



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA - UnB**  
**Instituto de Ciências Humanas - IH**  
**Departamento de Geografia – GEA**  
**Programa de Pós-Graduação em Geografia - POSGEA**

**ANÁLISE MULTITEMPORAL DE VEGETAÇÃO EM ECOSISTEMAS  
DE ÁREAS ÚMIDAS UTILIZANDO SÉRIES TEMPORAIS DERIVADAS  
DO SENSOR MODIS NA ILHA DO BANANAL - TOCANTINS**

**Dissertação de Mestrado**

**Autor:** José Roberto Gonçalves de Rezende Filho

**Orientador:** Dr. Osmar Abílio de Carvalho Júnior

**Brasília**  
**2017**



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA - UnB  
Instituto de Ciências Humanas - IH  
Departamento de Geografia – GEA  
Programa de Pós-Graduação em Geografia - POSGEA

**ANÁLISE MULTITEMPORAL DE VEGETAÇÃO EM ECOSISTEMAS  
DE ÁREAS ÚMIDAS UTILIZANDO SÉRIES TEMPORAIS DERIVADAS  
DO SENSOR MODIS NA ILHA DO BANANAL - TOCANTINS**

**José Roberto Gonçalves de Rezende Filho**

Dissertação de Mestrado submetida ao Departamento de Geografia da Universidade de Brasília, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Grau de Mestre em Geografia, área de concentração Gestão Ambiental e Territorial, Linha de Pesquisa em Geoprocessamento.

Banca examinadora constituída por:

Prof. Dr. Osmar Abílio de Carvalho Júnior  
Orientador

Prof. Dr. Renato Fontes Guimarães

Dr. Fernando Campagnoli  
Examinador Externo

## Sumário

Lista de Figuras.....	4
Lista de Tabelas.....	5
Lista de Siglas.....	6
Resumo.....	8
Abstract.....	9
1 INTRODUÇÃO.....	10
2 ÁREA DE ESTUDO.....	17
3 METODOLOGIA.....	25
3.1 Sensor MODIS.....	27
3.2 Tratamento de Ruído.....	32
3.2.1 Métodos de Filtragem.....	32
3.2.2 Filtragem dos ruídos de impulso.....	34
3.3 Hipercubo Espectro-Temporal.....	35
3.4 Classificação e Teste de Acurácia.....	38
4 RESULTADOS.....	42
4.1 Resultados do tratamento de ruído.....	42
4.2 Classificação e Teste de Acurácia.....	46
4.2.1 Bibliotecas Espectrais.....	47
4.2.2 Teste de Acurácia.....	49
4.2.3 Análise Multitemporal.....	58
4.2.3.1 Análise multitemporal mensal do alagamento.....	58
4.2.3.2 Análise multitemporal anual do alagamento.....	60
4.2.3.3 Análise multitemporal anual do uso da terra.....	61
4.2.4 Consolidação da análise.....	63
5 CONCLUSÃO.....	65
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	68

## Lista de Figuras

Figura 1 – Mapa de contextualização.....	18
Figura 2 – Mapa de situação.....	20
Figura 3 – Plano de Manejo (vegetação) (MMA, 2001).....	21
Figura 4 – Fluxograma da Metodologia.....	26
Figura 5 – Cenas adquiridas do sensor MODIS.....	29
Figura 6 – Cubo Temporal.....	30
Figura 7 – Perfil do espectro temporal original.....	31
Figura 8 – Delimitação da área de estudo.....	31
Figura 9 – Funcionamento do Filtro de Mediana.....	35
Figura 10 – Polítopos do Hipercubo: 2D (quadrado), 3D (cubo) e 4D (tesseracto).....	36
Figura 11 – Vértices do Hipercubo.....	37
Figura 12 – Hipercubo Espectro-Temporal.....	37
Figura 13 – Resultado do Filtro de Mediana na banda 1.....	42
Figura 14 – Resultado do Filtro de Mediana na banda 2.....	43
Figura 15 – Resultado do Filtro de Mediana na banda 3.....	43
Figura 16 – Resultado do Filtro de Mediana na banda 4.....	44
Figura 17 – Resultado do Filtro de Mediana na banda 5.....	44
Figura 18 – Resultado do Filtro de Mediana na banda 6.....	45
Figura 19 – Resultado do Filtro de Mediana na banda 7.....	45
Figura 20 – Biblioteca espectral para o mapeamento da dinâmica de alagamento.....	47
Figura 21 – Biblioteca espectral para o mapeamento do uso da terra.....	48
Figura 22 – Teste de acurácia para o mapeamento de áreas alagadas. (A) Resultado da classificação; e (B) imagem de referência.....	50
Figura 23 – Análise do teste de acurácia para o mapeamento de áreas alagáveis.....	52
Figura 24 – Teste de acurácia para o mapeamento de uso da terra. (A) Resultado da classificação; e (B) imagem de referência.....	53
Figura 25 – Análise do teste de acurácia para o mapeamento de uso da terra.....	56
Figura 26 – Análise Multitemporal Mensal – Mapa de Alagamento do ano de 2004.....	59
Figura 27 – Análise Multitemporal Anual – Mapa de Alagamento.....	61
Figura 28 – Análise Multitemporal Anual – Mapa de Uso da Terra.....	62
Figura 29 – Série Fluviométrica da Estação de São Félix do Araguaia (Rio Araguaia).....	64

## **Lista de Tabelas**

Tabela 1 – Características dos sensores.....	12
Tabela 2 – Critérios para Composição Temporal.....	28
Tabela 3 – Bandas espectrais do produto MOD09Q1.....	28
Tabela 4 – Bandas espectrais do produto MOD09A1.....	28
Tabela 5 – Matriz de erro do mapeamento de áreas alagadas.....	51
Tabela 6 – Coeficiente Kappa do mapeamento de áreas alagadas.....	51
Tabela 7 – Matriz de erro do mapeamento de uso da terra.....	54
Tabela 8 – Coeficiente Kappa do mapeamento de uso da terra.....	55
Tabela 9 – Matriz de erro do mapeamento de uso da terra corrigida.....	55
Tabela 10 – Coeficiente Kappa do mapeamento de uso da terra corrigido.....	55

## **Lista de Siglas**

ANA – Agência Nacional de Águas

AVHRR – *Advanced Very High Resolution Radiometer*

BDRF – *Bidirectional Reflectance Distribution Function*

EOS – *Earth Observing System*

EVI – *Enhanced Vegetation Index*/Índice Realçado de Vegetação

FAI – *Floating Algae Index*/Índice de Alga Flutuante

FPAR- *Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation*

FUNAI – Fundação Nacional do Índio

FVC – *Fractional Vegetation Cover*/Cobertura Vegetal Fracionada

GSD – *Ground Sample Distance*

HDF – *Hierarchical Data Format*

HHN – *Hierarchical Hypercube Networks*

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ICMBio – Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade

ISIN – *Integerized Sinusoidal Projection*

ISODATA – *Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique*

LAI – *Leaf Area Index*/Índice de Área Foliar

LSIE – Laboratório de Sistemas e Informações Espaciais

LSWI – *Land Surface Water Index*/Índice de Água Superficial

MMA – Ministério do Meio Ambiente

MME – Ministério de Minas e Energia

MNF – *Maximum Noise Fraction*

MODIS – *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*

MRT – *MODIS Reprojection Tool*

MSAVI – *Modified Soil-adjusted Vegetation Index*/Índice Modificado de Vegetação Ajustado ao Solo

NASA – *National Aeronautics and Space Administration*

NDVI – *Normalized Difference Vegetation Index/Índice de Vegetação por Diferença Normalizada*

NOAA – *National Oceanic and Atmospheric Administration*

OLI – *Operational Land Imager*

RADAM – Radar na Amazônia

RF – *Random Forest*

RNA – Rede Neural Artificial

ROI – *Regions of Interest*

SAM – *Spectral Angle Mapper*

SCM – *Spectral Correlation Mapper*

SIRGAS – Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas

SPOT/VGT – *Satellite Pour l’Observation de la Terre/Vegetation*

SPVEA – Superintendência do Plano de Valorização Econômica da Amazônia

SUDAM – Superintendência do Desenvolvimento da Amazônia

SVM – *Support Vector Machine*

TIF – *Tagged Image File Format*

TM/ETM – *Thematic Mapper/Enhanced Thematic Mapper*

UNESCO – Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura

UTM – Universal Transversa de Mercator

WGS-84 – *World Geodetic Systems of 1984*

ZEE – Zoneamento Ecológico-Econômico

## RESUMO

As áreas úmidas são representadas por diversos ecossistemas e tem um papel fundamental na manutenção do equilíbrio ecológico. O desenvolvimento do sensoriamento remoto e do geoprocessamento permitiu a coleta contínua e periódica de informações da superfície terrestre e o surgimento de estudos baseados em séries temporais de imagens orbitais. O objetivo principal é o desenvolvimento de uma metodologia para a identificação de padrões sazonais e a classificação de alvos do uso do território da Ilha do Bananal a partir do comportamento fenológico identificado nas séries temporais contínuas do sensor MODIS. A metodologia foi fracionada em quatro fases: 1) Aquisição de dados do sensor MODIS; 2) Tratamento de Ruído; 3) Construção do Hipercubo Espectro-Temporal; e 4) Classificação e Teste de Acurácia. Para validação da classificação foram utilizados pontos de controle interpretados visualmente com base em imagens Landsat, a partir dos quais se calculou o índice Kappa. O filtro de mediana demonstrou a capacidade de eliminar picos ao mesmo tempo em que preserva os dados. O Hipercubo Espectro-Temporal foi fundamental para a extração de um mapa temático para cada tempo da série, resultando em uma coleção de 690 mapas para áreas alagáveis (kappa 0,800) e uma para o uso da terra (kappa 0,648). A partir dos mapeamentos foi possível extrair informações sobre os ciclos de inundação e evolução da paisagem. A área máxima de alagamento foi 2,2 milhões de hectares no ano de 2004 e constatou-se um aumento de 43% nas áreas antropizadas no entorno da ilha ao longo dos quinze anos.

**Palavras-chave:** Sensoriamento Remoto; Tratamento de Ruído; Cubo Temporal; Hipercubo Espectro-Temporal; Assinatura Espectral; Análise Multitemporal; Áreas Úmidas; Enchentes.



## **ABSTRACT**

Wetlands are represented by many ecosystems and have a fundamental part in the maintenance of ecological balance. The development of remote sensing made possible the continuous and periodical gathering of land surface information and the emergence of time series of orbital images based studies. The main objective is the development a methodology to identify seasonal patterns and classify land use targets and flooded areas in the Bananal Island from the phenologic behavior identified on continuous time series form MODIS sensor. The methodology development was fractioned in four stages: 1) Acquisition of MODIS sensor data; 2) Noise Reduction; 3) Construction of the Spectral-Temporal Hypercube; and 4) Classification and Accuracy Test. For the classification's validation it was employed control point visually interpreted based on Landsat images, from which the kappa index was calculated. The median filter demonstrated the capacity of eliminating peaks while preserving the data. The Spectral-Temporal Hypercube was fundamental to the extraction of one thematic map per date of the series, resulting in a collection of 690 maps for flooded areas (kappa 0,800) and for land use (kappa 0,648). From the mappings, it was possible to extract information regarding the flooding cycles and the landscape development. The maximum flooded area had 2.2 million hectares in the year 2004 e it was found an increase of 43% in anthropic areas around the island throughout the fifteen years.

**Keywords:** Remote Sensing; Noise Reduction; Temporal Cube; Spectral-Temporal Hypercube; Spectral Profile; Multitemporal Analysis; Wetlands; Flooding.

## 1. INTRODUÇÃO

As áreas úmidas (*wetlands*) são representadas por diversos ecossistemas definidos na Convenção de Ramsar como “áreas de inundação permanente, periódica ou intermitente, seja natural ou artificial, com água estática ou em fluxo, doce, salobra ou salgada, incluindo áreas de água marinha em que a profundidade máxima na maré baixa não excede 6 metros” (RAMSAR CONVENTION, 1971). Os ecossistemas de área úmida estão entre os mais produtivos do planeta com funções hidrológicas, biogeoquímicas e bióticas que fornecem uma variedade de serviços ecológicos, econômicos e sociais como: diversidade biológica, com destaque para comunidades de aves e invertebrados; armazenamento de água e contenção de inundações; ciclagem de nutrientes e interceptação de sedimentos e outros poluentes resultando em melhoria da qualidade da água inclusive na redução da salinidade; recarga de águas subterrâneas; sequestro de carbono acumulando grande quantidade de matéria orgânica nos solos e regulando a emissão de metano; fornecimento de recursos florestais e pastos naturais; e até mesmo recreação por meio da pesca amadora e outras atividades (BERNAL; MITSCH, 2012; DUFFY; KAHARA, 2011; STEVEN; LOWRANCE, 2011).

As *wetlands* são um habitat crucial para muitos organismos, uma vez que sua vegetação e outras condições ambientais suportam uma biota diversa, incluindo muitas espécies endêmicas (GUTZWILLER; FLATHER, 2011). Apesar de apresentarem uma relação desproporcional entre sua abrangência territorial em torno de 3% e a importância de seus serviços ecológicos em escala global estimada em até 40% anualmente, também sofrem desproporcionalmente com a conversão de suas áreas para agricultura e urbanização calculada em mais de 50% do total e uma grande porcentagem de fauna e flora endêmica ameaçada (DANIELS; CUMMING, 2008; ZEDLER; KERCHER, 2005). Esses ecossistemas apresentam fragilidade em face da expansão da agricultura que devido ao uso intensivo de recursos hídricos visam a instalação em áreas úmidas, alterando o regime hidrológico e ocasionando desequilíbrios ambientais. Tal cenário reforça a necessidade por meios de monitoramento constante e viável do ponto de vista operacional e de dimensionamento de recursos.

No bioma Amazônico, as *wetlands* tem um papel crucial na manutenção do equilíbrio ecológico, ocupando mais de 800 mil km<sup>2</sup> da bacia amazônica (HESS et al., 2015). Elas se manifestam por meio de diversos habitats, a começar por extensas planícies de inundação cortadas por grandes rios de característica meandrante que frequentemente apresentam ilhas, lagos formados a partir de canais abandonados e amplas áreas de várzea, muitas vezes

extrapoladas pelos alagamentos sazonais que resultam no maior agrupamento de florestas inundáveis do mundo (LUCAS et al., 2016).

RICAURTE et al. (2012) identificou diversas classes de áreas úmidas neste bioma dentre as quais encontram-se pântanos interfluviais com vegetação arbustiva e gramíneas, *wetlands* ribeirinhas (várzeas e matas ciliares), complexos inundáveis relacionados a rios meandantes de terrenos periodicamente inundados com vegetação arbustiva ou lenhosa, lagos em ferradura e pântanos insulares. Destacam-se também os estuários, mangues e outros ambientes úmidos que ocupam grande parte do litoral norte brasileiro, cuja morfologia irregular e entalhada aumenta a extensão da linha costeira e potencializa a interação das marés com os elementos bióticos e abióticos continentais (SOUZA-FILHO et al., 2011).

Os ecossistemas estão constantemente em processo de transformação MILNE (1988) podendo ocorrer de forma abrupta, a exemplo de queimadas, ou de forma sutil e gradual, como no caso da acumulação de biomassa (COPPIN et al., 2004). Também é importante destacar que as mudanças podem estar ligadas direta ou indiretamente à ação humana, como desmatamento, expansão da agricultura ou redução da disponibilidade de recursos hídricos. Os estudos de séries temporais tem o potencial de diagnosticar a resposta de ecossistemas às transformações globais e identificar fluxos de água, energia e carbono entre a superfície e a atmosfera (GANGULY et al., 2010). A compreensão da dinâmica temporal dos processos naturais e antropicos permite caracterizar interações em larga escala entre a superfície terrestre, o clima e as atividades humanas (ZHANG, X. et al., 2006).

Com o desenvolvimento do sensoriamento remoto e do geoprocessamento, tornou-se possível a coleta contínua e periódica de informações da superfície terrestre em diferentes resoluções espaciais, temporais e espectrais, além do processamento da grande quantidade de dados disponíveis. Consequentemente, difundiram-se estudos baseados em séries temporais de imagens orbitais cuja vantagem é a possibilidade de uma abordagem sinóptica das temáticas a serem desenvolvidas. PETTORELLI et al. (2005) e MA; VEROUSTRATE (2006) indicam que as principais séries de dados capazes de monitorar e identificar transformações em ecossistemas são provenientes dos sensores NOAA/AVHRR (*National Oceanic and Atmospheric Administration/Advanced Very High Resolution Radiometer*); SPOT/VGT (*Satellite Pour l'Observation de la Terre/Vegetation*); TERRA-AQUA/MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*); considerando também Landsat-TM/ETM (*Thematic Mapper/Enhanced Thematic Mapper*) e o mais recente e promissor Landsat-OLI (*Operational*

*Land Imager*) (KE et al., 2015).

Várias metodologias foram desenvolvidas a partir de séries temporais para diferentes alvos e sensores. As séries NOAA/AVHRR foram aplicadas com sucesso no mapeamento de queimadas (CHUVIECO et al., 2005), análise fenológica da vegetação (FUNK; BROWN, 2006) e transformações na cobertura da superfície terrestre (MARTÍNEZ; GILABERT, 2009; ZHAO, J. et al., 2013). Ao passo que as séries SPOT/VGT permitiram monitorar a longo prazo a dinâmica temporal da vegetação (KOBAYASHI; DYE, 2005), estimar o Índice de Área Foliar (LAI) (WANG et al., 2005), identificar impactos de atividades antrópicas em florestas tropicais (BONTEMPS et al., 2008) e compreender os efeitos da urbanização na fenologia da vegetação e na temperatura da superfície (HAN; XU, 2013).

