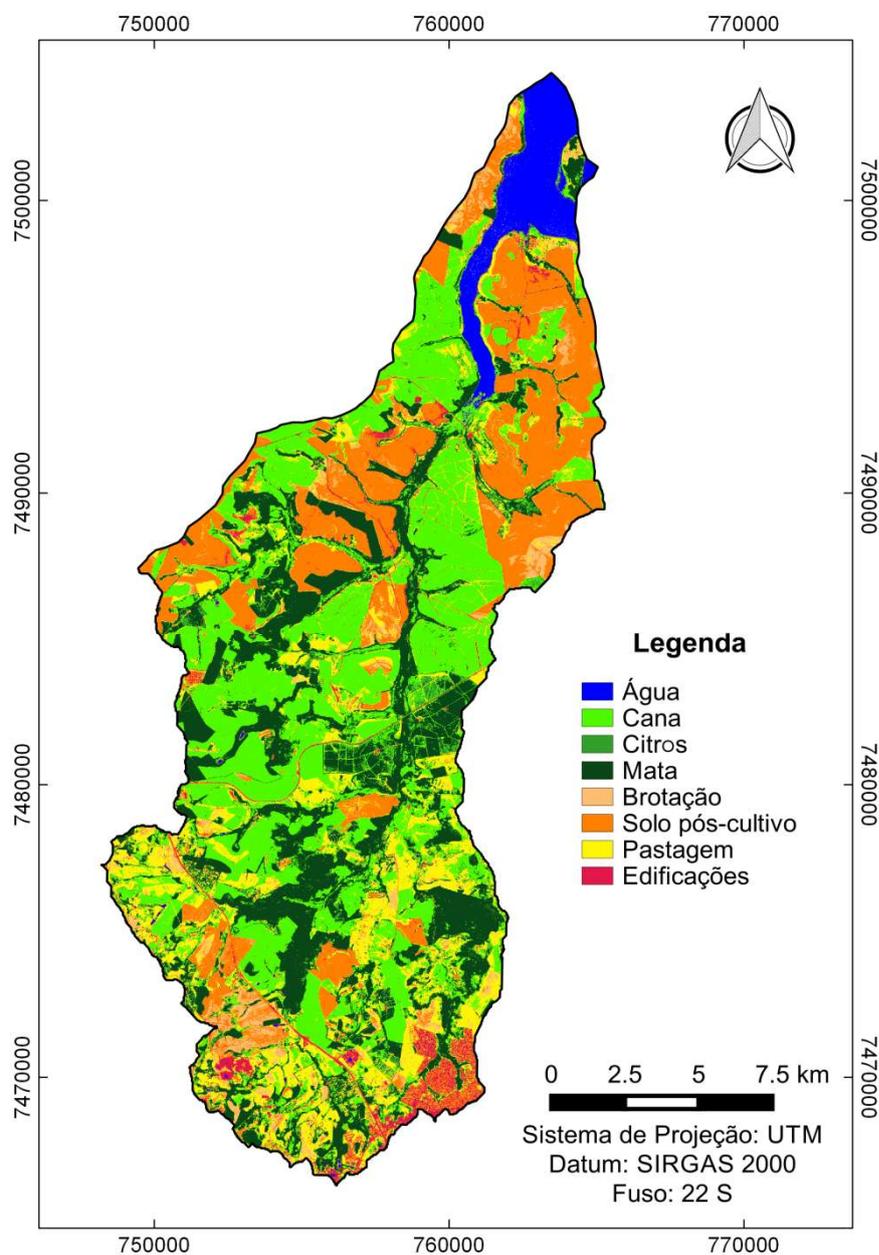
A Figura 12 mostra a associação dos índices NDBI, GNDVI e NDWI.



Fonte: Elaboração própria.

A Figura 13 é obtida por meio da classificação supervisionada da associação entre os índices NDBI, GNDVI e NDWI (FIGURA 12).

Figura 13 – Classificação supervisionada na imagem NDBI-GNDVI-NDWI



Fonte: Elaboração própria.

A Tabela 4 mostra a matriz de confusão gerada a partir da classificação supervisionada, na imagem NDBI-GNDVI-NDWI, em que as classes citros, pastagem, brotação e edificações são as classes que apresentaram o maior percentual de erro, com, respectivamente, 60,9%, 44,7%, 39,6% e 30,5% dos *pixels* classificados erroneamente.

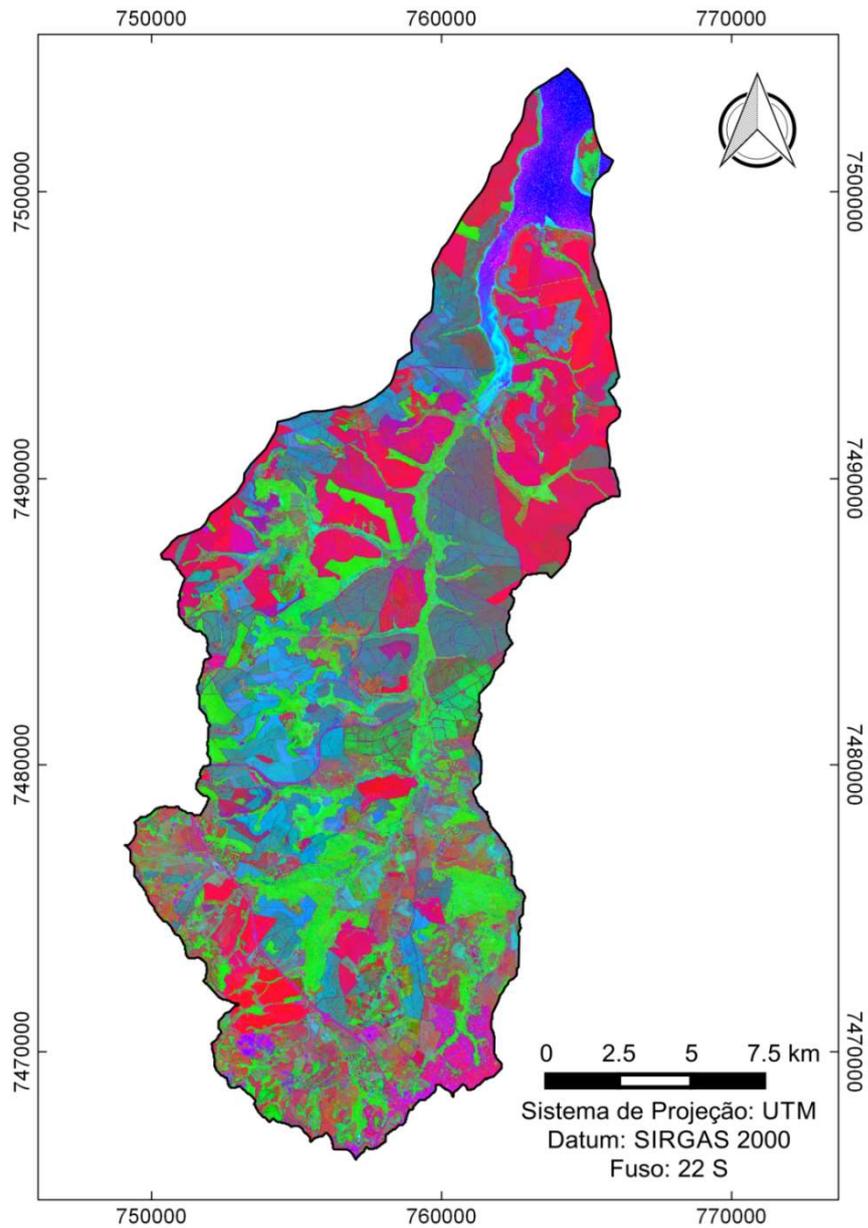
A classe citros foi a que gerou mais ambiguidade espectral, com 46,5% dos *pixels* identificados como mata; seguida pela classe de pastagem, que assimila 20,5% dos *pixels* à classe de cana; a classe brotação que 22,75% dos *pixels* são identificados como solo pós-cultivo; e a classe edificações, com 34,62% dos *pixels* também assimilados na classe solo pós-cultivo.

Tabela 4 – Matriz de confusão gerada a partir da classificação supervisionada na imagem NDBI-GNDVI-NDWI

| Classes | Água | Pasto | Edificações | Solo | Cana | Mata | Citros | Brotação | Total |
|--------------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|-------------|--------------|---------------|
| Água | 58309 | 0 | 336 | 0 | 0 | 680 | 0 | 0 | 59325 |
| Pasto | 18 | 35820 | 930 | 5238 | 13204 | 3668 | 771 | 5142 | 64791 |
| Edificações | 237 | 191 | 12726 | 4406 | 90 | 621 | 15 | 17 | 18303 |
| Solo | 8 | 885 | 9523 | 205819 | 1 | 21 | 0 | 52218 | 268475 |
| Cana | 1013 | 8659 | 116 | 247 | 250693 | 12180 | 5457 | 76 | 278441 |
| Mata | 0 | 114 | 35 | 0 | 1680 | 225578 | 31285 | 0 | 258692 |
| Citros | 0 | 322 | 47 | 1 | 1761 | 6871 | 5781 | 1 | 14784 |
| Brotação | 362 | 4790 | 795 | 8424 | 242 | 45 | 0 | 22374 | 37032 |
| Total | 59947 | 50781 | 24508 | 224135 | 267671 | 249664 | 43309 | 79828 | 999843 |

Fonte: Elaboração própria.

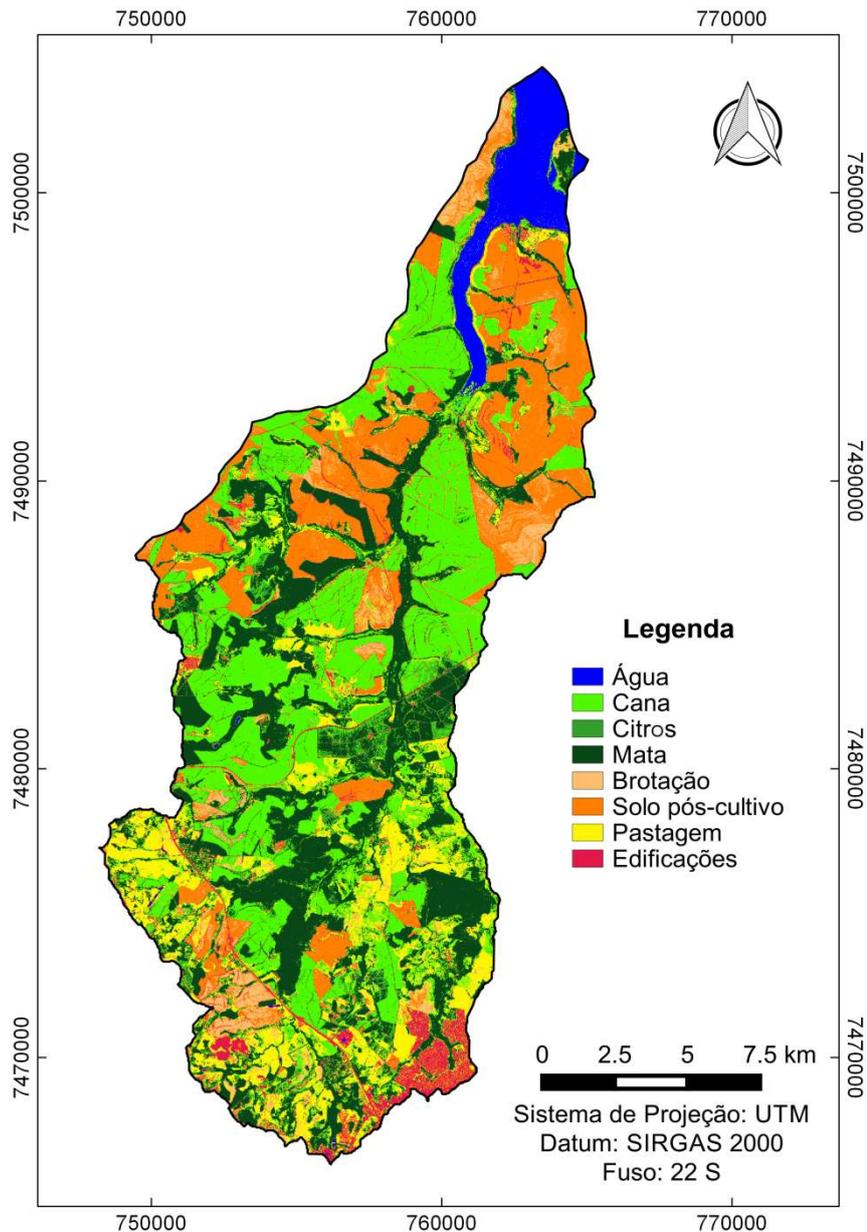
Na Figura 14 é possível visualizar a associação dos índices NDBI, NDI45 e NDWI.

Figura 14 – NDBI, NDI45 e NDWI associados aos canais RGB

Fonte: Elaboração própria.

A Figura 15 apresenta a classificação supervisionada gerada a partir da associação dos índices NDBI, NDI45 e NDWI (FIGURA 14).

Figura 15 – Classificação supervisionada na imagem NDBI-NDI45-NDWI



Fonte: Elaboração própria.

Na Tabela 5, tem-se a matriz de confusão gerada a partir da classificação supervisionada na imagem NDBI-NDI45-NDWI, em que as classes citros, brotação e pastagem apresentaram os mais elevados percentuais de erro. Mas agora com, respectivamente, 39%, e 30,5% e 27,5% dos *pixels* classificados erroneamente.

Novamente a classe citros gerou maior ambiguidade espectral, mas com percentual de erro inferior ao da classificação analisada anteriormente, sendo 34,2% dos *pixels* também identificados como mata; em seguida, tem-se 24,5% dos *pixels* da

classe de brotação identificados como solo pós-colheita; e, na classe pastagem, aproximadamente 20% dos *pixels* foram assimilados pela classe cana.

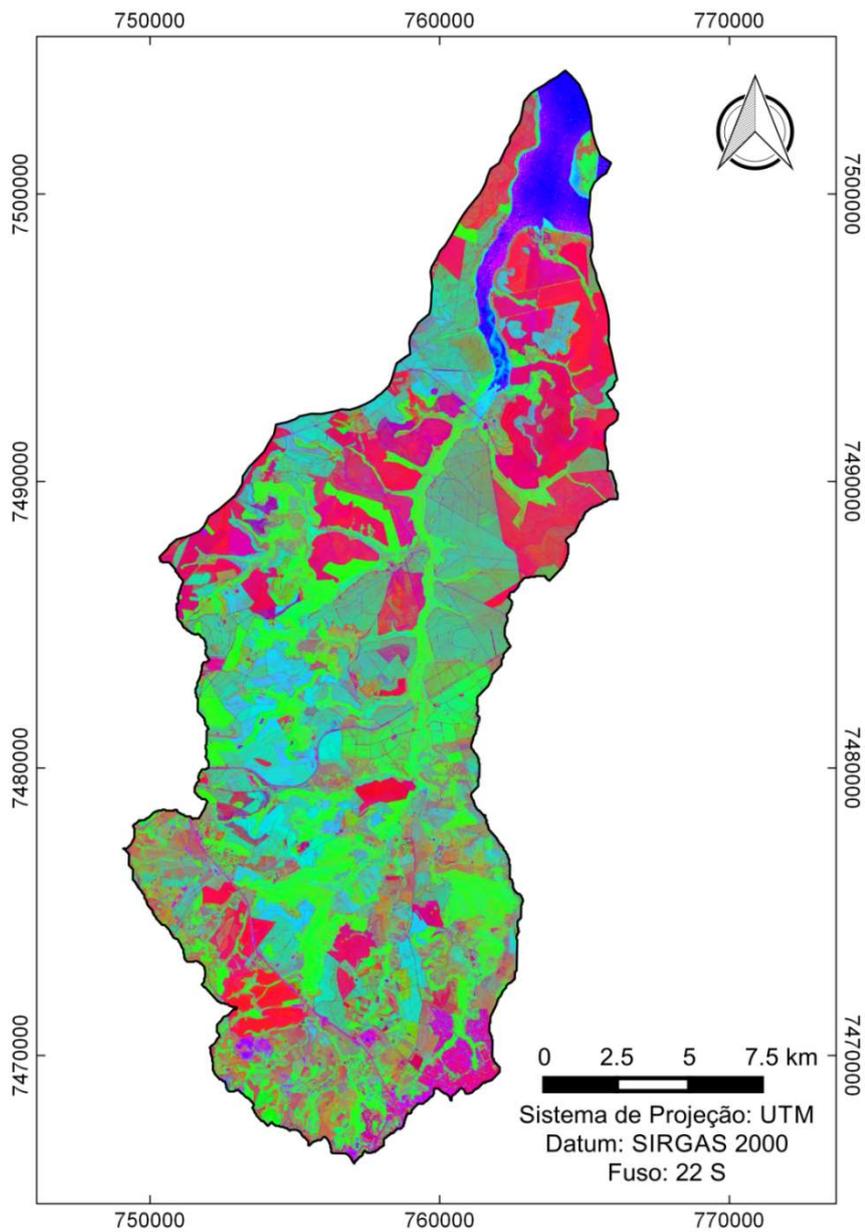
Tabela 5 – Matriz de confusão gerada a partir da classificação supervisionada na imagem NDBI-NDI45-NDWI