Também foram aplicadas técnicas de análise temporal nos dados LANDSAT-TM/ETM para examinar a expansão da agricultura e exploração de madeira em áreas de floresta (SIWE; KOCH, 2008), identificar processos abruptos ou contínuos de mudanças em ecossistemas florestais (COHEN et al., 2010; KENNEDY et al., 2010) e mapear características do dossel de florestas e suas perturbações (HELMER et al., 2010). Destaca-se, entretanto, que sua aplicação é restrita devido a sua menor resolução temporal, em função do tempo de revisita do satélite, e ao pré-processamento dos produtos disponibilizados. As bases de dados Landsat, portanto, são mais adequadas às aplicações em análises temporais discretas, nas quais a comparação da variação espectral entre duas datas é limitada pelas variações entre os diferentes estágios de desenvolvimento da vegetação, implicando em erros na análise dos resultados (LUNETTA et al., 2006).

**Tabela 1 – Características dos sensores**

	<b>AVHRR*</b>	<b>SPOT/VGT*</b>	<b>MODIS</b>	<b>LANDSAT*</b>
Pixel	1000 metros	1000 metros	250 a 1000 metros	15 a 120 metros
Revisita	Diária	Diária	Diária	16 dias
Operação	1981	1998	2000	1984

Observação Diversos problemas Série inconsistente Sensor escolhido Análises discretas

\*Abrange as características gerais de todas missões que compõem as séries com dados relevantes

Fonte: Original do Autor

FENSHOLT et al. (2009) destaca diversas limitações quanto à utilização de dados baseados no sensor NOAA/AVHRR uma vez que não foi desenvolvido para monitorar vegetação, apresentando também problemas no canal do infravermelho próximo e em sua órbita. Ressalta ainda a maior acurácia e confiabilidade dos produtos MODIS em detrimento dos SPOT/VGT devido a maior consistência temporal nas medições da resposta espectral. Os

principais atributos relevantes à escolha da série de dados estão resumidos na Tabela 1.

As séries temporais MODIS apresentam diversas aplicações, principalmente a partir da identificação de padrões fenológicos, como por exemplo: mapeamento de vegetação natural (ABADE et al., 2015; HMIMINA et al., 2013; JÖNSSON et al., 2010), classificação de sistemas e culturas agrícolas (CHANG et al., 2007; OZDOGAN, 2010; SAKAMOTO et al., 2009a;2009b; SAKAMOTO et al., 2010); análise das relações entre métricas da vegetação e a resposta hidrológica de bacias hidrográficas (FITCH et al., 2010); calcular a Produtividade Primária Bruta em áreas de turfeira (SCHUBERT et al., 2010); mapear áreas agrícolas abandonadas (ALCANTARA et al., 2012); reconstruir séries contínuas de temperatura da superfície terrestre (XU; SHEN, 2013); caracterizar o crescimento da vegetação de tundra após o degelo completo e avaliar sua resposta a variações na cobertura de neve (NARASIMHAN; STOW, 2010; ZENG; JIA, 2013).

Na caracterização de áreas úmidas, as séries temporais MODIS foram utilizadas por diversos autores. SAKAMOTO et al. (2007) utilizou a diferença entre os índices EVI (Índice Realçado de Vegetação) e LSWI (Índice de Água Superficial) (DVEL) para detectar as mudanças espaço-temporais na extensão da inundação no estuário em delta do rio Mekong (Camboja e Vietnã). ORDOYNE; FRIEDL (2008) atestaram a aplicabilidade de séries temporais MODIS para mapeamento da extensão e da frequência de inundações em grandes complexos de áreas úmidas com aplicações em estudos regionais de ecologia e gestão de recursos hídricos na região pantanosa dos Everglades (Flórida, EUA). FENG et al. (2012) quantificou e documentou os padrões sazonais e as variações anuais de inundação do lago Poyang na China, com foco em situações extremas de cheia e estiagem por meio de métricas de séries temporais FAI (Índice de Alga Flutuante). WEISS; CRABTREE (2011) estimaram a porcentagem da ocorrência de água superficial na planície do rio Yukon (Alaska, EUA) por meio de modelagem ambiental utilizando dados de séries temporais MODIS como inputs, o que permitiu o exame da dinâmica sazonal, anual e interanual de ambientes hidrológicos complexos. HANDISYDE et al. (2014) propôs uma técnica para a seleção de áreas propícias ao desenvolvimento de aquicultura na porção argentina da bacia do rio Paraná, minimizando riscos de inundação por meio da porcentagem de vezes em que o pixel é classificado como água ao longo da série temporal MODIS.

HUANG et al. (2014) desenvolveram uma metodologia para mapear a dinâmica espaço-temporal de inundação integrando imagens MODIS e dados de fluxo hidrológico

aferidos em campo. Foi possível extrair a extensão máxima anual, mapear a frequência e derivar a probabilidade das inundações com acurácia satisfatória na bacia dos rios Murray e Darling (Austrália), apesar da composição de 8 dias utilizada não necessariamente representar o auge dos alagamentos.

ZHAO, B. et al. (2009) e YAN et al. (2010) identificaram as transformações espaço-temporais relacionadas às inundações de maré em estuários na ilha de Chongming (China). A partir da utilização diversos índices de reflectância (NDVI; EVI; MSAVI – Índice Modificado de Vegetação Ajustado ao Solo; e LSWI) foi possível monitorar a dinâmica das inundações e a sucessão vegetal, o que demonstrou um avanço do terreno sobre o mar devido à elevação da planície de maré por meio da sedimentação fluvial e subsequente colonização pela flora pantaneira. Tais abordagens comprovam a aplicabilidade do sensor MODIS para análises que integram solos encharcados e características de dossel, distinguindo tanto os ciclos de marés, quanto as fases de crescimento da vegetação.

Outras abordagens que enfocam as características fitofisionômicas e fenológicas da flora utilizando séries NDVI do sensor MODIS são apresentadas por MELESSE et al. (2007) que avaliou os resultados de atividades de restauração florestal nas planícies de inundação fluvial do rio Kissimmee (Flórida, EUA) utilizando o indicador de Cobertura Vegetal Fracionada (FVC) e estimativas de fluxo de calor latente em conjunto com medições do nível de água subterrânea, demonstrando crescimento em todos os indicadores; THAKUR et al. (2011) que quantificou a dinâmica da vegetação para diferentes habitats em áreas úmidas próximas ao lago Tuz (Turquia) e estudou sua relação com a quantidade de precipitação e o nível de águas subterrâneas, indicando forte relação entre a vegetação e o regime hidrológico; PETUS et al. (2013) que mapearam a vegetação dominante em mananciais relacionados a sistemas artesianos (Dallhousie, Australia), discriminando a atividade fotossintética e as fenologias típicas, além de relacionar variações a longo prazo com mudanças no fluxo de água subterrâneo; e ALI et al. (2013) que identifica gradientes de variação entre diferentes fitofisionomias a partir de séries NDVI contínuas, conceituando-os como a relação espacial entre unidades de uso da terra diferenciando-se gradualmente e com padrões fenológicos similares.

Interessados em aferir a capacidade de produção de biomassa em ecossistemas úmidos, WEN et al. (2012) avaliaram a influência da água proveniente de precipitação ou alagamento na produtividade primária de diferentes tipos de vegetação em planícies de inundação de

ambientes semiáridos nos pântanos de Macquarie (Nova Gales do Sul, Austrália) por meio de séries temporais NDVI. Isto evidencia que a chuva está relacionada com maiores médias de produção vegetal enquanto áreas que sofrem alagamentos apresentam maior amplitude de variação na produtividade, ressaltando-se a relação positiva entre umidade e vegetação e a heterogeneidade criada por tais fatores.

Com o mesmo objetivo, SIMS; COLLOFF (2012) identificaram o período de crescimento da produtividade primária da vegetação nas áreas úmidas do rio Paroo (Austrália), minimizando fatores diferentes da inundação por meio da comparação do NDVI em áreas alagáveis e áreas secas sujeitas às mesma influências ambientais. Entretanto foram identificadas anomalias atribuídas à presença de espelhos d'água ao longo de períodos prolongados e atípicos de cheia.

Também destacam-se aplicações voltadas a culturas agrícolas, por exemplo, a rizicultura que é praticada em solos inundados e sua fenologia está diretamente relacionada com a presença de água. PENG et al. (2011) procurou diferenciar os padrões locais dos sistemas de cultura do arroz na província de Hunan (China) que variam em função do número de colheitas por ano e da época do plantio, utilizando a relação entre EVI e LSWI o que permite quantificar a área plantada e estimar a produção. Esta abordagem representa um incremento metodológico em relação à abordagem de SAKAMOTO et al. (2006) que utilizou apenas o índice de vegetação no delta do rio Mekong (Vietnã).

O sensor MODIS tem sido aplicado em diversas pesquisas na Amazônia. PARK; LATRUBESSE (2014) caracterizaram padrões espaço-temporais de distribuição superficial de sedimentos em grandes sistemas fluviais, no rio Amazonas e seus principais tributários. MAEDA et al. (2011) aplicou técnicas de detecção de mudança discreta para identificar áreas de queimadas suscetíveis à transformação em áreas agrícolas no norte do Mato Grosso. KOLTUNOV et al. (2009) utilizou séries temporais contínuas para mensurar os efeitos de desmatamento por corte seletivo na fenologia na floresta remanescente também no norte do Mato Grosso. GALFORD et al. (2008) e MORTON et al. (2006) mapearam a expansão e intensificação de culturas mecanizadas por meio de transformações na fenologia observadas em índices de vegetação, ambos em áreas do arco do desmatamento no estado do Mato Grosso. XIAO et al. (2006) estudou a fenologia das florestas perenifólias buscando o mês de maior atividade fotossintética do dossel por meio do índice EVI em toda a Amazônia. Fica evidente a preocupação da literatura especializada com a manutenção da floresta em pé e o avanço da

agricultura extensiva.

O objetivo principal desta pesquisa é o desenvolvimento de uma metodologia para a identificação de padrões sazonais e a classificação de alvos do uso do território da Ilha do Bananal, estado do Tocantins, a partir do comportamento fenológico identificado nas séries temporais contínuas do sensor MODIS. O principal padrão de mudança a ser identificado diz respeito à dinâmica de alagamento da região, uma vez que se trata de um fator com grande domínio sobre a fenologia local.

Procura-se, portanto, produzir um conjunto temporalmente detalhado de mapas que retrate tanto o comportamento de cheia e estiagem da região, quanto a evolução do uso da terra ao longo do período do estudo. Essa coleção de mapas temáticos deve subsidiar uma análise multitemporal contínua que possibilite a descoberta de informações valiosas da Ilha do Bananal na condição de ecossistema de área úmida.

Os objetivos específicos envolvem: 1) a obtenção da série de dados de quinze anos do sensor MODIS; 2) a eliminação de ruídos das imagens, preservando as informações relevantes; 3) a construção de uma estrutura de dados que possibilite o maior aproveitamento dos dados disponíveis; e 4) a aplicação de classificadores que extraiam as informações temáticas para a construção da coleção de mapas.

A escolha da Ilha do Bananal como área de estudo se justifica não só pela caracterização de seus atributos naturais à luz da Geografia Física, ligados intrinsecamente à dinâmica natural da várzea do rio Araguaia e que carece de análises com foco no sensoriamento remoto; mas também pela importância geopolítica e geoeconômica relacionada ao processo de ocupação e uso do território em um contexto de bioma, bacia hidrográfica e fronteira agrícola, a partir do entendimento do Espaço Geográfico e com repercussões em políticas públicas fundiárias e territoriais



## 2. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo é a Ilha do Bananal, que é de fato a maior ilha fluvial do mundo e figura na Lista Ramsar como Zona Úmida de Importância Internacional (RAMSAR CONVENTION, 2016). Na classificação oficial dos biomas brasileiros (Figura 1), a área de estudo está situada na transição entre os biomas Cerrado e Amazônia, constituindo um ecossistema com características únicas tanto relacionadas à fitofisionomia quanto ao componente hidrológico. COUTINHO (2006) ao discutir a ideia de bioma resgata a noção de um ambiente uniforme, tanto em termos climáticos quanto topográficos, pedológicos e fitofisionômicos com estrutura e funcionalidade própria, inseridos em um Zonobioma ou bioma zonal. O autor relaciona esses macrobiomas com os domínios morfoclimáticos e fitogeográficos de AB'SABER (1977) que por sua vez enfatiza e caracteriza as Faixas de Transição entre os domínios. As Faixas de Transição são ecótonos por definição, cujo conceito geralmente se refere ao limite ou a zona de contato entre dois ambientes, podendo apresentar propriedades características de ecossistemas (BASSET et al., 2013).

A Ilha do Bananal encontra-se na porção sudoeste do estado do Tocantins, fazendo divisa natural com Mato Grosso a oeste através do rio Araguaia e com Goiás ao sul, através do rio Javaés, aproximando-se do estado do Pará ao norte. Sua área de cerca de 20 mil km<sup>2</sup> – ou 2 milhões de hectares – e extensão de 330 km de norte a sul abrange parte dos municípios de Pium, Lagoa da Confusão, e Formoso do Araguaia. Essas dimensões fazem da Ilha do Bananal a maior ilha fluvial do planeta.

O clima da região é tropical sazonal, com verões úmidos e invernos secos bem delimitados, que são influenciados pela massa de ar equatorial continental úmida e quente e a proximidade com a zona de convergência intertropical. A média anual de chuvas varia entre 1.400 e 2.200 mm/ano. O período chuvoso compreende os meses de outubro a março, concentrando 85% da precipitação, e o seco de abril a setembro. Os meses de maior precipitação correspondem a dezembro, janeiro e fevereiro. A temperatura média aumenta em direção ao norte, de aproximadamente 26°C, com a média mínima mensal de 22°C no mês de junho, e as máximas de 38°C em agosto e setembro (VALENTE et al., 2013).

A área de estudo está totalmente contida na bacia hidrográfica do Araguaia-Tocantins com uma área de drenagem de aproximadamente 764 mil km<sup>2</sup> que corresponde a 9% da área de todo o país (FALCK et al., 2015). A Figura 1 apresenta o mapa da Ilha do Bananal contida entre os rios, Araguaia e Javaés, que é um braço resultante da bifurcação do próprio Araguaia. A

redução da energia do rio Araguaia ao entrar na planície de inundação faz com que o corpo d'água perca a capacidade de transportar sedimentos que são depositados no local, dando origem à ilha do Bananal e permitindo a permanente remodelagem e movimentação dos cursos d'água. É importante destacar que o rio Javaés é o próprio rio Araguaia, com novo nome em razão da dimensão da ilha que em certos pontos chega a separar as duas porções do curso d'água por até 80 quilômetros.



**Figura 1 – Mapa de contextualização**

A bacia apresenta topografia suave com altitudes predominantes entre 200 e 500 metros o que permite que a geomorfologia seja dominada por extensas planícies de inundação. A região apresenta precipitação média de 1.869 mm/ano, entretanto a variabilidade sazonal das

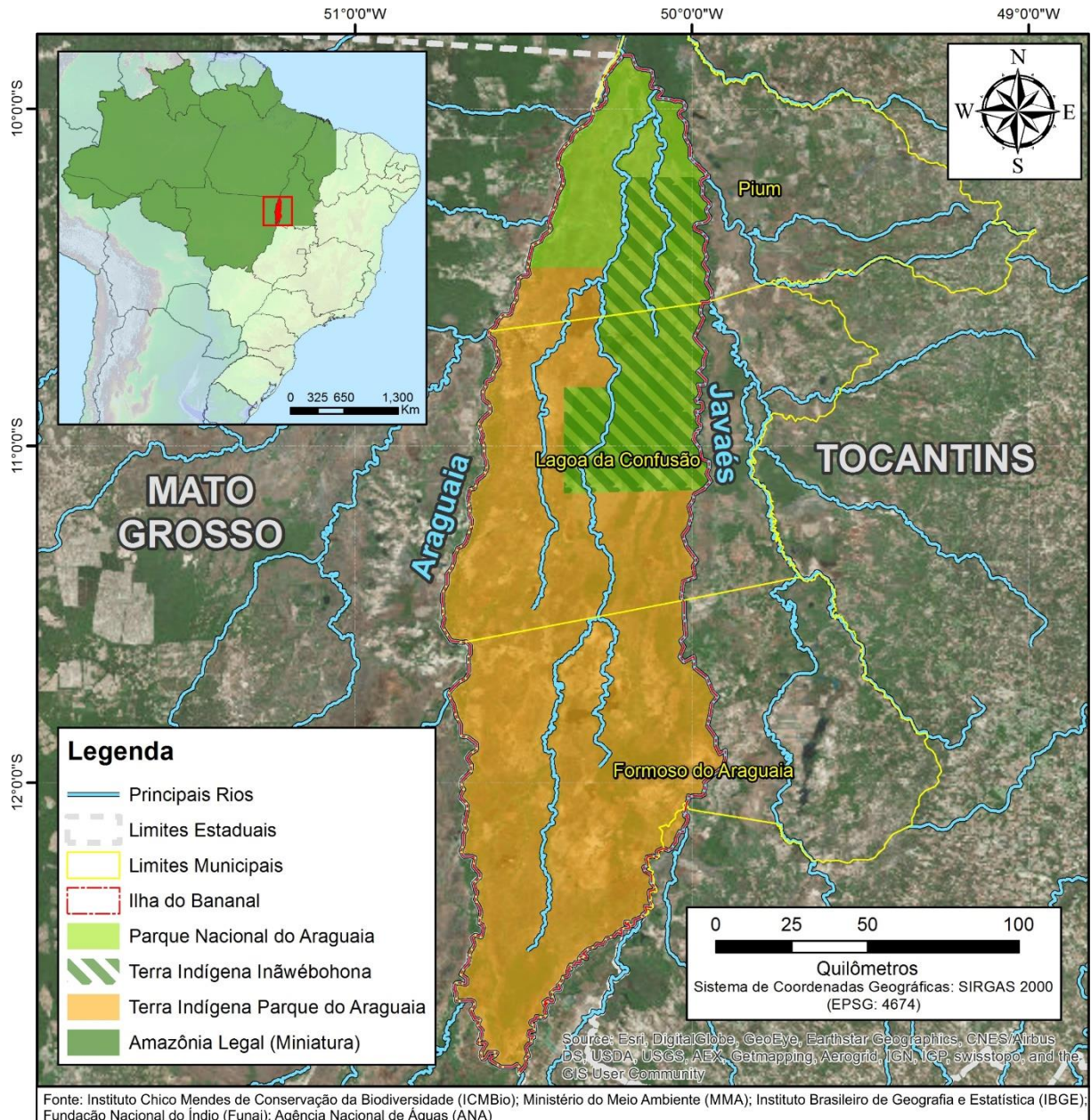
chuvas é caracterizada por uma estação de seca extrema e outra com forte concentração dos eventos de precipitação, potencializando os períodos de cheia e estiagem (MMA, 2006).