| Classes | Água | Pasto | Edificações | Solo | Cana | Mata | Citros | Brotação | Total |
|--------------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|-------------|--------------|---------------|
| Água | 58175 | 0 | 171 | 0 | 0 | 687 | 0 | 0 | 59033 |
| Pasto | 135 | 41818 | 911 | 562 | 8331 | 3481 | 492 | 1912 | 57642 |
| Edificações | 117 | 160 | 17008 | 4034 | 61 | 190 | 5 | 156 | 21731 |
| Solo | 0 | 287 | 5577 | 205525 | 1 | 12 | 0 | 39659 | 251061 |
| Cana | 973 | 5357 | 191 | 745 | 256537 | 6553 | 8029 | 572 | 278957 |
| Mata | 186 | 885 | 86 | 3 | 2236 | 235122 | 28473 | 0 | 266991 |
| Citros | 0 | 153 | 40 | 11 | 272 | 3525 | 6310 | 2 | 10313 |
| Brotação | 361 | 2121 | 524 | 13255 | 233 | 94 | 0 | 37527 | 54115 |
| Total | 59947 | 50781 | 24508 | 224135 | 267671 | 249664 | 43309 | 79828 | 999843 |

Fonte: Elaboração própria.

Devido ao menor percentual de erro, a classificação gerada a partir da imagem NDBI-NDI45-NDWI foi mais eficiente do que a classificação dada na imagem NDBI-GNDVI-NDWI.

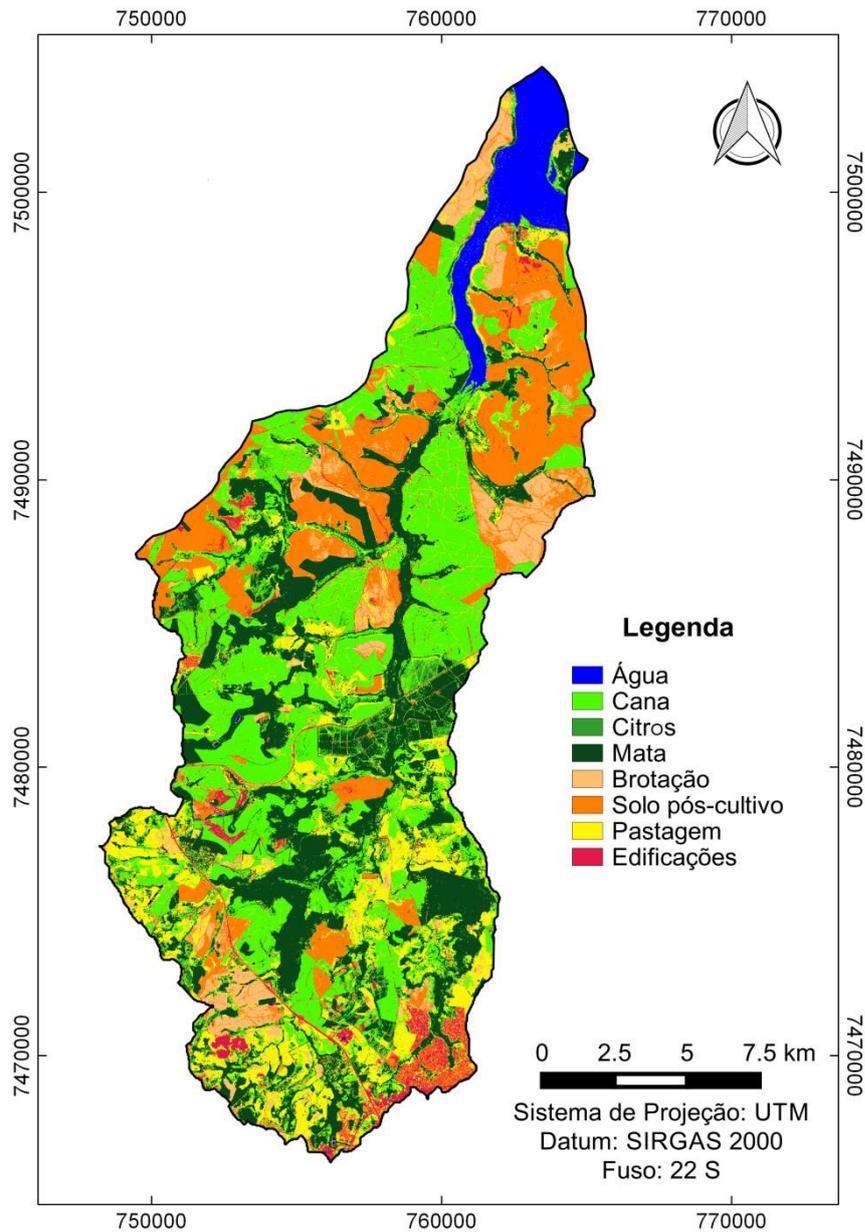
A Figura 16 mostra a imagem obtida pela associação dos índices NDBI, NDVI e NDWI.

Figura 16 – NDBI, NDVI e NDWI associados aos canais RGB

Fonte: Elaboração própria.

A Figura 17 apresenta a classificação supervisionada da imagem NDBI-NDVI-NDWI.

Figura 17 – Classificação supervisionada na imagem NDBI-NDVI-NDWI



Fonte: Elaboração própria.

A matriz de confusão produzida a partir da classificação supervisionada da imagem NDBI-NDVI-NDWI (TABELA 6) apresenta maior quantidade de *pixels* erroneamente classificados nas classes de pastagem (30,4%), edificações (38,5%) e citros (44,5%). Como nas classificações anteriores, a classe citros gerou o maior erro, com 39,4% dos *pixels* identificados como mata; posteriormente, na classe de edificações, 36,1% dos *pixels* foram representados como solo pós-cultivo; e a classe pastagem apresentou 16,6% de *pixels* classificados como cana.

**Tabela 6 – Matriz de confusão gerada a partir da classificação supervisionada na imagem
NDBI-NDVI-NDWI**

| Classes | Água | Pasto | Edificações | Solo | Cana | Mata | Citros | Brotação | Total |
|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|--------------|--------------|---------------|
| Água | 58092 | 0 | 157 | 0 | 0 | 640 | 0 | 0 | 58889 |
| Pasto | 12 | 37865 | 699 | 206 | 9028 | 3190 | 377 | 3031 | 54408 |
| Edificações | 80 | 89 | 12507 | 7336 | 33 | 107 | 3 | 160 | 20315 |
| Solo | 0 | 77 | 9792 | 204816 | 0 | 3 | 0 | 13372 | 228060 |
| Cana | 1322 | 8276 | 230 | 15 | 255487 | 6679 | 4989 | 339 | 277337 |
| Mata | 80 | 750 | 16 | 0 | 2676 | 234560 | 31703 | 0 | 269785 |
| Citros | 0 | 321 | 42 | 0 | 211 | 4421 | 6237 | 0 | 11232 |
| Brotação | 361 | 3403 | 1065 | 11762 | 236 | 64 | 0 | 62926 | 79817 |
| Total | 59947 | 50781 | 24508 | 224135 | 267671 | 249664 | 43309 | 79828 | 999843 |

Fonte: Elaboração própria.

Verifica-se a confusão entre as classes solo pós-colheita, brotação, pastagem e edificações, devido ao fato de os *pixels* correspondentes a essas classes apresentarem padrões semelhantes, pois ocorre a identificação da resposta espectral do solo. O mesmo é constatado nos trabalhos de França (2007) e Rodrigues (2015), que comprovam a confusão durante separação automática dos *pixels*, por meio do processo de classificação supervisionada. Para Lobão, França-Rocha e Silva (2003) a confusão ocorre entre classes que são semelhantes e heterogêneas, tal como as citadas, que apresentam aspectos ásperos e irregularidades de tonalidade.