Do ponto de vista da formação geológica a Ilha do Bananal insere-se em uma bacia sedimentar cenozoica da província tectônica do Tocantins, localizada no Escudo Cristalino Atlântico (DA SILVA et al., 2003). A Bacia Sedimentar do Bananal se constitui por meio de deposição sedimentar do próprio rio Araguaia, cuja estratigrafia é composta por um conglomerado basal litificado recoberto por siltes e areias mal estratificadas e de depósito recente (ARAÚJO; CARNEIRO, 1977). Mais especificamente as formações geológicas da ilha e dos rios adjacentes são recentes, da época do Holoceno, predominantemente depósitos aluvionares com sedimentos argilo-siltico-arenosos inconsolidados e de características flúvio-lacustrinas, mas apresentando também em pontos esparsos terraços aluvionares semiconsolidados (CPRM, 2004a;2004b).

A ilha do Bananal localiza-se na unidade geomorfológica da Planície do Bananal, a mais importante bacia sedimentar quaternária intracratônica da América do Sul, tendo sido preenchida por sedimentos do pleistoceno da Formação Araguaia e por depósitos do holoceno (LATRUBESSE, 2015). VALENTE; LATRUBESSE (2012) destacam a predominância dos processos de avulsão fluvial na conformação do sistema aluvial resultando em ramos anastomosados em grande escala, processo ainda ativo na área onde escoia o rio Javaés. Sua paisagem é dominada por superfícies extremamente planas que varia poucos metros ao longo de dezenas de quilômetros, o que condiciona inundações periódicas, feições pantanosas e lacustres e a formações de rios anastomosados acompanhados de paleodrenagens e meandros abandonados (LATRUBESSE; STEVAUX, 2002). Os canais de maior porte são geralmente anastomosados, enquanto os canais secundários tem características meandrantas (MME, 1981). As lateritas hidromórficas e gleissolos pouco húmicos predominam entre os solos da região, ambos ligados à presença de água no ambiente (MMA, 2001).

A compartimentação geomorfológica da área de estudo apresenta duas feições principais. A primeira se trata de uma banda marginal relacionada aos cursos d'água que constitui uma planície fluvial onde encontram-se vestígios característicos da geomorfologia fluvial. O compartimento geomorfológico seguinte consiste em interflúvios de pequena altitude que favorecem a acumulação hídrica proveniente de inundações periódicas (MME, 1981).





**Figura 2 – Mapa de situação**

O caráter de Faixa de Transição e de ecótono da Ilha do Bananal se expressa pelas fitofisionomias que combinam atributos da Amazônia e do Cerrado. O Plano de Manejo do Parque Nacional do Araguaia (Figura 3) descreve as três regiões fitogeográficas da Planície do Bananal: fitofisionomias típicas do Cerrado ou Savana; Floresta Ombrófila Aberta; e Floresta Estacional Semidecidual (MMA, 2001).



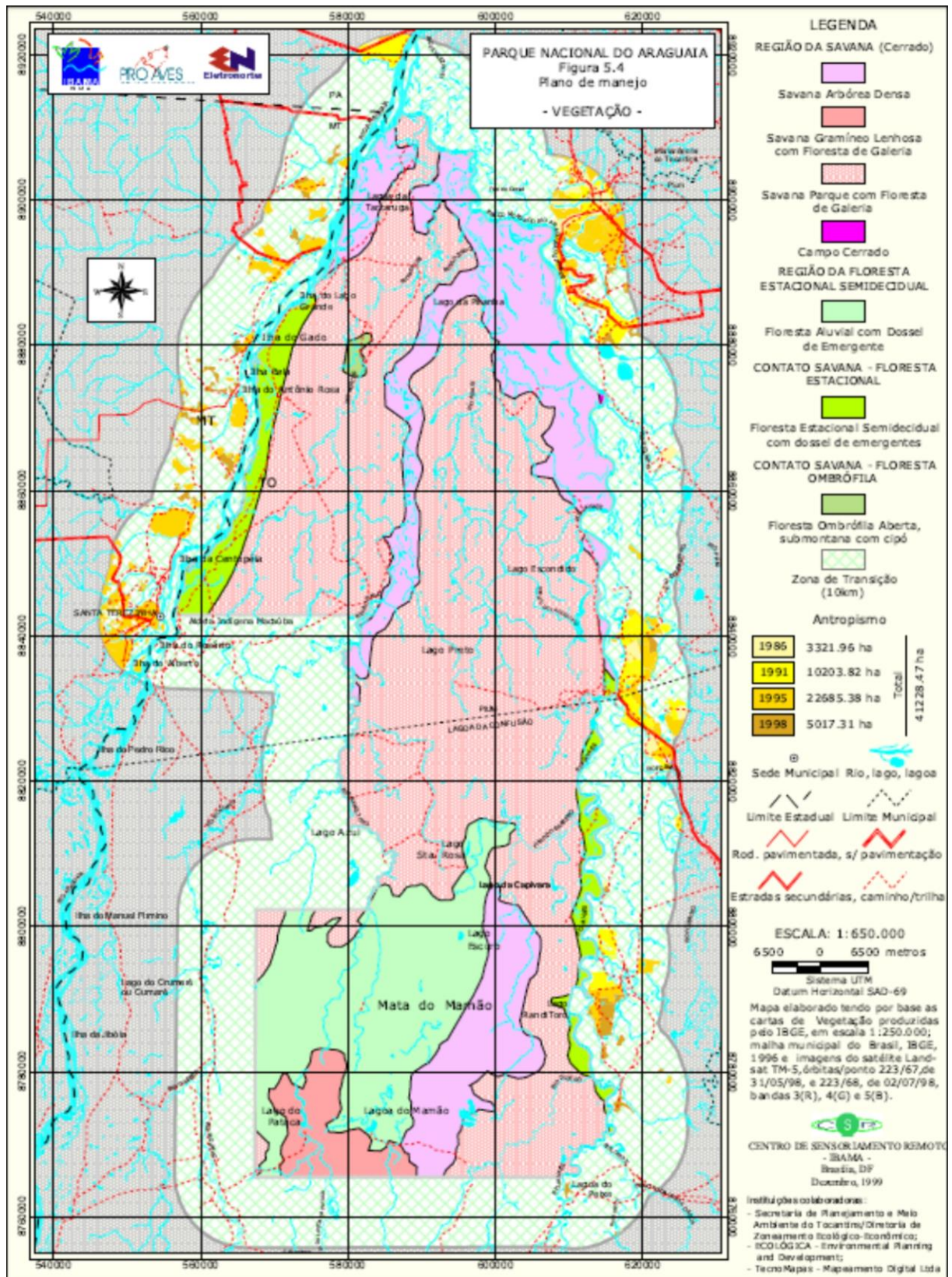


Figura 3 – Plano de Manejo (vegetação) (MMA, 2001)

As duas formações principais do Cerrado são a Savana Arbórea Densa (Cerradão) geralmente perenifólio com vegetação lenhosa de pequeno a médio porte; e a Savana Parque

que apresenta uma fitofisionomia extremamente peculiar associada a campos de murundus. Esta última ocupa áreas planas com inundações recorrentes dominadas por Gleissolos e com baixa capacidade de drenagem. A vegetação lenhosa, com moitas e pequenas árvores, se agrupa nessas feições microtopográficas que podem chegar a 10 metros de diâmetro e espaçam-se de 5 a 20 metros entremeadas por campos de gramíneas (MMA, 2001).

Outras fitofisionomias do Cerrado são os campos limpos e sujos presentes nos terrenos permanentemente úmidos nas partes mais baixas da planície de inundação ou em áreas de transição e campo cerrado ou cerrado *stricto sensu* nas áreas de topografia mais elevada sem alagamento. (MMA, 2001).

A Floresta Ombrófila Aberta domina a região a noroeste da Ilha do Bananal, podendo ser considerada como uma transição entre as formações do bioma Cerrado e Amazônico, possui indivíduos de porte médio, bem espaçados e com cipó. A Floresta Estacional Semidecidual, apresenta florestas aluviais com matas ciliares inundáveis considerando o caráter estacional que se dá pelo periodismo da fenologia provocado pelos períodos de cheia e estiagem e ocupam principalmente vales em terrenos de solo hidromórfico. Seu principal representante é a Mata do Mamão na porção central da Ilha do Bananal. (MMA, 2001).

VALENTE et al. (2013) identificaram por meio da classificação de imagens MODIS-EVI fitofisionomias do Cerrado no interior da Ilha do Bananal, discernindo primeiramente a classe de campo limpo referida como cerrado de pradaria ocupando 44% de toda a área. Outra classe encontrada foi a denominada de cerrado arbustivo, aqui referida previamente como savana parque, além de identificar em conjunto as classes de cerrado denso e mata de galeria. A inundação periódica impede o crescimento de vegetação mais densa nas áreas de planície, onde as formações arbustivas e com gramíneas predominam e representam 58% da área da ilha.

Por fim, deve-se considerar que as formações de Cerrado estão adaptadas às queimadas naturais que ocorrem na estação seca, porém as formações florestais sofrem com o impacto do fogo. Normalmente as queimadas ficam restritas às bordas dessas áreas devido à grande umidade, contudo, em períodos de seca mais prolongados, elas podem se intensificar, causando grande perturbação no ecossistema (MMA, 2001).

A relevância ecológica da região instiga diversas iniciativas internacionais e nacionais de proteção e preservação. Além de ser uma Zona Úmida de importância Internacional, é considerada uma área de destaque na Reserva da Biosfera do Cerrado pela UNESCO (2009). Em nível nacional a Ilha do Bananal é dividida entre o Parque Nacional do Araguaia (BRASIL,

1980) ao norte, com a Terra Indígena Inãwébohona sobrepondo 377.113 ha de sua área em regime jurídico de dupla afetação (BRASIL, 2006), e a Terra Indígena Parque do Araguaia com 1.358.499 ha ao sul da ilha (BRASIL, 1998) (Figura 2).

Outro aspecto relevante à dinâmica socioambiental da área é a sua inserção no território da Amazônia Legal (Figura 2). O termo Amazônia Legal é um conceito jurídico-político que extrapola as características naturais do domínio amazônico. Em face ao desenvolvimento territorial incentivado pela Constituição Federal de 1946, a Lei 1.806 de 1953 criou a Superintendência do Plano de Valorização Econômica da Amazônia (SPVEA) substituída em 1966 pela Lei 5.173 com a criação da Superintendência do Desenvolvimento da Amazônia (SUDAM). Ambas as leis delimitaram suas áreas de atuação, mas ainda assim as denominava apenas como Amazônia (BRASIL, 1946a;1953;1966). Sua delimitação vigente é dada pela Constituição Federal de 1988 que determinou a criação do estado do Tocantins e utilizou expressamente o termo Amazônia Legal (BRASIL, 1988). A partir de então, este território é utilizado como base para formulação e aplicação de políticas públicas com destaque para a preservação ambiental, desenvolvimento sustentável e reprodução do modo de vida de povos e comunidades tradicionais no território – além de diretriz para diversos estudos e iniciativas de mapeamento e caracterização.

Portanto, em relação ao uso da terra na Ilha do Bananal é esperado que nenhuma atividade antrópica recente seja identificada em proporção relevante. Porém, nos arredores da ilha, devido à proximidade da área de estudo com o Arco do Desmatamento, a pecuária é amplamente encontrada. Essa região de fronteira agrícola abrange principalmente o limite sul da Amazônia Legal Brasileira – englobando os estados do Acre, Rondônia, Mato Grosso e Pará – e é responsável pela maior parte da produção agrícola e bovina da Amazônia Legal (DOMINGUES; BERMAN, 2012).

ALDRICH et al. (2012) destaca que o desmatamento é um processo social que se desdobra ao longo de décadas e envolve uma sucessão de pequenos e grandes proprietários, o que muitas vezes resulta em conflitos fundiários e políticos. Esse processo envolve uma matriz de múltiplos agentes e disputas pela legitimidade da ocupação da terra no Arco do Desmatamento. Enseja-se que pela amplitude temporal desta pesquisa seja possível apreender certos aspectos dessa dinâmica socioambiental.

O Arco do Desmatamento é um espaço estratégico para o desenvolvimento e para o ordenamento territorial da região, uma vez que é a porta de entrada para a Amazônia Central.

O avanço da fronteira agrícola é uma progressão lógica, mas que deve ser acompanhada de planejamento e de ações preparatórias como: o Zoneamento Ecológico-Econômico (ZEE); a criação de reservas ambientais; e reforço nos níveis de governança com foco na contenção da imigração para a região (FEARNSIDE; DE ALENCASTRO GRACA, 2006).

Um aspecto crucial para a resolução dos conflitos fundiários da região é a identificação e demarcação dos terrenos marginais de rios federais navegáveis, assegurados como bens imóveis e inalienáveis da União pela legislação vigente (BRASIL, 1946b;1988), uma vez que as características naturais de inundação da planície do Araguaia garantem amplo domínio da esfera pública federal sobre as terras da região e a ela compete a destinação e a garantia do cumprimento de sua função social, econômica e ambiental, se tornando o principal agente de resolução das disputas e, principalmente, de gestão do território.

Por fim, o entendimento da dinâmica de ocupação da Ilha do Bananal e de seus arredores também passa pelo reconhecimento das comunidades e povos tradicionais. De acordo com MMA (2001), as comunidades indígenas que ocupam a ilha são os Karajá, Javaés, Tapirapé e Avá-Canoeiro, mas também identifica-se a categoria social dos Retireiros do Araguaia, famílias envolvidas com a pecuária que usufruem temporariamente das pastagens periodicamente alagadas marginais à ilha.



### 3. METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho consiste na transformação – por meio da interpretação e classificação de suas informações espectrais e temporais – da série de imagens do sensor MODIS em uma coleção de mapas temáticos de alagamento e uso da terra. Para tanto será priorizada a utilização do máximo de dados disponíveis, preservando o grande detalhamento temporal que a base de imagens oferece e, dessa forma, subsidiar uma análise multitemporal contínua acerca da dinâmica natural e antrópica da Ilha do Bananal e seu entorno.

O desenvolvimento da pesquisa foi dividido em quatro fases principais: 1) obtenção de imagens da série temporal MODIS no período 2001-2015 e pré-processamento; 2) aplicação de técnicas de tratamento de ruído; 3) construção do objeto tetradimensional denominado Hipercubo Espectro-Temporal; e 4) aplicação de métodos de classificação no conjunto de dados (Figura 4).

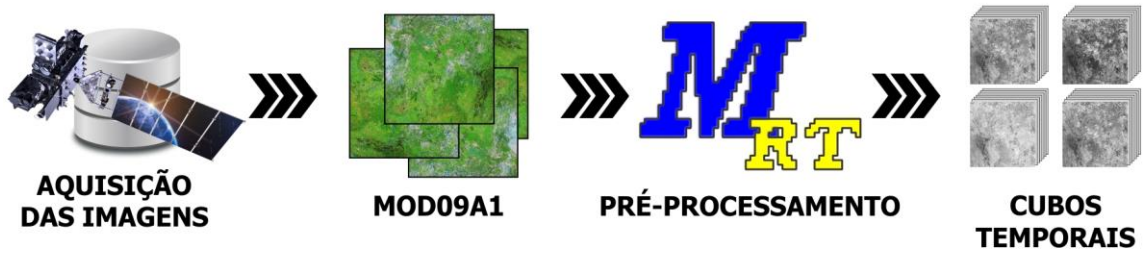
A primeira fase descreve os atributos técnicos do sensor MODIS abordando a sua resolução temporal, espacial, espectral e radiométrica. Também serão abordadas as etapas de pré-processamento, em que os dados são reprojatados, convertidos, agrupados em cubos temporais, reamostrados e redimensionados para a área de estudo.

A segunda fase aborda a etapa de tratamento de ruído a partir da filtragem das séries temporais do sensor MODIS. Este procedimento utiliza filtros estatísticos que combinam uma interpolação linear ao filtro de mediana em janelas móveis, suavizando o espectro e substituindo por valores interpolados os pixels provenientes de imagens com cobertura de nuvens.

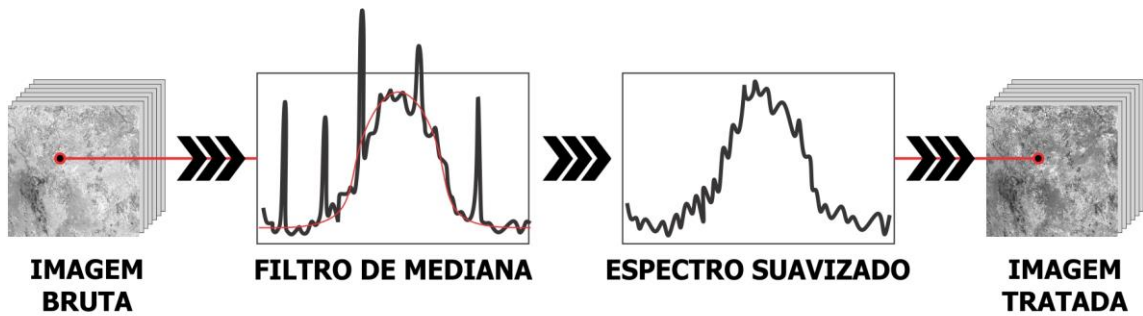
A terceira fase conceitua e descreve a construção do objeto que será denominado na pesquisa de Hipercubo Espectro-Temporal. Sua confecção se dá a partir da fusão de todos os cubos temporais das bandas MODIS, cujo subproduto é uma estrutura tetradimensional que permite uma análise combinada entre todas as bandas do espectro eletromagnético disponíveis e todos os tempos fenológicos coletados, potencializando a utilização da maior quantidade de dados de forma integrada.

A quarta fase abrange a etapa de classificação e teste de acurácia, na qual será apresentado o método de classificação por Mínima Distância espectral, além dos critérios de seleção da biblioteca para delimitação das classes de uso da terra a serem identificadas. Também será descrito o método utilizado para o exame de acurácia dos mapeamentos realizados, desde a seleção das amostras de teste até a aplicação do índice *Kappa*.

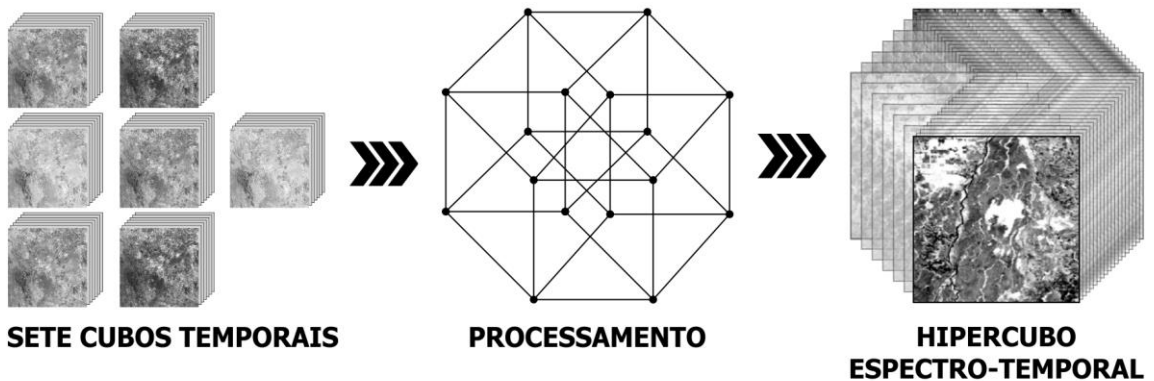
### PRIMEIRA FASE - SENSOR MODIS



### SEGUNDA FASE - TRATAMENTO DE RUÍDO



### TERCEIRA FASE - HIPERCUBO ESPECTRO-TEMPORAL



### QUARTA FASE - CLASSIFICAÇÃO E TESTE DE ACURÁCIA

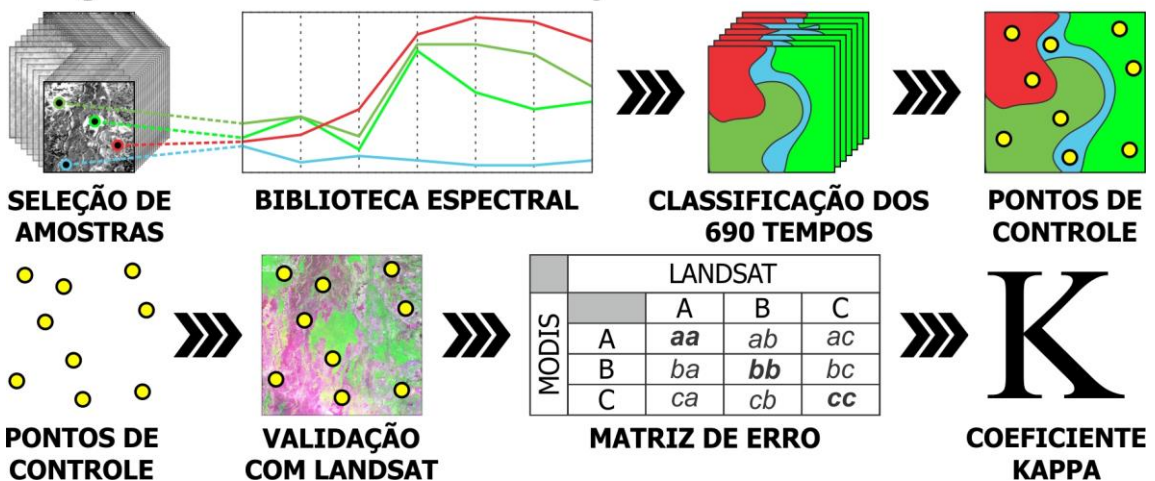


Figura 4 – Fluxograma da Metodologia

### 3.1. Sensor MODIS

MODIS é o principal sensor a bordo da plataforma orbital EOS-AM1 (*Earth Observing System*), também nomeada TERRA, que foi lançada pela NASA em 18 de dezembro de 1999 e entrou em operação em 24 de fevereiro de 2000. O sensor foi projetado para abordar as seguintes variáveis: atmosféricas (nuvens, fluxos de radiação e aerossóis); terrestres (uso da terra, detecção de mudança, dinâmicas da vegetação, temperatura de superfície, ocorrência de queimadas, interferências vulcânicas e cobertura de neve); e oceânicas (temperatura, cor e distribuição, dinâmica e eficiência fotossintética de fitoplâncton) (GUENTHER et al., 2002).

A equipe de desenvolvimento dos produtos terrestres do MODIS procurou atender à demanda da comunidade científica por produtos com maior nível de calibração e padronização capazes de fornecer informações acerca dos processos de mudança globais. Os produtos disponibilizados são: reflectância da superfície; temperatura da superfície; albedo e BDRF; índices de vegetação; LAI/FPAR; fogo; neve, lagos congelados e cobertura de gelo oceânica; uso da terra e mudança; fotossíntese e produtividade primária (JUSTICE et al., 1998).

O sensor MODIS possui 36 bandas espectrais com uma ampla cobertura do espectro eletromagnético de 0,405  $\mu\text{m}$  até 14.385  $\mu\text{m}$  e uma resolução radiométrica de 12 bits. Sua resolução espacial é moderada, variando de 250 metros para as duas primeiras bandas, 500 metros para as bandas 3 a 7 e 1000 metros para as demais. Sua cobertura aproximadamente diária garante uma alta resolução temporal e a coleta contínua de uma grande quantidade de dados, o que potencializa sua amplitude de emprego (JUSTICE et al., 2002).

WOLFE et al. (2002) detectaram erros na geolocalização do instrumento a partir de 420 pontos de controle terrestres extraídos de imagens Landsat-4 e Landsat-5 TM e atualizaram os parâmetros internos de orientação, resultando em uma acurácia posicional sub-pixel com um erro médio de 18 metros no sentido da faixa de voo (*across-track*) e de 4 metros no sentido do imageamento (*along-scan*), com os respectivos desvios padrões de 38 e 40 metros. Essa acurácia garante alta qualidade de georreferenciamento para os produtos MODIS, considerando-se que a incerteza posicional se dá apenas pela dimensão da célula (*pixel*).

Os produtos MODIS são disponibilizados em 5 níveis distintos de processamento de dados. Produtos nível 0 são os dados brutos transmitidos pelo satélite. Produtos nível 1 são os dados após a calibração radiométrica sem qualquer outra alteração. Produtos nível 2 são os resultados do nível 1 após correção atmosférica fornecendo a reflectância no nível do terreno. Produtos nível 3 são os resultados do nível 2 inseridos em uma grade com projeção cartográfica

e, em alguns casos, sofrem algum tipo de composição ou média temporal. Os produtos nível 4 passam por processamentos adicionais, como a extração de índices de reflectância ou alguma classificação (NASA, 2015). A vantagem dos produtos de nível 3 é a sua geolocalização precisa, mas pode apresentar limitações devido ao processo de composição temporal.

**Tabela 2 – Critérios para a composição temporal**

PONTUAÇÃO	TIPO	DESCRIÇÃO
0	NO DATA	Valores de preenchimento
1	BAD	Dado derivado de pixel defeituoso ou mal corrigido
2	HIGHVIEW	Dado com alto ângulo de visão (60° ou mais)
3	LOWSUN	Dado com alto ângulo de zênite solar (85° ou mais)
4	CLOUDY	Dado sinalizado como nuvem ou adjacente a nuvem
5	SHADOW	Dado sinalizado como sombra de nuvem
6	UNCORRECTED	Dado sinalizado como não corrigido
7	CLIMAEROSOL	Dado sinalizado como contendo níveis normais de aerossol
8	HIGHAEROSOL	Dado sinalizado como contendo níveis altos de aerossol
9	SNOW	Dado sinalizado como neve
10	GOOD	Dado que não atende a nenhum critério anterior

Fonte: Adaptada de (NASA, 2015)

**Tabela 3 – Bandas espectrais do produto MOD09Q1**

BANDA	FAIXA ESPECTRAL	RADIAÇÃO	UNIDADE	TIPO
1	620 - 670 nm	Vermelho visível	Reflectância	Inteiro - 16 bits
2	841 - 876 nm	Infravermelho próximo	Reflectância	Inteiro - 16 bits

Fonte: Adaptada de (NASA, 2015)

**Tabela 4 – Bandas espectrais do produto MOD09A1**

BANDA	FAIXA ESPECTRAL	RADIAÇÃO	UNIDADE	TIPO
1	620 - 670 nm	Vermelho visível	Reflectância	Inteiro - 16 bits
2	841 - 876 nm	Infravermelho próximo	Reflectância	Inteiro - 16 bits
3	459 - 479 nm	Azul visível	Reflectância	Inteiro - 16 bits
4	545 - 565 nm	Verde visível	Reflectância	Inteiro - 16 bits
5	1230 - 1250 nm	Infravermelho de ondas curtas	Reflectância	Inteiro - 16 bits
6	1628 - 1652 nm	Infravermelho médio	Reflectância	Inteiro - 16 bits
7	2105 - 2155 nm	Infravermelho distante	Reflectância	Inteiro - 16 bits

Fonte: Adaptada de (NASA, 2015)

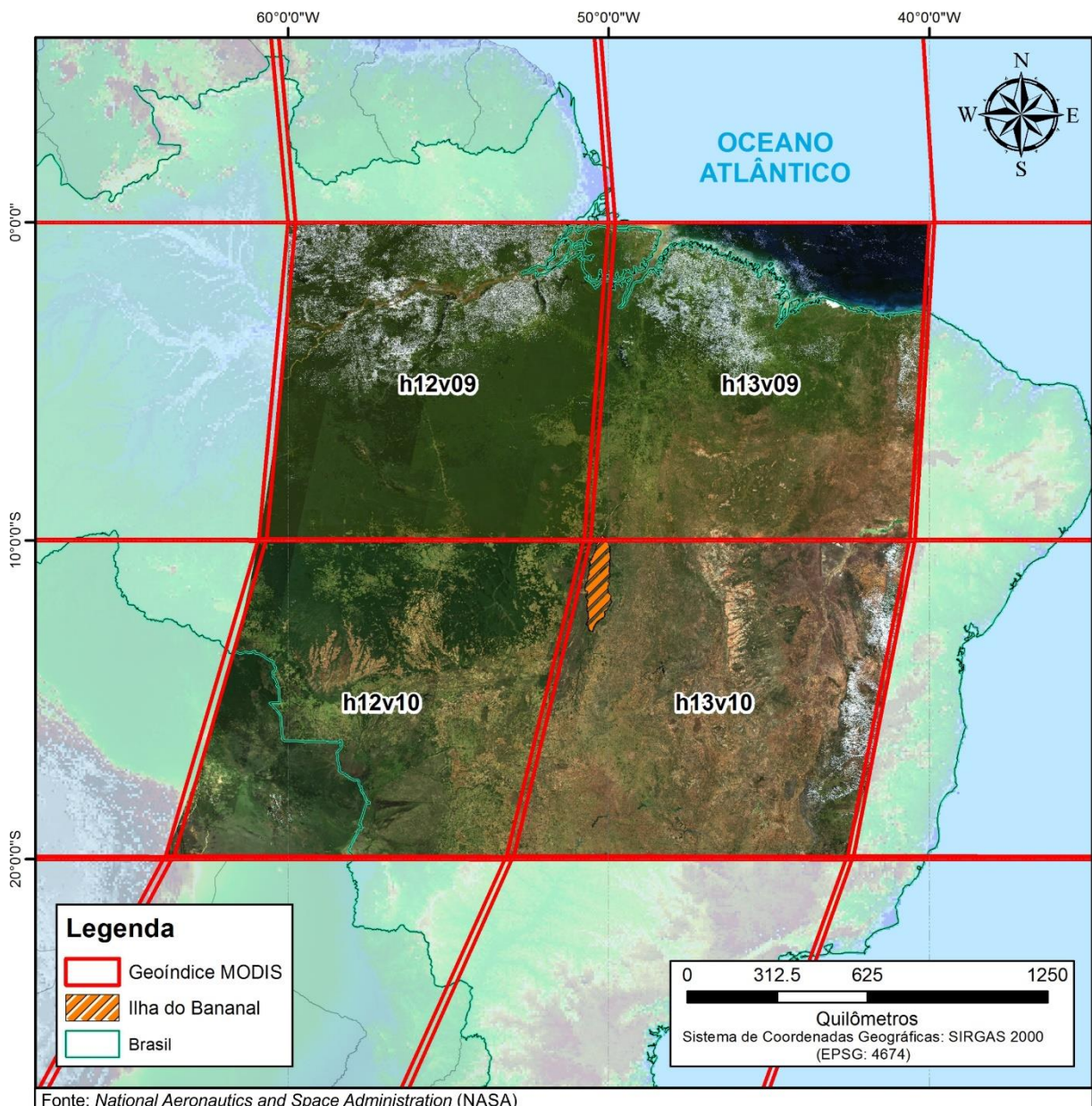
As imagens de composição temporal dos produtos terrestres do sensor MODIS selecionam para cada pixel a melhor observação dentro da janela temporal de 8 ou 16 dias, considerando as variáveis da Tabela 2 e o menor ângulo de visão (NASA, 2015). Tais critérios favorecem a seleção de observações que reflitam as características da superfície terrestre eliminando interferências atmosféricas, posicionais e cobertura por neve, gelo ou água.

Para a realização desta pesquisa serão utilizados dois produtos complementares, o MOD09Q1 e o MOD09A1. O primeiro produto (MOD09Q1) fornece apenas as bandas 1 e 2



de reflectância da superfície em uma resolução espacial de 250 metros e no nível 3 de processamento, cuja composição temporal é de 8 dias. O segundo produto (MOD09A1) fornece as bandas 1 a 7 de reflectância da superfície em uma resolução de 500 metros e demais características análogas (Tabelas 3 e 4).

Devido à localização da Ilha do Bananal, foi necessária a aquisição de quatro cenas da grade MODIS com 10 graus (1.200 km) de aresta (h12v09, h12v10, h13v09 e h13v10) (Figura 5). O período de aquisição das imagens compreende os anos completos de 2001 até 2015.



**Figura 5 – Cenas adquiridas do sensor MODIS**

Por se tratar de um produto composto por oito dias, cada ano possui 46 imagens, exceto o ano de 2001 cuja imagem referente ao dia 168 foi excluída do produto devido à falha na coleta

de dados. Para corrigir essa ausência uma imagem foi gerada por meio de interpolação na etapa de tratamento de ruídos, garantindo que todos os anos tivessem a mesma quantidade de imagens.

Portanto, a série temporal MODIS utilizada engloba um período de quinze anos com intervalos compostos de oito dias resultando em um conjunto de 690 imagens. Ao se considerar as sete bandas espectrais e as quatro cenas distintas foram utilizadas 19.320 imagens. Para se trabalhar com essa grande quantidade de dados as etapas de pré-processamento são fundamentais.