A confusão se repete com as classes citros e pastagem, que, por apresentarem aspectos vegetativos uniformes, o processo de separação automática dos *pixels* as identifica como mata e cana, respectivamente.

Em relação à classe mata, comparando-se a classificação em tela com as classificações supervisionadas, a área obtida, a partir da identificação em tela (71,64 km²), foi muito semelhante ao valor gerado pelo classificador na imagem em cor verdadeira (71,60 km²). Mas, os valores gerados para a classe mata pelas classificações dadas nas associações de índices, não foram tão semelhantes. Obtendo-se 74 km² em NDBI-NDVI-NDW; 77,6 km² em NDBI-NDI45-NDW e; 68,7 km² em NDBI-GNDVI-NDW. Sendo, dentre as composições com índices radiométricos, a imagem NDBI-NDVI-NDW responsável pela menor variação em relação à classificação em tela, superestimando em menos de 2,5 km² a área de mata.

4.7 Acurácia

Além dos resultados obtidos nas matrizes de confusão, foi realizada a avaliação das classificações geradas a partir de cada imagem, para identificar a validade e a eficiência da metodologia proposta nesta pesquisa. A validação foi determinada pelo coeficiente Kappa e a análise comparativa entre os coeficientes obtidos em cada imagem classificada (TABELA 7).

Tabela 7 – Coeficiente Kappa e desempenho das classificações

| Imagens | Kappa (%) | Desempenho da classificação |
|------------------------|------------------|------------------------------------|
| Cor verdadeira | 79.5 | Muito bom |
| NDBI-GNDVI-NDWI | 77.0 | Muito bom |
| NDBI-NDI45-NDWI | 82.0 | Excelente |
| NDBI-NDVI-NDWI | 84.0 | Excelente |

Fonte: Elaboração própria.

Para a imagem em cor verdadeira e a imagem NDBI-GNDVI-NDWI, obtêm-se respectivamente os valores de 79,5% e 77% para o índice Kappa, identificando o desempenho das classificações como muito bom, segundo Lands e Koch (1977) e Fonseca (2000).

As imagens NDBI-NDI45-NDWI e NDBI-NDVI-NDWI, de acordo com o critério qualitativo apresentado por Fonseca (2000), são identificadas como classificações excelentes, apresentando os coeficientes Kappa de 82% e 84%, respectivamente.

Dentre os resultados obtidos, o maior valor de Kappa (84%) foi obtido a partir da classificação da imagem NDBI-NDVI-NDWI. Ou seja, a classificação foi 84% mais eficiente do que a classificação automática, que é obtida por meio da identificação aleatória dos *pixels*.

Assim, com os resultados da Tabela 5, é possível afirmar que as classificações dadas pelas imagens NDBI-NDI45-NDWI e NDBI-NDVI-NDWI apresentam qualidade superior às classificações dadas em cor verdadeira e NDBI-GNDVI-NDWI.

Isso evidencia o desempenho e a eficiência das duas associações de índices para discriminação dos alvos quando comparado à classificação em imagem RGB.

Porém, o resultado do coeficiente Kappa, obtido para a imagem NDBI-GNDVI-NDWI, revela a importância de uma seleção adequada dos índices radiométricos, para gerar uma associação de índices que apresente alto desempenho de classificação.

A partir das classificações realizadas na imagem em cor verdadeira e nas imagens produzidas pelas composições NDBI-GNDVI-NDWI, NDBI-NDI45-NDWI e NDBI-NDVI-NDWI foi produzida a Tabela 8, que mostra as áreas, em quilômetros quadrado, e a porcentagem ocupada para cada classe de uso da terra em relação à área total da bacia hidrográfica.

Tabela 8 – Área e porcentagem das classes de uso da terra conforme imagens classificadas

| Classes | RGB | | NDBI-GNDVI-NDWI | | NDBI-NDI45-NDWI | | NDBI-NDVI-NDWI | |
|-------------------------|-----------------|--------|-----------------|--------|-----------------|--------|-----------------|--------|
| | km ² | % |
| Água | 14,00 | 4,22 | 14,30 | 4,31 | 14,20 | 4,28 | 14,20 | 4,28 |
| Pastagem | 35,10 | 10,58 | 47,20 | 14,23 | 40,30 | 12,15 | 40,60 | 12,24 |
| Edificações | 6,00 | 1,81 | 11,30 | 3,41 | 16,80 | 5,06 | 13,00 | 3,92 |
| Solo pós-cultivo | 57,30 | 17,27 | 61,80 | 18,63 | 56,10 | 16,91 | 53,30 | 16,06 |
| Cana | 118,60 | 35,74 | 106,00 | 31,95 | 101,30 | 30,53 | 103,60 | 31,22 |
| Mata | 71,60 | 21,58 | 68,70 | 20,71 | 77,60 | 23,39 | 74,00 | 22,30 |
| Citros | 4,90 | 1,48 | 9,80 | 2,95 | 8,90 | 2,68 | 8,90 | 2,68 |
| Brotação | 24,40 | 7,35 | 12,60 | 3,80 | 16,60 | 5,00 | 24,20 | 7,29 |
| Total | 331,80 | 100,00 | 331,80 | 100,00 | 331,80 | 100,00 | 331,8 | 100,00 |

Fonte: Elaboração própria.

As classes cana, mata, solo pós-cultivo, pastagem e água são as que apresentaram menor variação, entre as quatro imagens, na quantidade de *pixels* identificados. E as classes brotação, citros e edificações apresentam variações mais significativas entre as imagens.

Em todas as classificações realizadas, foi unânime a predominância da classe cana, que representa o cultivo de cana-de-açúcar no estágio de maturação, ocupando entre 30,53% e 35,74% da bacia hidrográfica, sendo que a imagem NDBI-NDI45-NDWI foi responsável por gerar o menor percentual e a imagem RGB, o maior percentual. Em seguida, a classe mata ocupa entre 20,71% a 23,39% da área total, em que ocorre o menor percentual na imagem NDBI-GNDVI-NDWI e maior na NDBI-NDI45-NDWI. Posteriormente, o solo pós-cultivo abrange entre 16,06% e 18,63%,

nas classificações geradas pelas imagens NDBI-NDVI-NDWI e NDBI-NDI45-NDWI, respectivamente.

A área de pastagem, a quarta classe de maior representatividade na bacia, ocupa o menor percentual na imagem RGB, com 10,58% da área total, e o maior percentual na imagem NDBI-GNDVI-NDWI, com 14,23%. A porcentagem da classe água é muito aproximada para as quatro classificações, variando entre 4,22% e 4,31%.

Em relação à classe de edificações, é possível notar divergências maiores entre as quatro imagens classificadas, correspondendo a 1,81% na imagem RGB, 3,41% na imagem NDBI-GNDVI-NDWI, 5,06% para a imagem NDBI-NDI45-NDWI e 3,92% para a imagem NDBI-NDVI-NDWI.

Na classe brotação, que representa o plantio de cana-de-açúcar em início de desenvolvimento vegetativo, ocorre variações significativas entre as associações NDBI-GNDVI-NDWI e NDBI-NDI45-NDWI, que apresentam percentuais de 3,8% e 5%, respectivamente, em relação à área total. Porém, para as classificações produzidas a partir das imagens RGB e NDBI-NDVI-NDW, a classe brotação apresenta valores semelhantes, de 7,35% e 7,29%, respectivamente.

Em todas as imagens classificadas, a classe que ocupa a menor porcentagem da bacia é a classe citros, que tem o valor mínimo de 1,48% na imagem RGB e máximo de 2,95%, na imagem NDBI-GNDVI-NDW.

As diferenças mais contrastantes constatadas nas classes edificações, brotação e citros ocorrem por elas apresentarem o padrão semelhante, com nuances e texturas diferenciadas entre um *pixel* e outro, gerando um aspecto áspero. Desta forma, são confundidas pelo classificador com as classes que apresentam respostas espectrais similares e com grande abrangência de *pixels* nas imagens.

A partir das matrizes de confusão é possível verificar a interferência da classe mata na elevação do erro da classe citros. Bem como, a distorção das classes edificações e brotação, devido às assimilações de *pixels* da classe solo pós-cultivo.