Os dados brutos são armazenados e disponibilizados no formato HDF-EOS (*Hierarchical Data Format- Earth Observing System*) e em projeção Sinusoidal (*Integerized Sinusoidal Projection - ISIN*). As imagens de formato HDF-EOS foram convertidas para o formato GeoTiff e projetadas para o sistema de coordenadas geográficas com *datum* WGS-84 (*World Geodetic Systems of 1984*) por meio do programa MODIS Reprojection Tool (MRT) (DWYER; SCHMIDT, 2006; JUSTICE et al., 2002; SANTHANA VANNAN et al., 2011). Inicialmente, as imagens não foram projetadas em UTM (Universal Transversa de Mercator) por extrapolar diversos fusos, sendo feito apenas após o recorte da área de interesse. O programa MRT utilizado foi desenvolvido para facilitar o uso dos dados MODIS fornecendo ferramentas

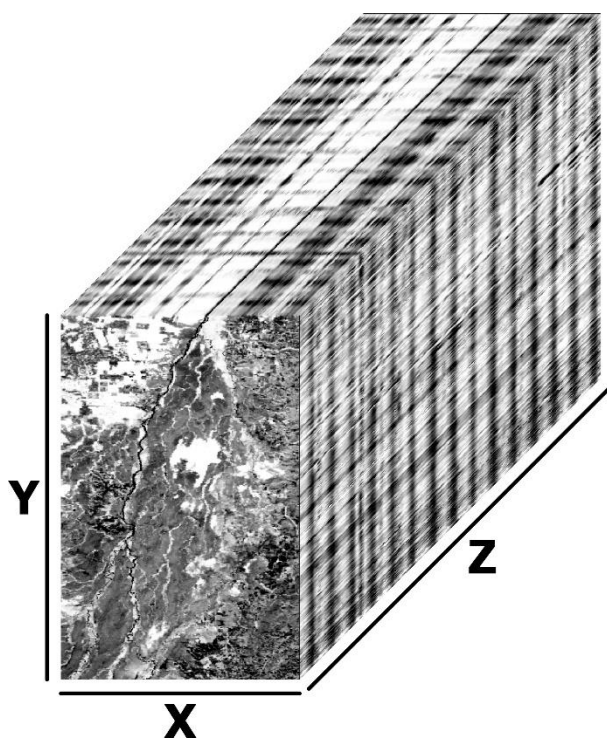


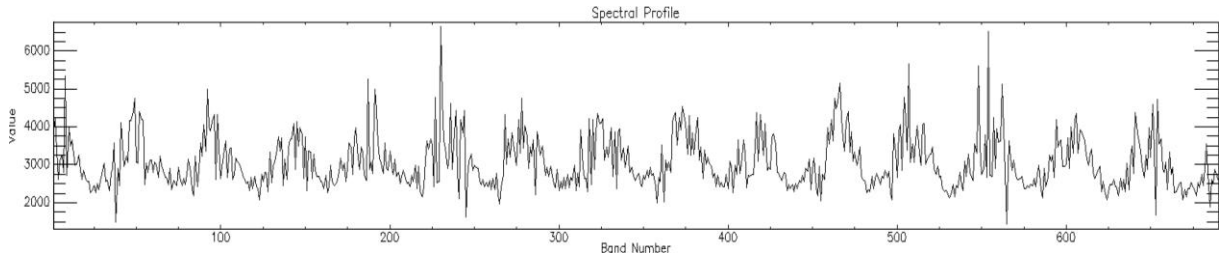
Figura 6 – Cubo Temporal

de projeção, conversão de formato e reamostragem espacial e espectral que podem ser acionadas por meio da interface gráfica ou em lotes de processamento por meio da linha de comando do sistema operacional (LPDAAC, 2011). Após essas conversões, um mosaico das quatro cenas MODIS foi elaborado.

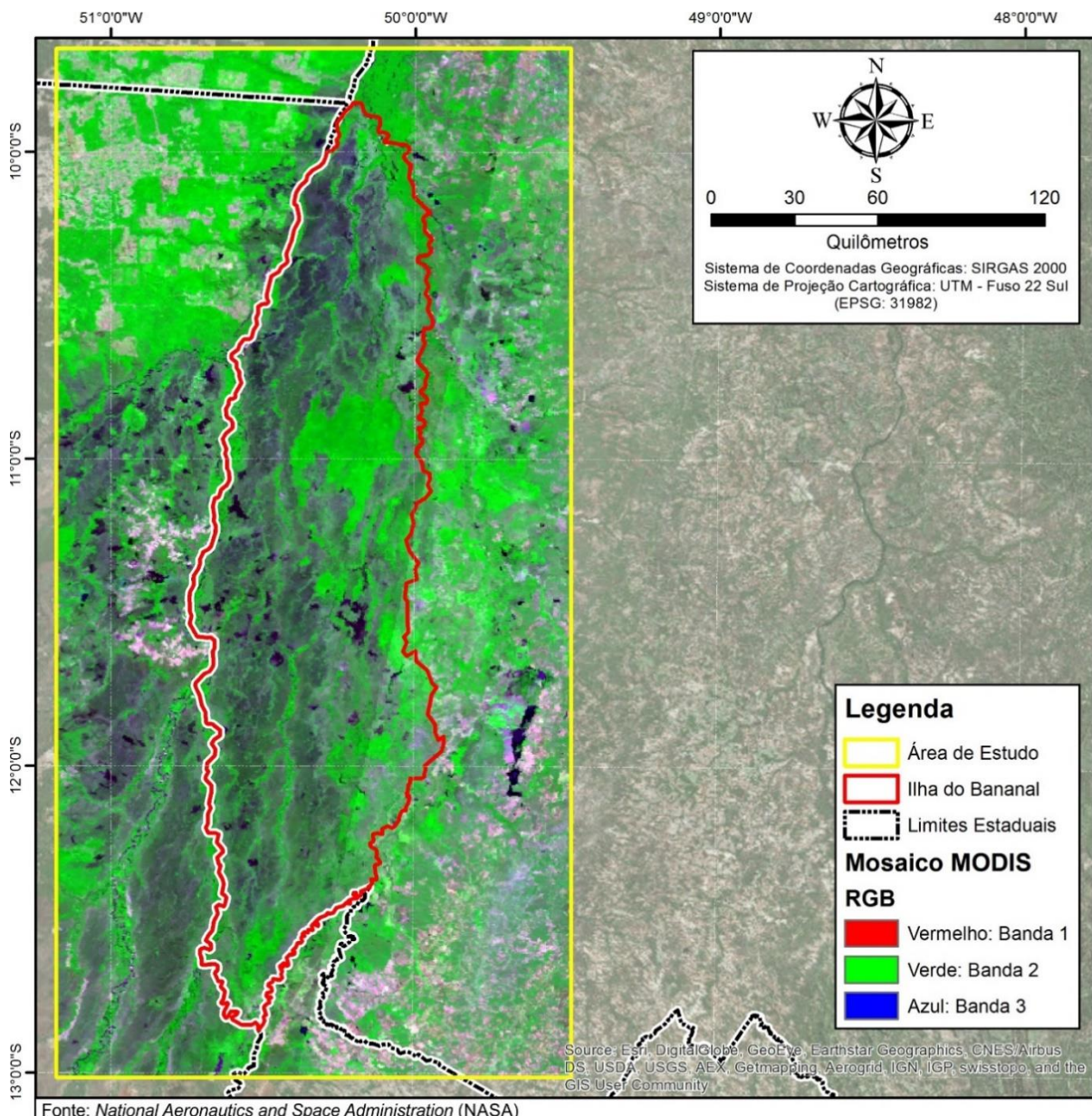
A etapa seguinte consiste no empilhamento sequencial das imagens de cada banda espectral ordenadas por data resultando em um cubo espaço-temporal (HENGL et al., 2011) onde os eixos X (linhas) e Y (Colunas) representam a matriz georreferenciada e o eixo Z representa o



comportamento de cada célula ao longo do tempo. A Figura 6 demonstra um cubo temporal com suas três dimensões, enquanto na Figura 7 é possível ver a assinatura temporal extraído do eixo Z, representando a variação dos valores do *pixel*, ambos extraídos da banda do infravermelho próximo (banda 2). A partir de então, cada cubo espaço-temporal foi recortado na área de interesse e projetados em UTM no fuso 22 (Figura 8).



**Figura 7 – Perfil do espectro temporal original**



**Figura 8 – Delimitação da área de estudo**

Por fim, foram selecionados os cubos das bandas 1 e 2 do produto MOD09Q1, com resolução espacial é de 250 metros; e as bandas 3 a 7 do produto MOD09A1, com resolução original de 500 metros, foram reamostradas a 250 metros para que seja possível compatibilizar os dois conjuntos de dados. A redução do tamanho original do pixel das bandas de menor resolução espacial não aperfeiçoa a qualidade do dados, simplesmente o compatibiliza para utilização em conjunto com as bandas 1 e 2, preservando, assim, os dados do produto de maior resolução. A partir das características do sensor e dos procedimentos de pré-processamento pode se considerar que o trabalho será realizado em uma escala aproximada de 1:1.000.000.

### **3.2. Tratamento de Ruído**

#### **3.2.1. Métodos de Filtragem**

A presença de ruídos dificulta a análise das assinaturas temporais, sendo necessária a aplicação de técnicas de filtragem para eliminação de irregularidades. Diversos tipos de filtragem têm sido aplicados em dados de sensoriamento remoto, tais como: Transformada de Fourier, Transformada de Wavelet, MNF (*Maximum Noise Fraction*) e Filtro de Mediana.

CAI et al. (2014) utiliza a Transformada de Fourier para eliminar ruídos em séries temporais NDVI do sensor MODIS. O filtro decompõe o sinal periódico em diversas frações a partir de funções de seno e cosseno, identificando ruídos e recompondo o sinal original. Esse filtro se limita a áreas onde há pouca atividade humana e forte periodicidade natural, possibilitando a filtragem de ruídos não sistemáticos.

OTHMAN; SHEN-EN (2006) aplica a Transformada de Wavelet em conjuntos de dados hiperespectrais, apontando para a vantagem dessa técnica em situações que as estatísticas de ruído variam significativamente entre as regiões do espectro eletromagnético, principalmente em relação à amplitude do sinal e à razão sinal-ruído.

CARVALHO JUNIOR et al. (2014) utiliza o MNF para filtragem de ruídos em imagens hiperespectrais, método que calcula a razão entre sinal e ruído e separa esses componentes por meio de transformação linear.

Considera-se que a interferência mais comumente encontrada no conjunto de dados em questão é o ruído de impulso, que assume valores de cinza mínimos e máximos se comparados aos pixels nas imediações. Também chamado de ruído “sal e pimenta”: sal quando



o pixel é de maior intensidade que seus vizinhos e pimenta quando de menor intensidade (SHALIMETTILSHA; ANTO KUMAR, 2014).

A cobertura de nuvens, cuja presença implica em uma resposta espectral de valor elevado em relação aos pixels de sinal para todas as sete bandas do sensor MODIS, se encaixa na definição de ruído de impulso. Dessa maneira, o filtro a ser aplicado nesta pesquisa é baseado no Filtro de Mediana, considerado uma das técnicas mais utilizadas e confiáveis para remoção de ruído impulsivo (YUGANDHAR; NAYAK, 2014).

O Filtro de Mediana Padrão é uma técnica de suavização não linear, que preserva mudanças abruptas no sinal ao mesmo tempo em que elimina impulso (ATAMAN et al., 1981). Sua implementação é simples e se dá por meio de uma janela amostral de tamanho  $2N + 1$  que percorre um sinal de extensão  $L$ , substituindo o valor central da janela pelo valor da mediana do fragmento  $2N+1$ . No início e no fim do sinal de extensão  $L$  são acrescentados  $N$  elementos de valor constante e igual às unidades iniciais e finais da série original. Isso se dá somente para que seja possível compor o cálculo da mediana nos extremos do sinal, preservando a extensão  $L$  no resultado do filtro (GALLAGHER; WISE, 1981).

Nota-se, entretanto, que a aplicação uniforme desse filtro no tratamento de imagens ou séries de dados tende a modificar tanto pixels de ruído quanto de sinal. Conseqüentemente, a remoção efetiva das interferências ocorre mediante a distorção das características originais. Para evitar que dados corretos sejam danificados, foi introduzida a detecção de impulso, cujo resultado indica quais pixels foram corrompidos por ruídos e, por conseguinte, devem ser modificados pelo processo de filtragem (ZHANG, S.; KARIM, 2002; ZHOU; ZHANG, 1999).

VARADE et al. (2013) examina diversas variações do Filtro de Mediana, com destaque para o Filtro de Comutação Mediana, também conhecido como Filtro de Mediana Baseado em Decisão, considerado uma versão com grau superior de aprimoramento. Sua aplicação se dá em duas etapas, sendo a primeira a fase de detecção de ruído, cuja identificação dos pixels corrompidos baseia-se em um limiar a ser definido por meio de critérios ou técnicas específicas e o resultado é a máscara de ruído. A segunda fase é a de cancelamento do ruído, utilizando a máscara para excluir do cálculo da mediana os pixels danificados e para selecionar os dados a serem corrigidos.

As variadas modalidades dos filtros de mediana são encontradas no tratamento de imagens digitais. KANNAN (2014) utiliza o Filtro de Mediana Baseado em Decisão em imagens digitais coloridas para remover ruído impulsivo do tipo sal e pimenta com alta

densidade. Na fase de detecção de pixels ruidosos, todas as células com valor 0 ou 255 são sinalizadas. Em seguida testa-se o valor mediano da janela. Caso seu valor não apresente ruído, ele será aplicado aos pixels sinalizados; caso contrário, ele passará por etapas de filtragem subsequentes.

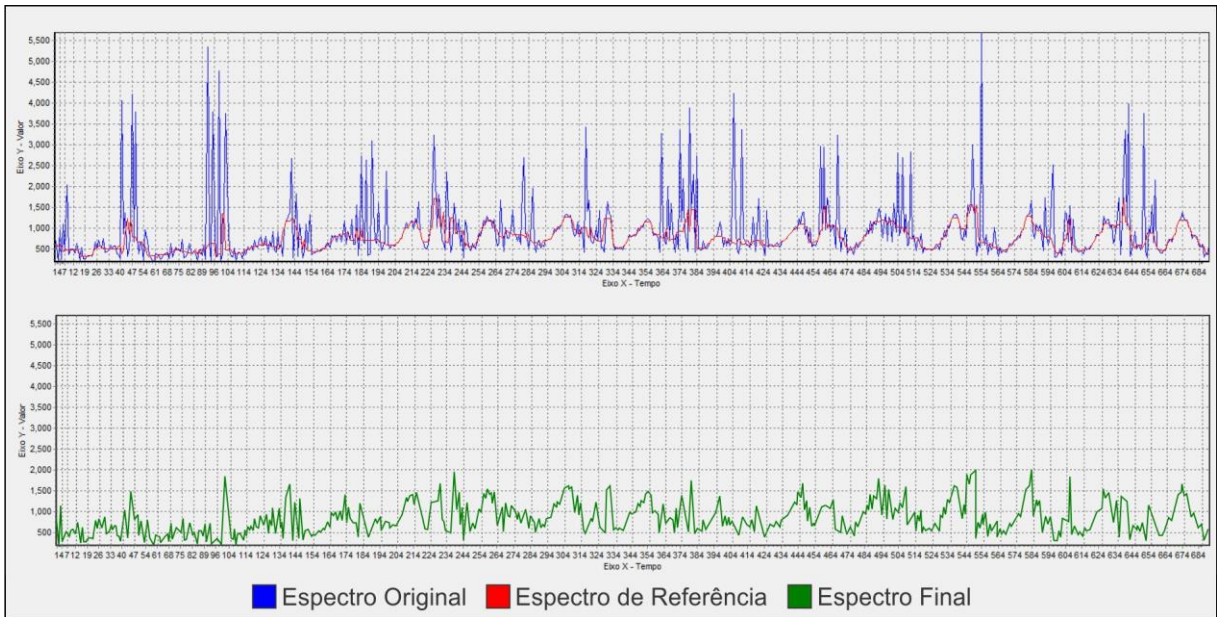
LIN et al. (2011) aborda o tratamento de imagens infravermelhas a partir do Filtro de Mediana Baseado em Decisão, privilegiando a velocidade do processamento e a premissa de que não seja imperativa nenhuma informação prévia a respeito dos dados, fazendo com que não seja necessária a definição de nenhum parâmetro. Em sensoriamento remoto o filtro de mediana tem sido utilizado para eliminação de ruído de impulso em séries temporais NDVI do sensor MODIS (CARVALHO JUNIOR et al., 2008; CARVALHO JUNIOR et al., 2012).

### **3.2.2. Filtragem dos ruídos de impulso**

O método de filtragem trata individualmente o perfil temporal de cada pixel. O filtro de mediana é aplicado ao longo da série temporal somente para identificar o ruído tipo impulso, podendo ser considerada como um Filtro Temporal de Mediana Baseado em Decisão. A filtragem temporal permite estimar os valores das zonas ruidosas por meio de interpolação linear, considerando que os dados apresentam um processo contínuo (JULIEN; SOBRINO, 2010).

O tamanho da janela é definido pelo usuário, percorrendo a série temporal com um passo igual a 1. Uma nova série temporal é elaborada com os valores das medianas. Essa série temporal suavizada pela mediana é subtraída da série temporal original, permitindo segmentar os ruídos de impulso a partir de um valor limite que é definido pelo operador. Assim, os pontos que ultrapassam o valor limite são considerados ruídos e são substituídos pelo valor da interpolação linear entre os dados vizinhos. O filtro pode ser aplicado tanto para picos positivos quanto para picos negativos. No caso das séries MODIS, os picos positivos indicam a presença de nuvens, já os negativos podem indicar áreas alagadas ou solos saturados.

O filtro foi aplicado separadamente para as sete bandas MODIS. A dimensão da janela utilizada foi 7, sendo aplicada somente aos picos positivos, com o objetivo de eliminar a presença de nuvens, preservar os eventos de inundação e evitar uma alteração significativa as informações originais. A Figura 9 exemplifica o processo de filtragem, demonstrando a série temporal original (azul); a suavizada pela mediana (vermelho); e a resultante corrigida (verde) com a substituição dos valores discrepantes pelos da interpolação linear.



**Figura 9 – Funcionamento do Filtro de Mediana**

### 3.3. Hipercubo Espectro-Temporal

Os processamentos digitais de imagens de sensoriamento remoto convencionalmente trabalham com imagens multibandas (multiespectrais ou multitemporais). Ambos os casos se tratam de um objeto tridimensional nos quais as dimensões X e Y representam as coordenadas geográficas das células e a dimensão Z reproduz a variação da reflectância do alvo ao longo do espectro eletromagnético em um único tempo (imagens multiespectrais) ou a variação no tempo em uma única região espectral (imagens multitemporais).

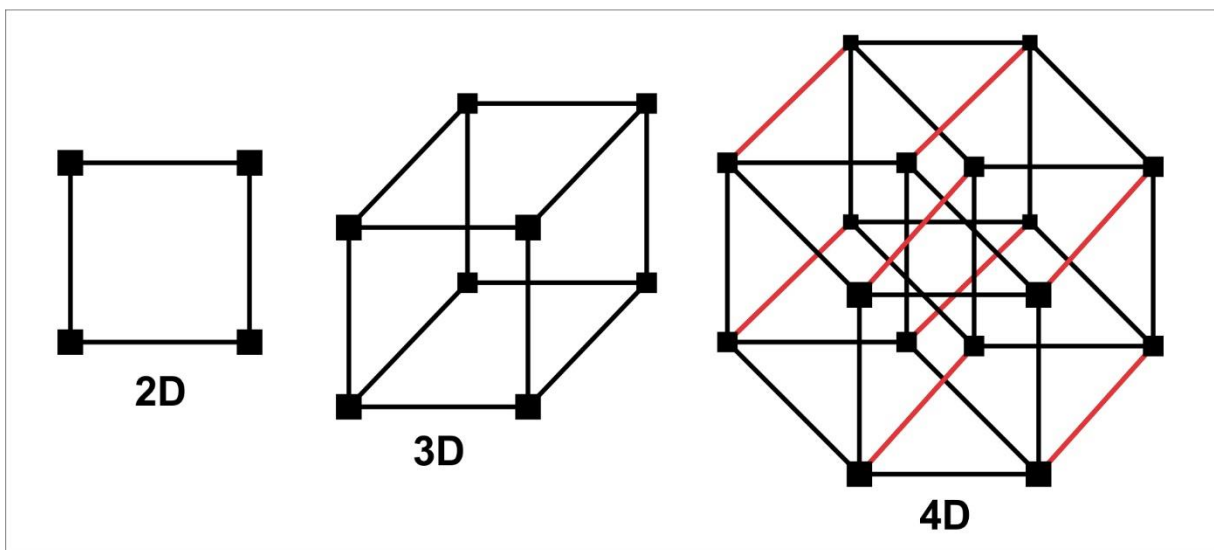
Neste trabalho, as dimensões espectrais e temporais serão trabalhadas em conjunto com o objetivo de agregar maior riqueza e profundidade à análise, além de maximizar o aproveitamento dos dados disponíveis. Da perspectiva técnica, permitirá a utilização de todas as 7 bandas MODIS em todos os 690 tempos da série. Já do ponto de vista analítico, proporcionará uma interpretação combinada entre a assinatura espectral dos alvos e suas respectivas mudanças sazonais.

Averigua-se que deve ser construído um arquivo cuja representação contém quatro dimensões: latitude, longitude, banda e tempo. Dessa forma um elemento nesse conjunto de dados assume sempre um valor independente para cada um desses parâmetros. A partir dessas constatações é necessário conceituar e descrever esse objeto tetradimensional.

Dentre os três polítopos regulares – simplexo, hipercubo e ortoplexo – considera-se o hipercubo o mais adequado para caracterizar a entidade a ser trabalhada, uma vez que sua forma

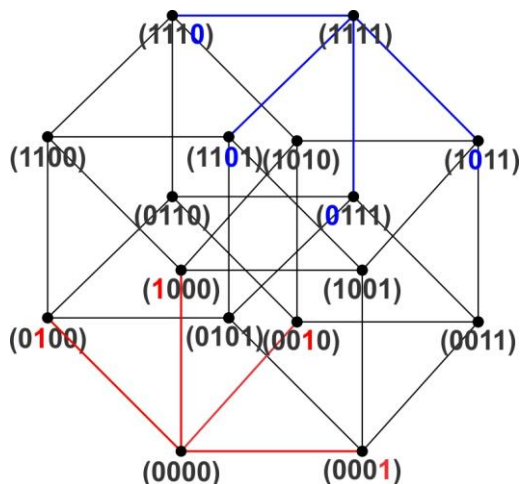
tridimensional é o cubo, formato do objeto utilizado até o momento: o cubo temporal (BLACHMAN, 1995). Não deve ser confundido com a denominação de hipercubo comumente utilizada no sensoriamento remoto para designar cubos multibandas construídos a partir de imagens hiperespectrais (MARTIN-HERRERO, 2007).

A Figura 10 apresenta a construção do hipercubo tetradimensional, podendo também ser referido como tesseracto, a partir de seus hiperplanos ( $nD - 1D$ ), que são suas formas mais elementares: o quadrado, com duas dimensões; e o cubo, com três. Nota-se que três de seus quatro conjuntos de oito linhas paralelas podem ser sempre considerados ortogonais entre si, estando destacado em vermelho na figura um dos conjuntos referidos.



**Figura 10 – Polítopos do Hipercubo: 2D (quadrado), 3D (cubo) e 4D (tesseracto)**

A concepção de um hipercubo tetradimensional é trabalhada por diversas esferas do conhecimento humano, começando pelas artes, em que Salvador Dalí aborda o tema por meio da obra *Corpus Hypercubus* (KEMP, 1998). É também utilizada para orientar a perspectiva axonométrica da computação visual, aplicada amplamente em jogos eletrônicos (KRIKKE, 2000). No campo das teorias cognitivas, sua abstração é empregada para relacionar linguagem, cultura e ética como elementos essenciais e interdependentes para apreensão do mundo (DELLA CHIESA, 2010) e, por fim, na concepção de representações para espaços virtuais não euclidianos (HENTHORNE, 2010).



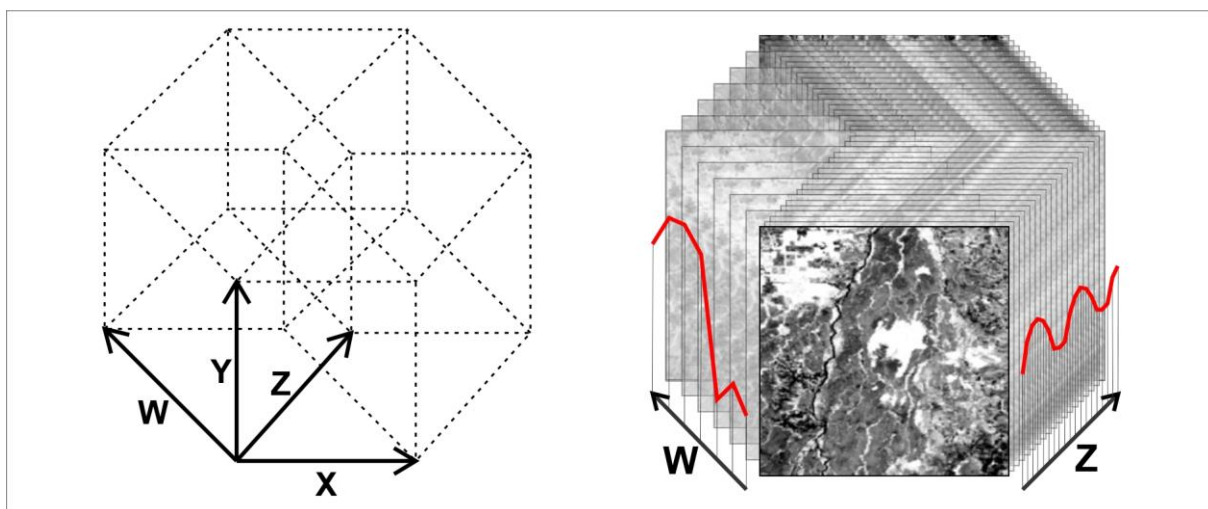
**Figura 11 – Vértices do Hipercubo**

computação paralela, integrada também em desenvolvimentos recentes às Redes Neurais Artificiais (RNAs) (STANLEY et al., 2009) e às redes de Petri (ZAITSEV; SHMELEVA, 2010).

Conclui-se é um conceito útil a diversas situações, entretanto a sua aplicação mais concreta é no processamento paralelo de dados, em que WALDROP (1988) considera uma quebra de paradigma o advento dos multiprocessadores cuja arquitetura baseia-se em hipercubos. HAMDI; SONG (1997) considera as redes hierárquicas de hipercubo (*Hierarchical Hypercube Networks - HHN*) como uma das topologias de interconexão mais versáteis e eficientes já concebidas para

A rede baseada em hipercubo consiste em  $N = 2^n$  vértices interconectados, ponto a ponto, por meio da seguinte regra: dois vértices cujo endereço binário difere em exatamente um bit são conectados. Cada bit corresponde a uma dimensão da rede (PADMANABHAN, 1990). A Figura 11 ilustra essa definição, contendo 16 vértices vinculados por meio da regra estipulada, com dois exemplos destacados pelas cores azul e vermelho.

Com base na descrição das propriedades geométricas do hipercubo e da demonstração de aplicações efetivas do conceito, propõe-se a definição do Hipercubo Espectro-Temporal, em que as quatro dimensões – latitude, longitude, bandas espectrais e tempo – são representadas pelos eixos X, Y, Z e W (Figura 12).



**Figura 12 – Hipercubo Espectro-Temporal**

O arquivo pode ser composto a partir de uma sequência de cubos temporais ou espectrais, que por sua vez são compostos de imagens individuais, sendo necessário informar a quantidade de tempos e de bandas. Depreende-se, portanto, que a assinatura espectral do alvo é assimilada por meio da variação de uma célula no eixo W, enquanto a fenologia pela variação no eixo Z. Destaca-se também a possibilidade de compreender a variação da assinatura espectral ao longo do tempo ao se considerar a variação de ambos os eixos simultaneamente.

Para a construção do novo objeto todos os cubos temporais foram empilhados em um só arquivo com 4.380 imagens individuais, o qual foi inserido no *software* de geoprocessamento desenvolvido pelo Laboratório de Sistemas e Informações Espaciais (LSIE) do Departamento de Geografia da Universidade de Brasília. A partir de então informa-se a quantidade de tempos e bandas espectrais para que o cubo de imagens de entrada possa ser convertido no Hiper cubo Espectro-Temporal.

Durante esse procedimento, as bandas espectrais foram reordenadas para a sequência tradicional, do menor para o maior comprimento de onda. Portanto as bandas 3 e 4 originais, correspondentes à faixa do azul e do verde, foram movidas para o início do seguimento, resultando no sequenciamento das três bandas do espectro visível seguidas pela série do infravermelho.

### **3.4. Classificação e Teste de Acurácia**

O Hiper cubo Espectro-Temporal possui grande potencial para a análise da paisagem e suas transformações, entretanto a extração dessas informações depende do emprego de algoritmos capazes de interpretar esses dados. Os métodos de classificação são divididos em dois grupos principais: 1) supervisionados; e 2) automáticos ou não-supervisionados (HALDER et al., 2011).

Na classificação supervisionada, as classes já são conhecidas; enquanto na classificação automática não se tem conhecimento prévio quanto as características da região a ser mapeada. Uma desvantagem dos métodos supervisionados é o fato das amostras de treinamento não representarem necessariamente todas as possíveis classes da imagem, por outro lado, a classificação não-supervisionada pode apresentar classes que não sejam uteis ou informativas (VENKATESWARAN et al., 2013). No presente trabalho optou-se pelo método supervisionado tanto por já se ter conhecimento prévio da área a ser mapeada quanto pela necessidade de se obter classes específicas para subsidiar a análise desejada.

No escopo das classificações supervisionadas, as classes para treinamento dos algoritmos podem ser obtidas por amostragem espectral ou espacial. As amostras espectrais são coletadas a partir da seleção de algumas poucas curvas espectrais dos alvos a serem identificados. As amostras espectralmente puras dos componentes de uso do território são denominadas *endmembers* (LIU, T.; YANG, 2013). As amostras espaciais são definidas por meio de regiões de interesse (*Regions of Interest – ROI*) que englobam diversos pixels que sejam representativos da classe alvo na imagem, podendo ser aplicados em algoritmos como o *Random Forest* (RF) ou *Support Vector Machine* (SVM) (HAO et al., 2015).

Para este estudo foi priorizada a utilização de amostragem espectral devido à maior facilidade de distinguir alvos de interesse pela assinatura do espectro eletromagnético em áreas úmidas, uma vez que as feições a serem identificadas estão intimamente ligadas aos eventos de alagamento. Essa particularidade confere características bastantes discerníveis às classes de uso da terra, facilitando a seleção de amostras mais puras e sem interferência de outros alvos. Outra vantagem consiste na redução dos elementos de treinamento dos algoritmos, garantindo um processamento mais expedito.

Dentre os métodos para classificação espectral é possível citar o *Spectral Angle Mapper* (SAM) (KHALEGHI et al., 2014), o *Spectral Correlation Mapper* (SCM) (CARVALHO JÚNIOR; MENEZES, 2000) e o classificador por Mínima Distância Euclidiana (SU; NOGUCHI, 2013). Optou-se pelo método da Mínima Distância, ao se verificar que o SAM e o SCM são mais adequados para imagens hiperespectrais e em alguns casos apresentaram acurácia inferior à do método selecionado (MERÉNYI et al., 2014; NIDAMANURI; ZBELL, 2011).

O classificador pela Mínima Distância realiza o cálculo do quadrado da distância Euclidiana entre o espectro da amostra ( $i$ ) e o espectro do *pixel* ( $p$ ), que é inserido na classe  $i$  considerando a distância mínima encontrada entre todas as classes. Classifica-se dessa forma todos os *pixels* da imagem, sendo possível definir um limiar máximo para a distância entre o *pixel* e as amostras de treinamento, tornando a célula não classificada caso ultrapasse esse limite (LONG; SINGH, 2013; MESAS-CARRASCOSA et al., 2013). FRANKLIN; WILSON (1991) destaca que este algoritmo opera *pixel a pixel*, não considerando, desta forma, nenhuma característica espacial ou relação entre diferentes células.

Aplicou-se ao Hipercubo Espectro-Temporal o algoritmo da Mínima Distância a partir de duas bibliotecas espectrais distintas. A primeira buscou simplesmente separar as áreas de

alagamento das áreas secas, apresentando, portanto, apenas duas classes nas quais buscou-se representar todas as variações que se enquadrem nessas características, como solos encharcados e corpos d'água para a classe de alagamento; e solo exposto e vegetação seca para a classe de terra firme. A segunda biblioteca procurou representar as principais classes de uso da terra que sejam relevantes para a análise a ser empreendida: 1) Corpos d'Água; 2) Floresta Amazônica (Ombrófila); 3) Formações Florestais do Cerrado (Mata de Galeria e Floresta Semidecidual); 4) Cerrado Campestre (principalmente, para a região, pastagens naturais inundáveis); e 5) Áreas Antropizadas (áreas urbanas, solos expostos e agricultura, entre outros).

Destaca-se que não foi utilizado nenhum limite de distância para ambas as classificações, forçando, dessa forma, a classificação de todas as células das imagens das séries temporais. Essa opção é importante principalmente para a classificação de áreas úmidas, uma vez que foram determinadas somente duas classes e a identificação do limite entre elas é de difícil definição, por se tratar de uma mudança gradual.

A validação dos resultados foi realizada por meio da seleção de pontos de controle aleatórios dentro de cada classe em uma data específica e sua comparação a uma imagem Landsat de maior resolução e data equivalente. As imagens Landsat são adequadas para aferir a acurácia da classificação das imagens MODIS, uma vez que possui uma série temporal consistente ao longo de todo o período do estudo, facilitando a seleção de datas análogas. Possui também uma resolução espacial consideravelmente superior à que está sendo validada, e a congregação das duas fontes de dados já é comumente empregada em pesquisas do campo do sensoriamento remoto (WULDER et al., 2012).

Apesar do número ideal de amostras ser equivalente para todas as classes, é possível ajustá-lo de acordo com a importância relativa de cada categoria para os objetivos do mapeamento ou também de acordo com a variabilidade inerente a cada classe de uso da terra, sendo a quantidade padrão de 50 amostras por alvo (CONGALTON, 1991). Essas amostras foram extraídas do resultado das classificações e sobrepostas às imagens Landsat equivalentes, onde, por meio de interpretação visual, identificou-se a qual classe aquele ponto de validação pertence no dado de referência.

As informações da classe encontrada para cada ponto de controle em ambas as instâncias foram inseridas em uma matriz de erro a partir da qual calculou-se o coeficiente *Kappa*. Este indicador estatístico, amplamente difundido na comunidade científica, afere a proporção da concordância entre as informações extraídas da imagem classificada e da imagem



de referência, eliminando também a possibilidade de conformidade aleatória (LIU, C. et al., 2007). O índice *Kappa* pode variar de 0 a 1, intervalo dentro do qual os resultados acima de 0,800 podem ser considerados como mapeamentos de alta acurácia (DUSSEUX et al., 2014).