Constatado também por Rodrigues (2015), a similaridade espectral entre as classes interferem negativamente e, conseqüentemente, contribuem para o aumento do erro de comissão aos *pixels* predominantes, comprometendo a acurácia da classificação.

4.8 Conflito de uso em APP

Como abordado no início do trabalho, esse estudo, além de propor uma nova metodologia para discriminação de uso da terra, prioriza o uso desse método para a identificação das áreas de mata ciliar, vegetação nativa e reflorestamento florestal, a fim de averiguar a conformidade com a legislação ambiental. Porém, a identificação equivocada da classe mata, para as áreas de cultivos agrícolas, evidencia que o uso das associações não é indicado para monitorar a Área de Preservação Permanente (APP) de regiões amplas.

Na identificação em tela da classe mata, a área de APP que está de acordo com a legislação, corresponde a 12,48 km². Porém, a partir das classificações supervisionadas, também foram gerados valores das áreas das classes de uso na APP (TABELA 9).

Tabela 9 – Quantificação das classes de uso em APP

| Classes | RGB | | NDBI-GNDVI-NDWI | | NDBI-NDI45-NDWI | | NDBI-NDVI-NDWI | |
|-------------------------|-----------------|--------|-----------------|--------|-----------------|--------|-----------------|--------|
| | Km ² | % |
| Água | 0,42 | 2,18 | 0,54 | 2,80 | 0,49 | 2,54 | 0,43 | 2,23 |
| Pastagem | 1,41 | 7,31 | 2,39 | 12,39 | 2,17 | 11,25 | 2,16 | 11,22 |
| Edificações | 0,17 | 0,88 | 0,64 | 3,32 | 0,76 | 3,94 | 0,50 | 2,59 |
| Solo pós-cultivo | 0,83 | 4,30 | 0,88 | 4,56 | 0,79 | 4,10 | 0,76 | 3,94 |
| Cana | 5,79 | 30,02 | 4,97 | 25,76 | 4,01 | 20,79 | 4,57 | 23,69 |
| Mata | 9,64 | 49,97 | 8,72 | 45,20 | 10,13 | 52,51 | 9,60 | 49,76 |
| Citros | 0,51 | 2,64 | 0,92 | 4,77 | 0,65 | 3,37 | 0,81 | 4,20 |
| Brotação | 0,52 | 2,70 | 0,23 | 1,19 | 0,29 | 1,50 | 0,46 | 2,38 |
| Total | 19,29 | 100,00 | 19,29 | 100,00 | 19,29 | 100,00 | 19,29 | 100,00 |

Fonte: Elaboração própria.

A imagem NDBI-NDI45-NDWI é a que apresenta o valor de área da classe mata mais próximo com a classificação em tela (10,13 km²), subestimando em 2,35 km². As classificações dadas nas imagens RGB e NDBI-NDVI-NDWI apresentam valores muito semelhantes, obtendo 9,64 km² e 9,60 km², respectivamente. Verifica-se que, em todas as classificações supervisionadas, ocorre a subestimação dos valores. Mas, a classificação da imagem NDBI-GNDVI-NDWI, foi responsável por gerar o valor mais discordante em relação à classificação em tela (8,72 km²).

A Tabela 10 quantifica o conflito existente na APP.

Tabela 10 – Conflito entre as classes de uso e a APP

| Classes | RGB | | NDBI-GNDVI-NDWI | | NDBI-NDI45-NDWI | | NDBI-NDVI-NDWI | |
|-------------------------|-----------------|--------|-----------------|--------|-----------------|--------|-----------------|--------|
| | Km ² | % |
| Pastagem | 1,41 | 15,28 | 2,39 | 23,83 | 2,17 | 25,03 | 2,16 | 23,33 |
| Edificações | 0,17 | 1,84 | 0,64 | 6,38 | 0,76 | 8,77 | 0,50 | 5,40 |
| Solo pós-cultivo | 0,83 | 8,99 | 0,88 | 8,77 | 0,79 | 9,11 | 0,76 | 8,21 |
| Cana | 5,79 | 62,73 | 4,97 | 49,55 | 4,01 | 46,25 | 4,57 | 49,35 |
| Citros | 0,51 | 5,53 | 0,92 | 9,17 | 0,65 | 7,50 | 0,81 | 8,75 |
| Brotação | 0,52 | 5,63 | 0,23 | 2,29 | 0,29 | 3,34 | 0,46 | 4,97 |
| Total | 9,23 | 100,00 | 10,03 | 100,00 | 8,67 | 100,00 | 9,26 | 100,00 |

Fonte: Elaboração própria.

Em todas as imagens classificadas, o conflito predominante na APP ocorre com a classe cana, ocupando a área de 5,79 km² (62,73%) na classificação supervisionada gerada em RGB; 4,97 km² (49,55%) em NDBI-GNDVI-NDWI; 4,01 km² (46,25%) em NDBI-NDI45-NDWI e; 4,57 km² (49,35%) em NDBI-NDVI-NDWI.

Como, tanto a classe cana quanto a classe brotação, identificam o cultivo de cana-de-açúcar, esse gênero agrícola corresponde a uma área conflitante total de 6,31 km² (68,36%) na classificação realizada em RGB; 5,2 km² (51,84%) em NDBI-GNDVI-NDWI; 4,3 km² (49,59%) em NDBI-NDI45-NDWI e; 5,03 km² (54,32%) em NDBI-NDVI-NDWI.

Nota-se, assim, a ocupação desordenada, principalmente pelas monoculturas de cana-de-açúcar. Conforme apontam Campos e Cleps Junior (2010), a expansão canavieira, ao priorizar o aumento da produção e da produtividade em detrimento aos aspectos ambientais, têm produzido muitos impactos ambientais, tal como a redução das matas ciliares, a erosão e a contaminação do solo e das águas (CAMPOS; CLEPS JUNIOR, 2010).

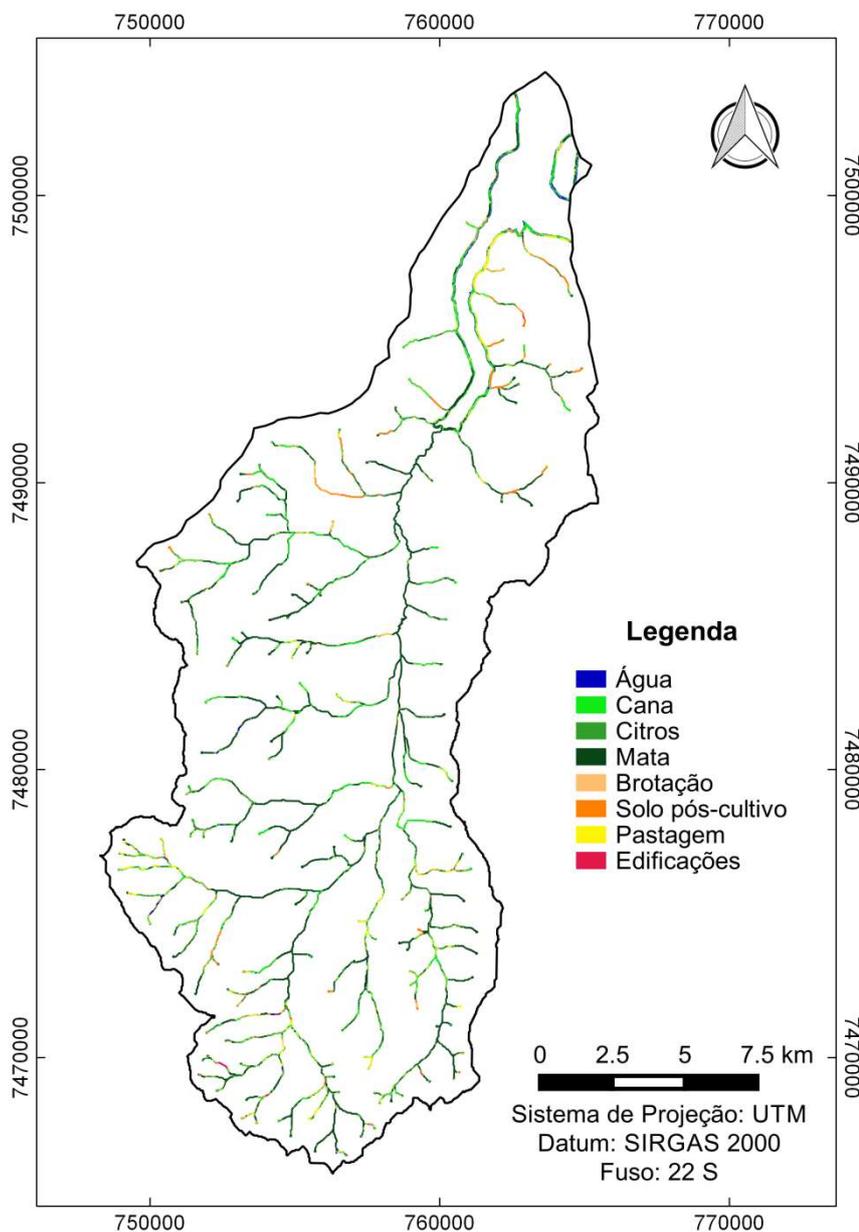
Posteriormente, a pastagem ocupa a segunda maior área conflitante da APP, representando 1,41 km² (15,28%) na classificação dada em RGB; 2,39 (23,83%), em NDBI-GNDVI-NDWI; 2,17 km² (25,03%) em NDBI-NDI45-NDWI e; 2,16 km² (23,33%), em NDBI-NDVI-NDWI.