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Resultados do Tratamento de Ruído

O resultado do Filtro Temporal de Mediana para as bandas 1 a 7 do sensor MODIS é apresentado respectivamente nas Figuras de 13 a 19. Em cada imagem constam as séries temporais de um pixel amostral antes (preto) e após (vermelho) à filtragem. As setas no gráfico indicam o registro do qual foram extraídas as amostrais A e B que correspondem a uma porção da imagem bruta (A) e tratada (B). Procurou-se evidenciar situações que demonstrem a significativa redução das interferências atmosféricas.

De maneira geral, percebe-se que foi possível alcançar um bom resultado no tratamento de ruído em imagens com presença de cobertura de nuvens. Um exemplo é a banda 4 (faixa do verde), do dia 8 de janeiro de 2013, que estava na sua totalidade revestida pelo ruído e a filtragem capacitou a visualização da superfície (Figura 16).

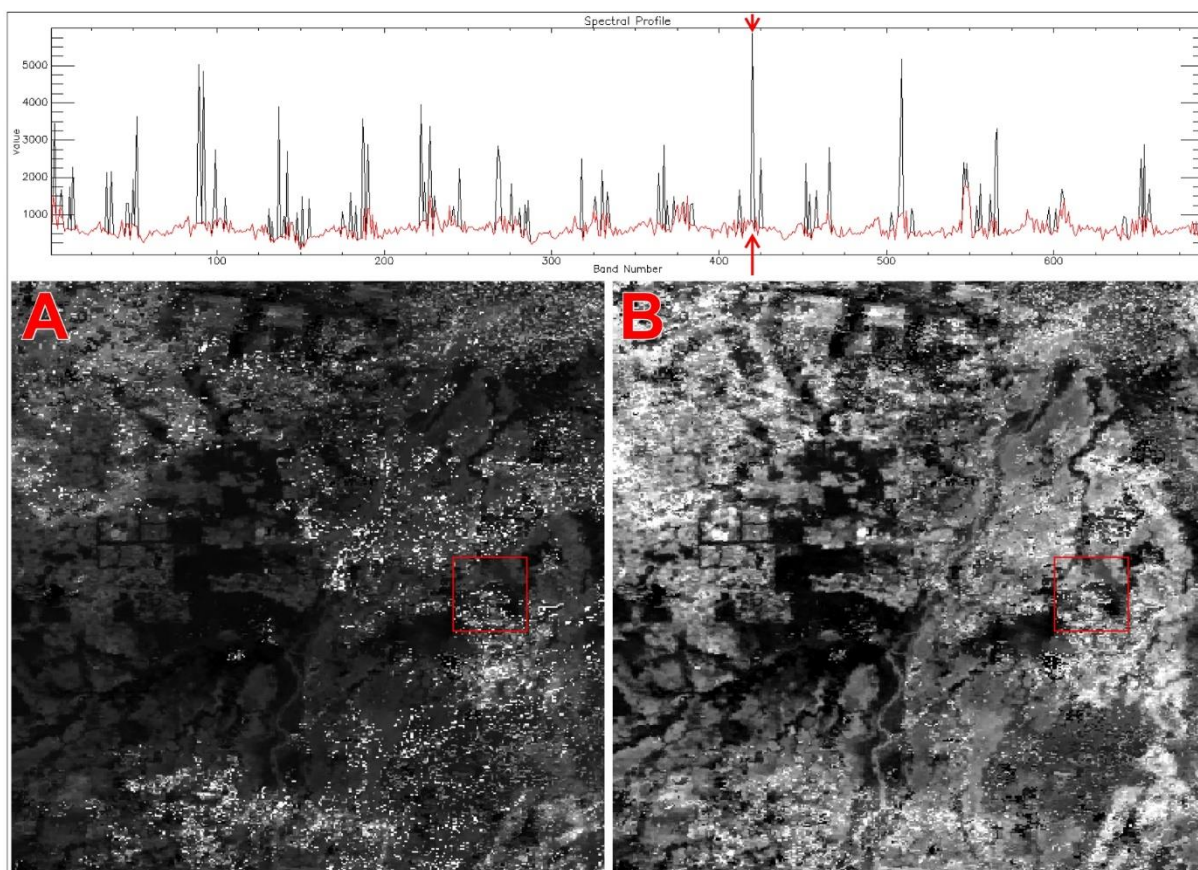
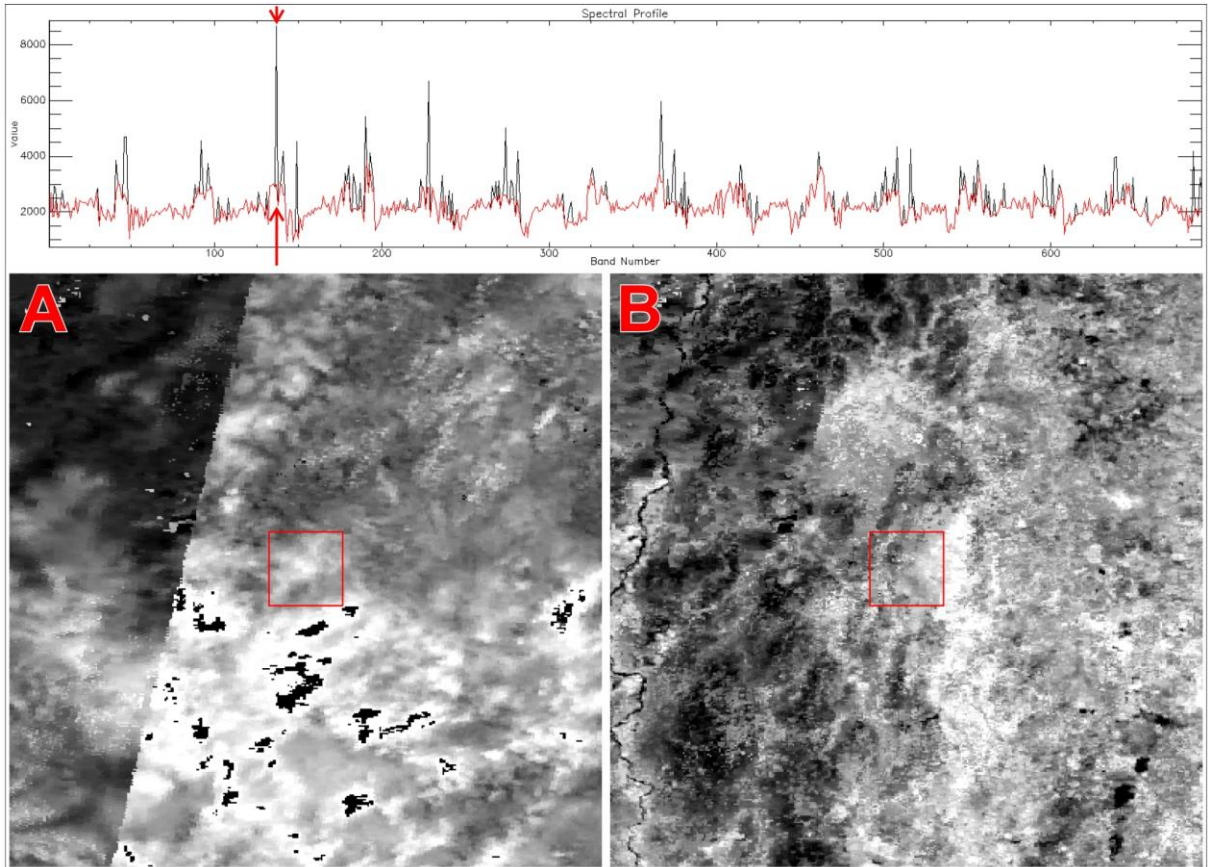
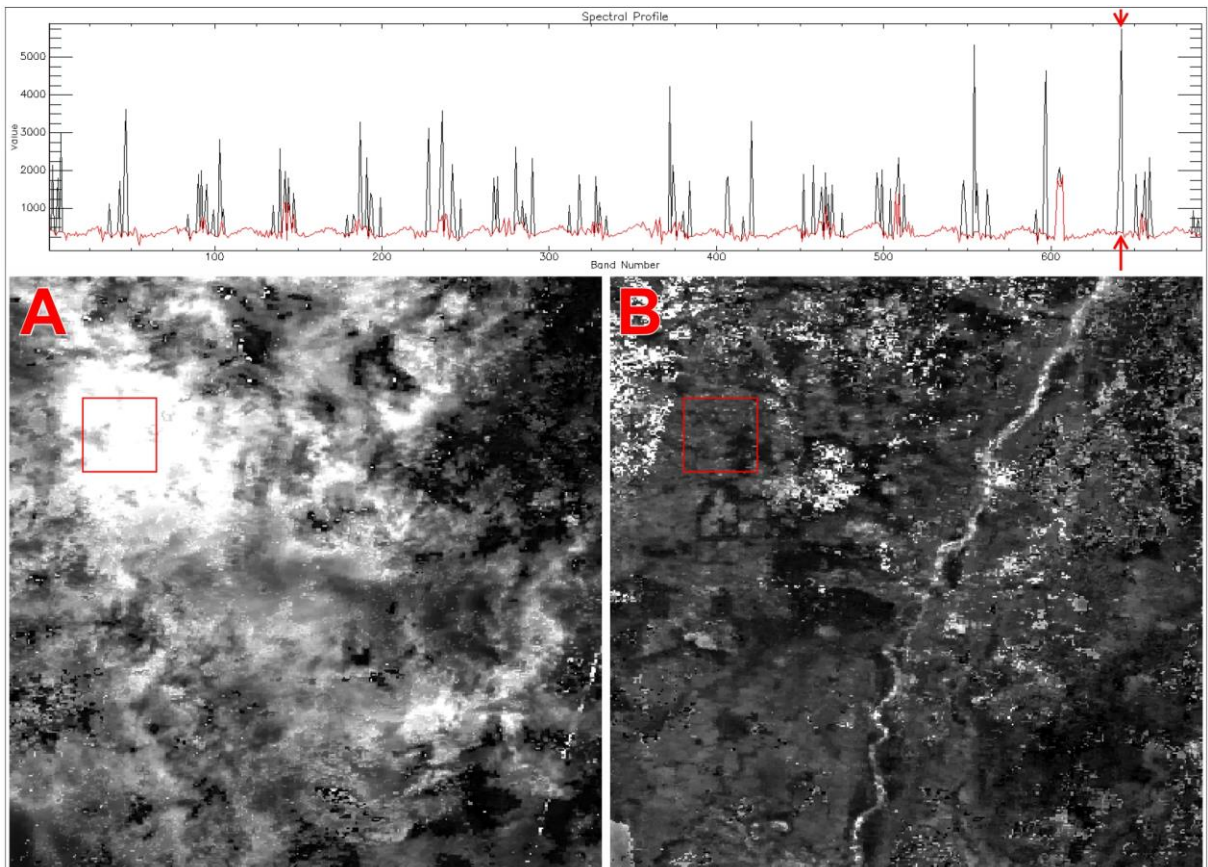