Do total de conflitos na APP, a classe solo pós-cultivo apresenta valores aproximados para as classificações supervisionadas geradas nas quatro imagens, variando entre 0,76 km² e 0,88 km² (8,21% e 9,11%).

Já as classes citros e edificações apresentam uma variação maior, sendo a classe citros responsável por ocupar de 0,51 km² a 0,92 km² (5,53% a 9,17%) e, as edificações entre 0,17 km² e 0,76 km² (1,84% e 8,77%) da APP.

De modo geral, na área da bacia hidrográfica do rio Araquá predominam atividades agropastoris, que correspondem à agricultura e pecuária. A Figura 18 identifica os usos conflitantes em Áreas de Preservação Permanente, gerados a partir da imagem NDBI-NDVI-NDWI, que apresentou o melhor desempenho na classificação supervisionada.

Figura 18 – Conflito de uso em APP na imagem NDBI-NDVI-NDWI



Fonte: Elaboração própria.

5 CONCLUSÕES

A utilização das imagens do satélite Sentinel-2A e do programa QGIS possibilitaram a identificação eficaz dos aspectos da paisagem, contribuindo para a atualização e produção de informações e dados para a referida área de estudo.

As imagens geradas pelas associações de índices, produzidos por meio da álgebra entre as bandas do satélite Sentinel-2A, foram capazes de promover classificações que variaram de muito bom a excelente.

Foram identificadas oito classes de uso da terra, sendo notória a predominância do cultivo de cana-de-açúcar, muitas vezes desrespeitando o limite estabelecido para as Áreas de Preservação Permanentes, conforme as Leis Florestais.

No processo de classificação ocorre confusão entre as classes que apresentam semelhança espectral, em que a resposta espectral da vegetação é responsável por produzir a confusão entre as classes mata, citros e cana e; a assinatura espectral do solo gera o erro entre as classes solo pós-cultivo, edificações, brotação e pastagem.

A associação entre índices radiométricos contribuiu para discriminar os alvos da superfície terrestre, possibilitando uma classificação de qualidade superior ao da imagem em cor verdadeira. Porém, é importante a seleção adequada desses índices, que devem ser utilizados de acordo com os alvos imageados.

A associação NDBI-NDVI-NDWI foi a mais satisfatória para o estudo realizado, pois apresentou o maior coeficiente Kappa (84%), sendo considerada excelente a classificação dada para essa imagem.

Constatou-se a existência de conflito de uso da terra na área da bacia hidrográfica. Pois, conforme a classificação supervisionada na imagem de melhor desempenho (NDBI-NDVI-NDWI), 48% do espaço determinado na legislação para Áreas de Preservação Ambiental estão em conflito de uso.

Sendo predominante o conflito com atividades agropastoris, com predomínio de monocultura canavieira, que representa 54,3% (5 km²) do total da área conflitante e, posteriormente, a pastagem ocupa 23,3% (2,16 km²) da Área de Preservação Ambiental.

Por isso, há a necessidade de criação de programas para recuperação e proteção dessas áreas, incentivando a proteção de nascentes e de matas ciliares.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, J. R. R.; ROCHA, K. S. Aplicação dos índices de vegetação NDVI, PRI, e CO2flux na caracterização da cobertura vegetativa da área de proteção ambiental Raimundo Irineu Serra. In: VII Simpósio de Geotecnologias no Pantanal, 7, 2018, Mato Grosso do Sul. **Anais...** Mato Grosso do Sul: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2018, p. 985-994.
- ALVARENGA, A. S; MORAES, M. F. Processamento digital de imagens Landsat-8 para obtenção dos índices de vegetação NDVI e SAVI visando a caracterização da cobertura vegetal no município de Nova Lima-MG. **Revista Mundogeo**, 2014.
- ANDREOZZI, S L. **Planejamento e gestão de bacias hidrográficas**: uma abordagem pelos caminhos da sustentabilidade sistêmica. 2005. 151 f. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências, Rio Claro, 2005.
- BELLUTA, I. et al. Investigação da poluição por metais tóxicos no córrego do Cintra. **Irriga**, Botucatu, v.19, n.2, p.225-244, 2014.
- BEZERRA, M. V. C.; SILVA, B. B. da; BEZERRA, B. G. Avaliação dos efeitos atmosféricos no albedo e NDVI obtidos com imagens de satélite. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, n.7, p.709–717, 2011.
- BORGES, R. O. et al. Aplicação do índice da diferença normalizada da água (NDWI) na delimitação de fluxos de sedimentos em suspensão no Rio Araguaia: avaliação das imagens Landsat-8 para monitoramento hidroviário. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 17, 2015, João Pessoa. **Anais...** São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2015, p.6022-6029.
- BOTELHO, R. G. M. Planejamento ambiental em microbacia hidrográfica. In: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S.; BOTELHO, R. G. M. **Erosão e conservação do solo**: conceitos, temas e aplicações. Bertrand Brasil: Rio de Janeiro, 2005, p. 269-297.
- BRASIL. Constituição (1988). **Constituição da República Federativa do Brasil**. Senado Federal, Brasília, 05 out. 1988.
- BRASIL. Lei nº 12.727, de 17 de outubro de 2012. Altera a Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012, que dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; e revoga as Leis nos 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, a Medida Provisória nº 2.166-67, de 24 de agosto de 2001, o item 22 do inciso II do art. 167 da Lei nº 6.015, de 31 de dezembro de 1973, e o § 2º do art. 4º da Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 18 out. 2012. 2012ª, de 25 de maio 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa. Brasília, DF, 2012. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2012/Lei/L12651.htm. Acesso em: 20 jul. 2017.

BRAZ, A. M. **Geotecnologias aplicadas na análise das implicações entre o uso, cobertura e manejo da terra e a qualidade das águas superficiais: bacias hidrográficas dos córregos Lajeado, Amarelo e Ribeirãozinho, Três Lagoas/MS.** 2017. 287f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Três Lagoas, 2017.

BRUNO, L. O. Aplicabilidade de sistemas de Informações Geográficas (SIGs) livres nas ciências ambientais: O uso do QGIS. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 4, n. 8, p. 321-326, 2017.

CAMPOS, N.; CLEPS JUNIOR, J. Expansão canavieira e impactos sócio-espaciais da produção de agrocombustível no Triângulo Mineiro (1980-2012). **Agrária (São Paulo. Online)**, n. 13, p. 80-110, 2010.

CARDOSO, R. S; AMORIM, M. C. C. T. Avaliação dos índices NDVI, NDBI e NDWI como ferramentas ao mapeamento do uso e cobertura da terra. In: Congresso Brasileiro de Geógrafos. 7, 2014, Vitória-ES. **Anais...** Vitória-ES: AGB, 2014.

CEPAGRI (Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura). **Clima dos municípios paulistas** - Botucatu disponível em: https://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima_muni_086.html; São Manuel disponível em: https://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima_muni_563.html. Acesso em: 29 jan. 2018.

CHAGAS, C. S. et al. Utilização de redes neurais artificiais para predição de classes de solo em uma bacia hidrográfica no Domínio de Mar de Morros. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 13, 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007.

CONGALTON, R. G.; GREEN, K. **Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and applications.** Boca Raton, FL: Lewis Publishers, 1999.

COSTA, M. A. T. S.; LIMA, I. S. Desenvolvimento e Educação: das práticas escolares da Educação Ambiental ao desenvolvimento local. **Educação em Foco.** Belo Horizonte, v.21, n. 33, p. 99-119, 2018.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia.** 2 ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda., 1980.

CUNHA, A. R.; MARTINS, D. Classificação climática para os municípios de Botucatu e São Manuel, SP. **Irriga**, Botucatu, v. 14, n. 1, p.1-11, 2009.

DELEGIDO, J. et al. Evaluation of Sentinel-2 red-edge bands for empirical estimation of green LAI and chlorophyll content. **Sensors**, Basileia, Suíça, v. 11, p. 7063-7081, 2011.

DEMARCHI, J. C.; PIROLI, E. L.; ZIMBACK, C. R. L.. Análise temporal do uso do solo e comparação entre os índices de vegetação NDVI e SAVI no município de

Santa Cruz do Rio Pardo-SP usando imagens Landsat-5. **Raega - O Espaço Geográfico em Análise**, v. 21, p. 234-271, 2011.

DIAS, A. de O. et al. Mariana, o maior desastre ambiental do Brasil: uma análise do conflito socioambiental. In: LADWIG, N. I.; SCHWALM, H. **Planejamento e gestão territorial: a sustentabilidade dos ecossistemas urbanos**. Criciúma, 2018.

DU, Y. et al. Water bodies' mapping from Sentinel-2 imagery with Modified Normalized Difference Water Index at 10-m spatial resolution produced by sharpening the SWIR band. **Remote Sensing**, v. 8, 2016.

EMBRAPA. Centro Nacional e Pesquisa em Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: Embrapa-SPI; Rio de Janeiro: Embrapa-Solos, 2006.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional e Pesquisa em Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: Embrapa-Solos, 2013.

ESA. **About Copernicus: Overview**. 2019. Disponível em: <http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Overview3>. Acesso em: 21 fev. 2019.

FAUVEL, M. et al. Fast forward feature selection of hyperspectral images for classification with gaussian mixture models. **Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 8, n. 6, p.2824-2831, 2015.

FEIO, S. V. M. **Análise multitemporal de imagens do satélite Sentinel-2 como suporte à elegibilidade das ajudas comunitárias agrícolas**. 2017. 66f. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Cartográfica, Geofísica e Energia, Universidade de Lisboa, 2017.

FERREIRA, E.; DANTAS, A. A. A.; MORAIS, A. R. Exatidão na classificação de fragmentos de matas em imagem do satélite CBERS-CCD, no Município de Lavras, MG. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13. (SBSR)., 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. p. 887-894.

FERREIRA, J. M. S. et al. Análise Espaço-Temporal da Dinâmica da Vegetação de Caatinga no Município de Petrolina – PE. **Revista Brasileira de Geografia Física**. v. 5, n.4, p. 904-922, 2012.

FITZ, P. R.; VIEIRA, J. C.; SOARES, M. C. O uso de polígonos de amostragem em classificações supervisionadas de imagens de satélite. **Entre-Lugar**, v. 10, n. 19, p. 319-341, 2019.

FLORENZANO, T. G. **Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

FLORENZANO, T. G. **Iniciação em sensoriamento remoto**. 3 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

FONSECA, L. M. G. **Processamento digital de imagens**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2000.

FRANÇA, M. M. **Avaliação de classificações supervisionadas com Redes Neurais artificiais e MAXVER para caracterização do uso da terra no Município de Viçosa-MG**. 2007. 66 f. Trabalho de conclusão (Bacharelado em Geografia) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2007.

FRANÇA, A. F.; TAVARES JUNIOR, J. R.; MOREIRA FILHO, J. C. C. Índices NDVI, NDWI e NDBI como ferramentas do mapeamento temático do entorno da lagoa Olho D'Água em Jaboatão dos Guararapes. In: Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, 4, 2012, Recife. **Anais...** Recife: UFPE, 2012, p.1-9.

GAO, B. C. NDWI – A Normalized Difference Water Index for remote sensing of vegetation liquid water from space. **Remote Sensing of Environment**, v. 58, p.257-266, 1996.

GARCIA, Y. M. **Conflitos de uso do solo em APPs na bacia hidrográfica do córrego Barra Seca (Pederneiras/SP) em função da legislação ambiental**. 2014. 126 p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2014.

GARCIA, Y. M. O código florestal brasileiro e suas alterações no congresso nacional. **Revista Geografia em Atos**, Presidente Prudente, v.1, n. 12, p. 54-74, 2012.

GARCIA, Y. M. et al. A Legislação Ambiental Aplicada nas Áreas de Preservação Permanente da Microbacia do Ribeirão Duas Águas – Botucatu (SP). **Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista**, v. 9, n. 2, 2013.

GITELSON, A. A.; KAUFMAN, Y. J.; MERZLYAK, M. N. Use of a Green Channel in Remote Sensing of Global Vegetation from EOS-MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 58, n. 3, p. 289–298, 1996.

GHOSH, P. et al. Assessing crop monitoring potential of Sentinel-2 in a spatio-temporal scale. In: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 42, 2018. Dehradun, Índia: 2018.

GONÇALVES, T. M; ALISTE, E. **Para analisar conflitos socioambientais**. Santiago, Chile: UCHILE, 2016.

GONG, P.; HOWARTH, P. J. An assessment of some factors influencing multispectral land-cover classification. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**. v. 56, n. 5, p. 597-603, 1990

GUERRA, A. J .T.; CUNHA, S. B. **Geomorfologia e meio ambiente**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2008.

GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. Bacias hidrográficas. In: CUNHA, S. B.; GUERRA, A. J. T. **Geomorfologia do Brasil**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1998.

GUERRA, A. T.; GUERRA, A. J. T. **Novo dicionário geológico-geomorfológico**. 6. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2008.

HATFIELD, J. L.; SCHEPERS, J. S. Application of Spectral Remote Sensing for Agronomic Decisions Application of Spectral Remote Sensing. **Agronomy Journal**, v. 100, n. 3, p. 117-131, 2008.

HUETE, A. R. A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, v. 25, n. 3, p. 205-309, 1988.

IMMITZER, M.; VUOLO, F.; ATZBERGER, C. First Experience with Sentinel-2 Data for Crop and Tree Species Classifications in Central Europe. **Remote Sensing of Environment**, v. 8, n. 3, 2016.

JENSEN, J. R. **Introductory Digital Image Processing**. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1986.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. São José dos Campos: Parêntese, 2009.

LANDIS, J.R.; KOCH, G.G. The measurement of observer agreement for categorical data. **Biometrics**, v.33, n.1, p.159-174, 1977.

LEAL, A. C. **Meio ambiente e urbanização na microbacia do Areia Branca - Campinas/SP**. 1995. 154 p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Geociências, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1995.

LEPSCH, I. F. et al. **Manual para levantamento utilitário do meio físico e classificação de terras no sistema de capacidade de uso**. 5. ed. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1991.

LIMA, G. F. C. Educação ambiental crítica: do socioambientalismo às sociedades sustentáveis. **Educação e Pesquisa**, São Paulo, v. 35, n. 1, p. 145-163, 2009.

LOBÃO, J. S. B.; FRANÇA-ROCHA, W. J. S.; SILVA, A. B. O uso de imagens de satélite na delimitação de alvos urbanos e não-urbanos em Feira de Santana-BA. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 11, 2003, Belo Horizonte. **Anais...** São José dos campos: INPE, 2003. p. 1099-1106.

LOBATO, R. B. et al. Índice de Vegetação por Diferença Normalizada para análise da redução da Mata Atlântica na região costeira do distrito de Tamoios Cabo Frio - RJ. **Caderno de Estudos Geoambientais**, v. 1, n.1, p.14-22, 2010.

LUPPI, A. S. L. et al. Utilização de Geotecnologias para Mapeamento de Áreas de Preservação Permanente no município de João Neiva, ES. **Floresta e Ambiente**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 1, p.13-22, 2015.

MACEDO, R. R.; MENDES, R. L. R.; COSTA, T. Sistema de Informação Geográfica (SIG) aplicado a gestão de recursos naturais. **Atlas do Aproveitamento de Água da Chuva nas Ilhas de Belém – Iniciativas, demandas e potencialidades**. Rio de Janeiro: Geo UERJ, n. 32, jun. 2018.

MACHADO, H. B. **Curso de Direito Tributário**. 20 ed. São Paulo: Malheiros, 2002.

MACHADO, I. S. J. **Análise do potencial de dados Sentinel-2 na classificação da ocupação do solo no controlo de subsídios agrícolas**. Lisboa: ISA, 2018.

MAJASALMI, T.; RAUTIAINEN, M. The potential of Sentinel-2 data for estimating biophysical variables in a boreal forest: a simulation study. **Remote Sensing Letters**, v. 7, n. 5, p. 427-436, 2016.

MARCUSSI, A. B. et al. Utilização de índices de vegetação para os sistemas de informação geográfica. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 11, n. 35, p.41-53, 2010.

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

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. Universidade de Brasília: Brasília, 2012.

MORAES, M. E. B.; LORANDI, R. **Métodos e técnicas de pesquisa em bacias hidrográficas**. Ilhéus: Editus, 2016.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2001.

MOREIRA FILHO, J. C. C.; TAVARES JUNIOR, J. R. Avaliação da precisão temática de composições de NDBI, NDVI e NDWI. **Revista Brasileira de Geomática**, Paraná, v.4, n.1, p. 3-14, 2016.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. São Paulo: Blucher, 2008.

OLIVEIRA, P. J. D. et al. Uso do SIG na caracterização dos parâmetros morfométricos na bacia hidrográfica do Ribeirão Araquá, Botucatu (SP). In: Simpósio Internacional de Águas, Solos e Geotecnologias, 1, 2015, Uberaba-MG. **Anais eletrônicos...** Uberaba: Universidade Federal do Triângulo Mineiro, 2015.

OLIVEIRA, L. M. M. et al. Análise quantitativa de parâmetros biofísicos de bacia hidrográfica obtidos por sensoriamento remoto. **Revista Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 9, p.1209-1217, set., 2012.

OLIVEIRA, P. C. R. **Comunidade de macroinvertebrados bentônicos e qualidade da água e do sedimento das bacias hidrográficas dos Rios Lavapés, Capivara,**

Araquá e Pardo, município de Botucatu (SP) e região. 2009. 202 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas/Zoologia) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2009.

OLIVEIRA, T. H. et al. Avaliação da Cobertura Vegetal e do Albedo da Bacia Hidrográfica do Rio Moxotó com Imagens do Satélite Landsat-5. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 14, 2009. **Anais...** Natal: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2009, p. 2865-2872.

PELUZIO, T. M. O. et al. Comparação fotointerpretativa entre aerofoto e imagem de satélite. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.23, n.2, p. 537-544, 2013.

PENHA, T. V. P. et. al. Detecção e delimitação automática de corpos hídricos em imagens Sentinel-2: uma proposta de integração do algoritmo Fmask aos índices espectrais NDWI e MNDWI. In: GeolInfo, 18, 2017. **Anais eletrônicos...** Salvador: INPE, 2017, p. 340-345.

PIROLI, E. L. **Geoprocessamento na determinação da capacidade e avaliação do uso da terra do município de Botucatu - SP.** 2002.108 f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2002.

PORTO, M. F. A.; PORTO, R. L. L. Gestão de bacias hidrográficas. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 22, n. 63, p. 43-60, 2008.

POLLO, R. A. et al. A.Caracterização morfométrica da microbacia do Ribeirão Água da Lucia, Botucatu-SP. **Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias**, Guarapuava, v. 5, n. 1, 2012.

QUINTO, V. M. et al. Análise temporal da dinâmica florestal por meio de índices de vegetação em uma área reflorestada no sul do estado do Espírito Santo. In: SANTOS, A. R. et al. **Geotecnologias aplicadas aos recursos florestais.** Alegre: Caufes, v.1, p. 83-98, 2012.

RAFAEL, R. A. **Relação entre ilhas de calor urbano e mudanças no uso da terra: um estudo de caso para Manaus-AM.** 2014. 60 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2014.

RODRIGUES, M. T. **Comportamento de Sistemas de Informações Geográficas por meio de Classificação Supervisionada em Diferentes Bacias Hidrográficas.** 2015. 101 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2015.

RODRIGUES, T. S. **Avaliação de índices de vegetação em imagens orbitais.** 2013. 109 f. Dissertação (Mestrado em Computação para Tecnologias em Agricultura) - Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2013.

RODRIGUES, T. S.; RIBEIRO, S. R. A.; VAZ, M. S. M. G. Avaliação do desempenho de dois Índices de Vegetação (NDVI e SAVI) por meio de Índice de Qualidade de

Imagens. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 16, 2013. **Anais...** São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2013.

ROSS, J. L. S.; DEL PRETTE, M. E. Recursos hídricos e as bacias hidrográficas: âncoras do planejamento e gestão ambiental. **Revista do Departamento de Geografia**, n. 12, p. 89-121, 1998.

ROUSE, J.W. et al. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: ERTS Symposium, 3, 1973. **Anais eletrônicos...** Washington: NASA, 1973.

SANTOS, J. B. **Geotecnologias na delimitação de áreas prioritárias à recomposição florestal na sub-bacia do ribeirão Lavapés, Botucatu-SP**. 2013. 83 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2013.

SANTOS, L. B. **Florística vascular da Mata da Pavuna, Botucatu, SP**. 2011. 57 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Biociências, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2011.

SANTOS, O. C. O. **Análise do uso do solo e dos recursos hídricos na microbacia do igarapé Apeú, nordeste do estado do Pará**. 2006. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

SANTOS, R. F. **Planejamento Ambiental: teoria e prática**. São Paulo: Oficina de Textos, 2004.

SCHMIEGUEL, C. Conceito de lei em sentido jurídico. **Ágora**, Vitória-ES, v. 17, n. 1, p.128-134, 2010.

SERRA, P.; PONS, X. Monitoring farmer's decisions on Mediterranean irrigated crops using satellite image time series. **International Journal of Remote Sensing**, v.29, p. 2293- 2316, 2008.

SILVA, F. M.; COSTA JUNIOR, N. P.; LIMA, Z. M. C. Avaliação microclimática de Natal/RN através de técnicas de sensoriamento remoto: uma contribuição aos estudos do clima urbano. **Sociedade e Território**, Natal, v. 26, n. 2, p.163-180, 2014.

SILVA, J. A. A. et al. **O Código Florestal e a Ciência: contribuições para o diálogo**. São Paulo: Sociedade Brasileira para o Progresso para o diálogo. SBPC; Academia Brasileira de Ciências, ABC, 2011.

SILVA, R. F. B. **Planejamento do uso do solo em um abacia hidrográfica para conservação dos recursos hídricos**. 2011. 100 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade estadual Paulista, Botucatu, 2011.

SIRVINSKAS, L. P. **Manual de direito ambiental**. 16. ed. São Paulo: Saraiva, 2018.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4ed. Porto alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012.

VALERA, C. A. Legislação ambiental e o manejo de bacias hidrográficas. In: RODRIGUES, V. A. et al. **Microbacias Hidrográficas: estudos e pesquisas** apresentados no 5º Simpósio Internacional. Botucatu: Fundação de Estudos e Pesquisas Agrícolas e Florestais, 2017.

XU, H. Modification of Normalized Difference Water Index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. **International Journal of Remote Sensing**, v. 27, n. 14, 3025–3033, 2006.

ZANATA, J. M. Mudanças no uso e cobertura da terra na bacia hidrográfica do Ribeirão Bonito, municípios de Avaré e Itatinga-SP. 2014. 111 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2014.

ZHA, Y.; GAO, J.; NI, S. Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from tm imagery. In: **International Journal of Remote Sensing**, v. 24, n. 3, p. 583–594, 2003.

ZHAO, H. M., CHEN, X. L. Use of normalized difference bareness index in quickly mapping bare areas from TM/ETM+. In: **Geoscience and Remote Sensing Symposium**, v.3, 1666–1668, 2005.

ZIEGLER, J. **Destrução em massa: geopolítica da fome**. São Paulo: Cortez, 2013.

ZIMBACK, C. R. L. A geologia do município de Botucatu. In: SILVA, R. F. B.; CHINELATO, F. C. S.; ORSI, A. C. **Lavapés, Água e Vida: nos caminhos da Educação Ambiental**. Botucatu: SABEP, p. 63-78, 2008.