Figura 13 – Resultado do Filtro de Mediana na banda 1

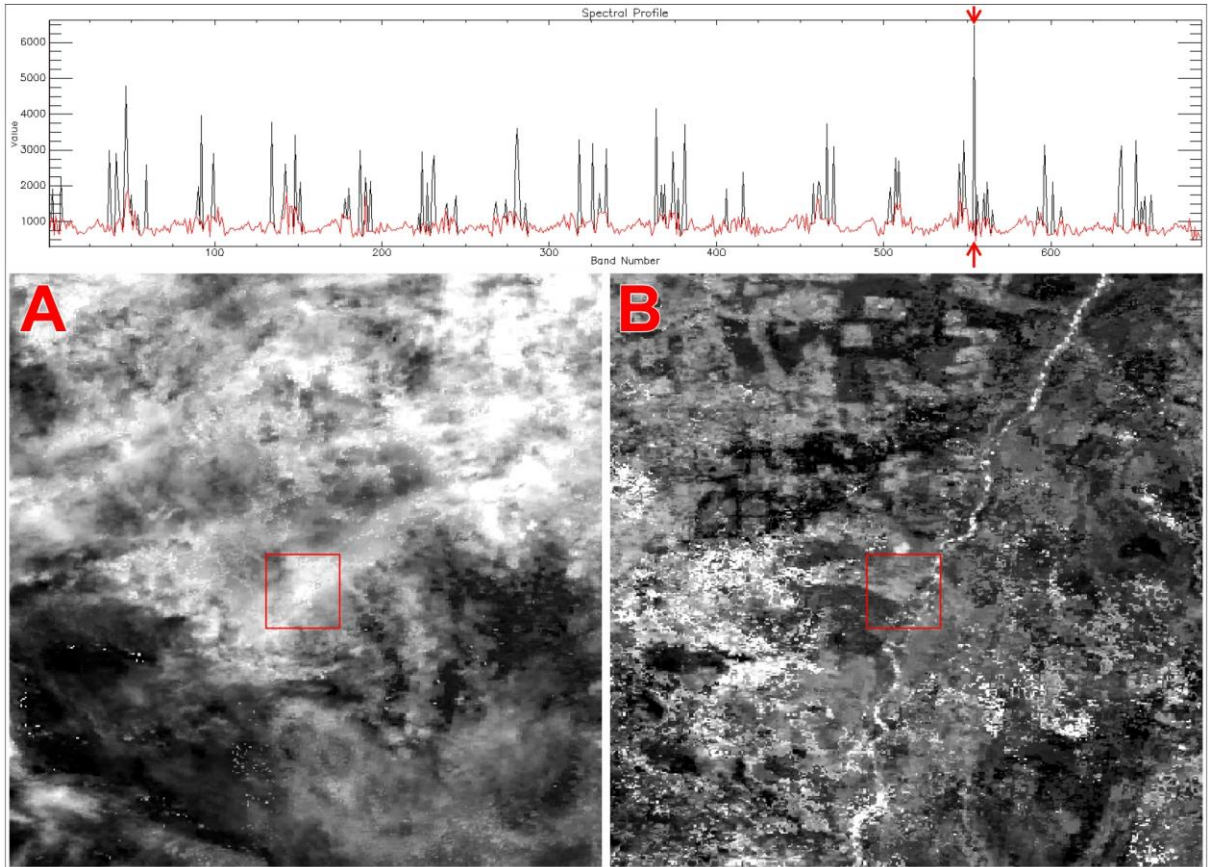


**Figura 14 – Resultado do Filtro de Mediana na banda 2**

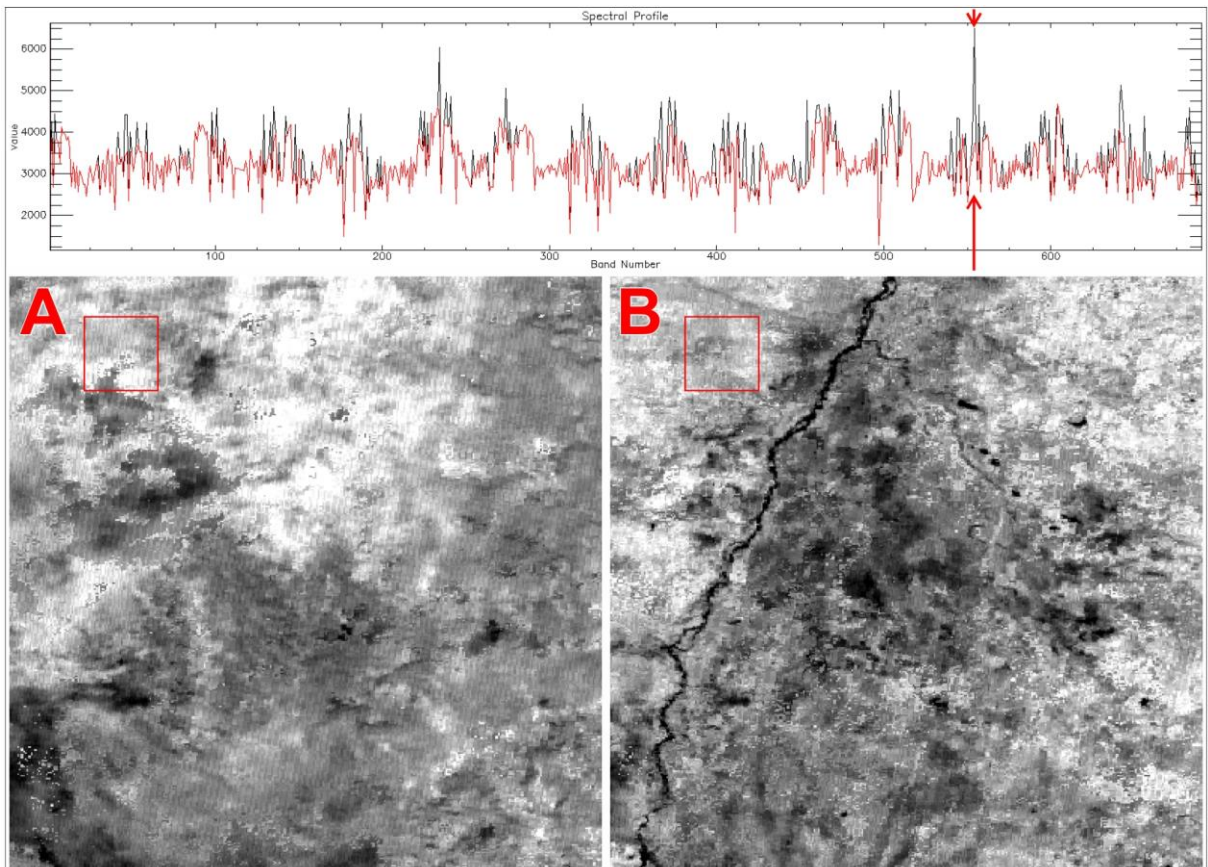


**Figura 15 – Resultado do Filtro de Mediana na banda 3**



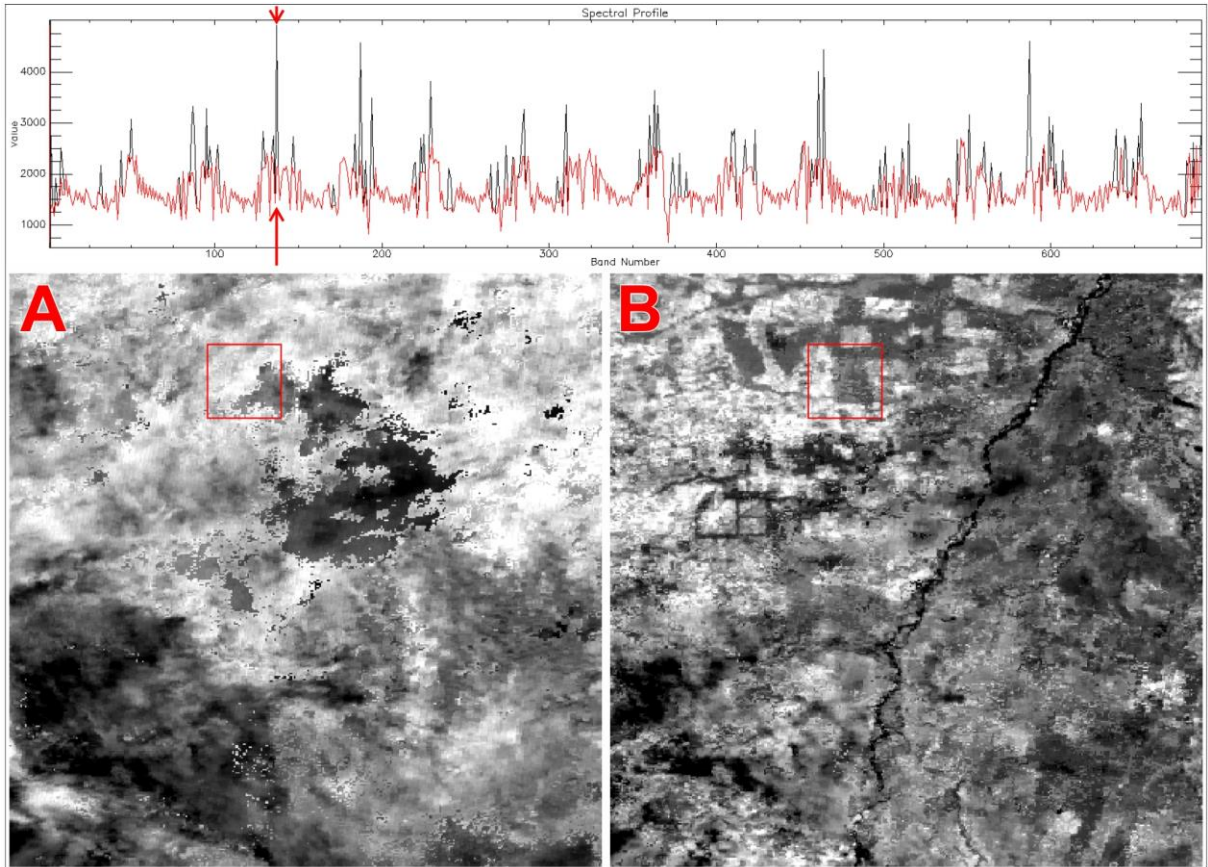


**Figura 16 – Resultado do Filtro de Mediana na banda 4**

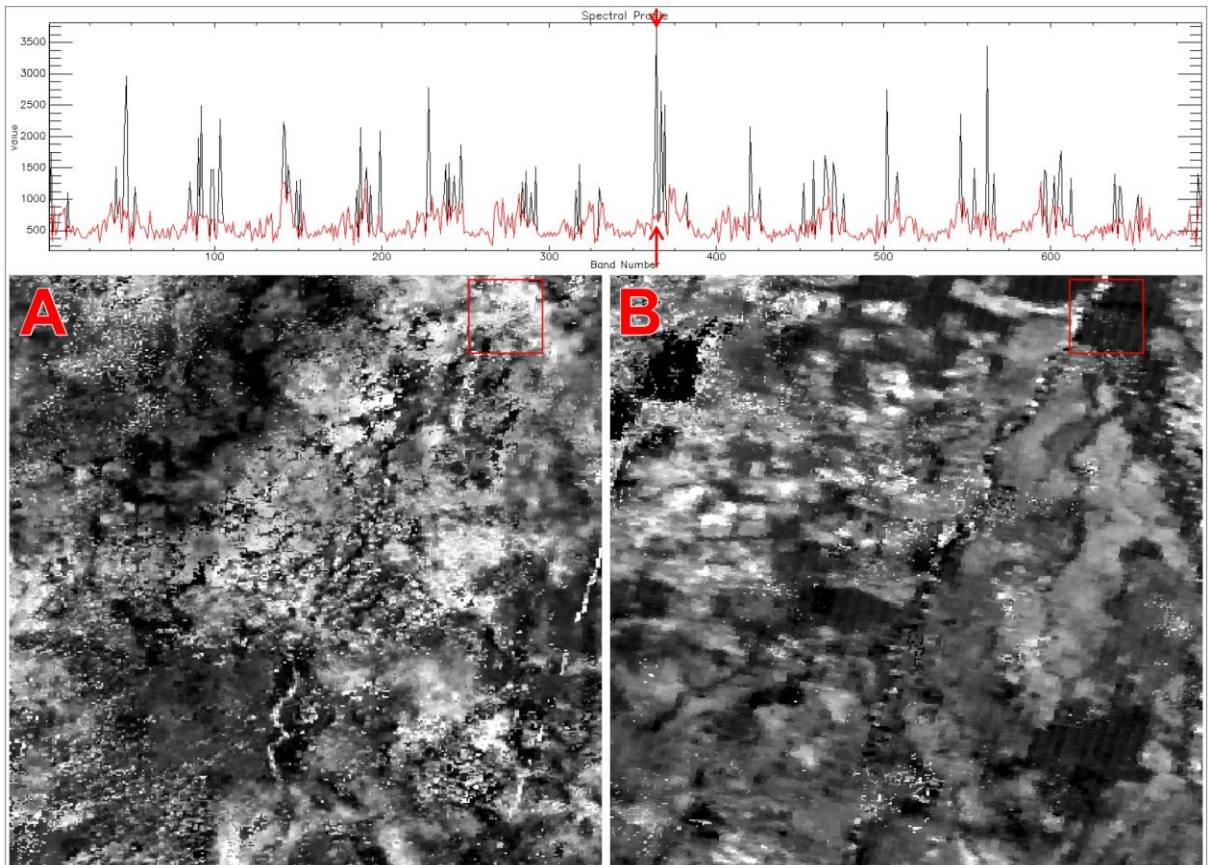


**Figura 17 – Resultado do Filtro de Mediana na banda 5**





**Figura 18 – Resultado do Filtro de Mediana na banda 6**



**Figura 19 – Resultado do Filtro de Mediana na banda 7**

Além da redução da propagação de ruído em um tempo particular da série de dados, chama-se atenção para a capacidade natural do filtro de mediana de cancelar interferências de grande amplitude (Figura 14), que corresponde à banda do infravermelho próximo do sensor MODIS. Nessa banda também se observa a correção de uma anomalia da imagem que se manifesta por meio da faixa aparente de tonalidade discrepante.

Nota-se também que as características do ruído variam significativamente ao longo do espectro eletromagnético, principalmente entre a região do visível e do infravermelho, na qual o componente de sinal em relação ao ruído é maior que na anterior. Na figura 17, correspondente ao infravermelho de ondas curtas da banda 5, constata-se que o valor do ruído é mais próximo dos valores de mediana que nas bandas do visível (Figuras 13, 15 e 16).

A Figura 19 demonstra à banda 7 do sensor MODIS, onde o resultado apresenta um aspecto relativamente embaçado. É possível que tal ocorrência seja proveniente do próprio Filtro de Mediana associado às características de ruído dessa banda específica, cuja aplicação pode apresentar efeito colateral de “desfocar” a imagem (ENG; MA, 2000). Este efeito, entretanto, diz mais respeito à aplicação espacial do Filtro de Mediana Padrão e não à variação temporal associada à detecção de impulso aplicada. Outra explicação pode ser dada a partir do próprio processo de reamostragem espacial, mas de qualquer maneira não deve interferir significativamente nos resultados.

#### **4.2. Classificação e Teste de Acurácia**

O resultado final desta pesquisa consiste em duas coleções de 690 imagens classificadas ao longo dos 15 anos de período do estudo, sendo a primeira coleção correspondente ao mapeamento de áreas alagáveis e a segunda ao mapeamento de uso da terra.

O resultado da classificação e sua análise será apresentado em três etapas. Primeiramente serão apresentadas as duas bibliotecas espectrais e seus respectivos *endmembers* utilizados para treinamento do algoritmo de classificação. Em seguida serão descritos e avaliados os resultados do teste de acurácia por meio do índice *Kappa*. Por fim serão apresentadas amostras mensais e anuais de ambas coleções de imagens em conjunto com uma análise multitemporal das informações obtidas pela aplicação da metodologia.

Esclarece-se que os resultados do teste de acurácia serão apresentados antes dos resultados da classificação para que quando da sua apreciação já se tenha conhecimento acerca

da qualidade dos produtos finais, facilitando a construção da análise multitemporal sobre os mapas a serem exibidos.

#### 4.2.1. Bibliotecas Espectrais

Para orientar o algoritmo de classificação supervisionada foram preparadas duas bibliotecas espectrais com as amostras de treinamento selecionadas a partir do Hipercubo Espectro-Temporal. Os critérios de seleção dos *endmembers* consideraram amostras espectralmente puras que abrangessem as variações de cada alvo, procurando sempre manter um número reduzido de amostras para se evitar a seleção de *endmembers* ambíguos ou redundantes e favorecer a celeridade do processamento.

O primeiro mapeamento procurou caracterizar a dinâmica hídrica da região da ilha do Bananal, principalmente nos períodos de enchente e vazante, assim como a extensão dos alagamentos. Para tanto selecionaram-se apenas amostras que representassem as classes de Áreas Alagadas e de Áreas Secas, como demonstrado na Biblioteca Espectral (Figura 20).

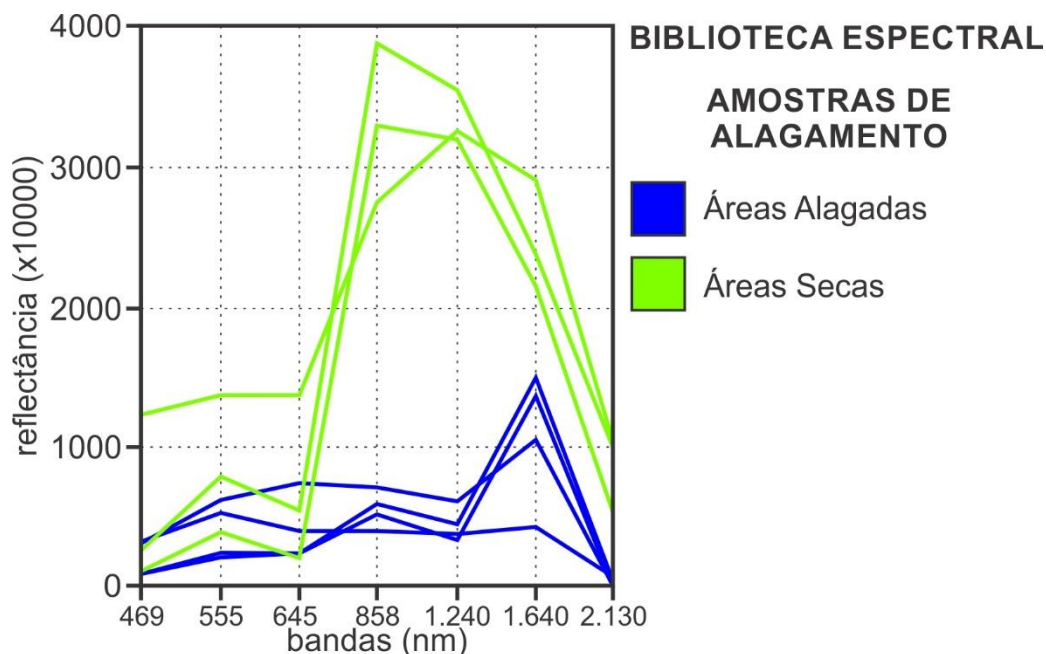
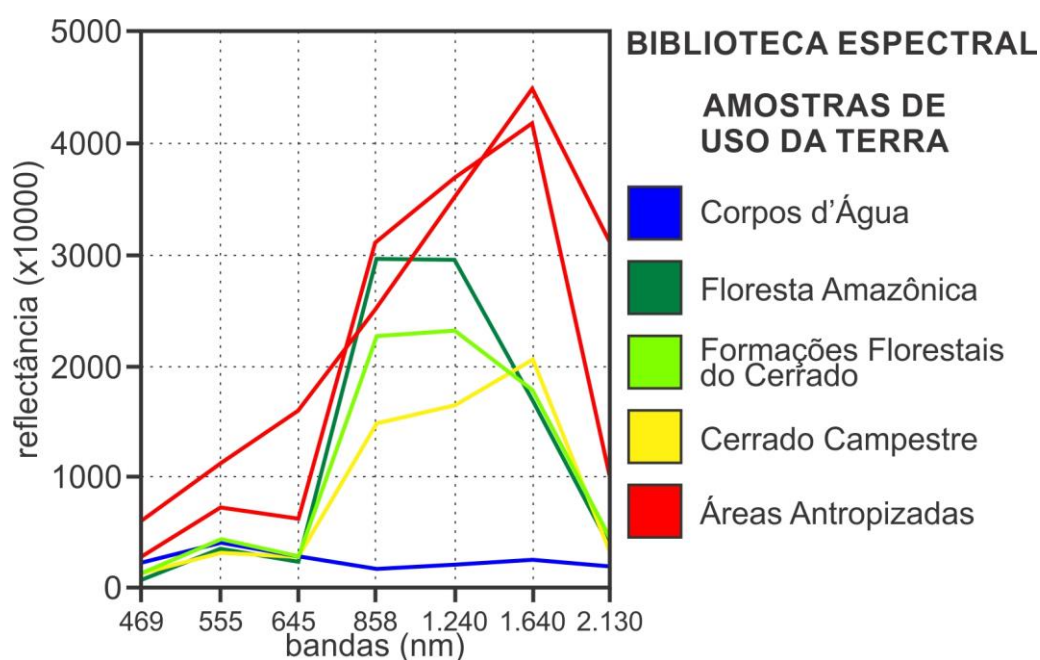


Figura 20 – Biblioteca espectral para o mapeamento da dinâmica de alagamento

Verifica-se que as amostras representativas das áreas de alagamento apresentam grande absorção de radiação eletromagnética, notadamente nas bandas do infravermelho, onde os *endmembers* dessa classe se diferenciam de maneira acentuada. Em alguns casos as amostras de áreas alagadas apresentam um pico na banda 6, representando espectros de solos encharcados. Já na classe de áreas secas averigua-se a situação oposta, onde a região espectral

do infravermelho apresenta alta emissão de radiação, principalmente se tratando de vegetação fotossinteticamente ativa sem a presença aparente de água e, no caso da amostra com valores altos para a região do visível, solo exposto.

A segunda biblioteca espectral foi concebida com o intuito de representar as principais fitofisionomias da região, sobretudo as formações relacionadas a dinâmica hídrica, e a evolução da antropização sobre o ambiente natural. Para tanto selecionaram-se amostras das 5 classes de uso da terra descritas anteriormente: 1) Corpos d'Água; 2) Floresta Amazônica; 3) Formações Florestais do Cerrado; 4) Cerrado Campestre; e 5) Áreas Antropizadas (Figura 21).



**Figura 21 – Biblioteca espectral para o mapeamento do uso da terra**

Assim como na biblioteca anterior, é evidente a característica de alta absorção da classe de água, exceto que neste caso buscou-se segregar apenas as principais massas d'água. Em relação às classes das formações florestais, procurou-se separar as florestas ombrófilas da região amazônica das demais encontradas no bioma Cerrado, como as florestas de galerias ou as formações semideciduais. Essa diferenciação pode ser verificada nas bandas 4 e 5 nas quais a Floresta Amazônica emite mais radiação devido à intensa atividade fotossintética proveniente da maior biomassa de um dossel mais robusto.

A classe de Cerrado Campestre abarca todas as formações em que predominam as gramíneas, inclusive a savana parque que sofre enchentes regulares. Apresenta menor resposta espectral nas bandas 4 e 5 pela menor intensidade da fotossíntese, entretanto, o pico na banda 6 pode ser explicado pela maior presença de solos na mistura espectral do *pixel*. A última classe,



Áreas Antropizadas, apresenta amostras representativas de solo exposto e área urbana, assim como de pastagens artificiais e culturas agrícolas.

Ambas as bibliotecas foram utilizadas para o treinamento do algoritmo da Mínima Distância. A qualidade da classificação do Hipercubo Espectro-Temporal foi aferida pelo teste de acurácia, cujo resultado é apresentado a seguir.

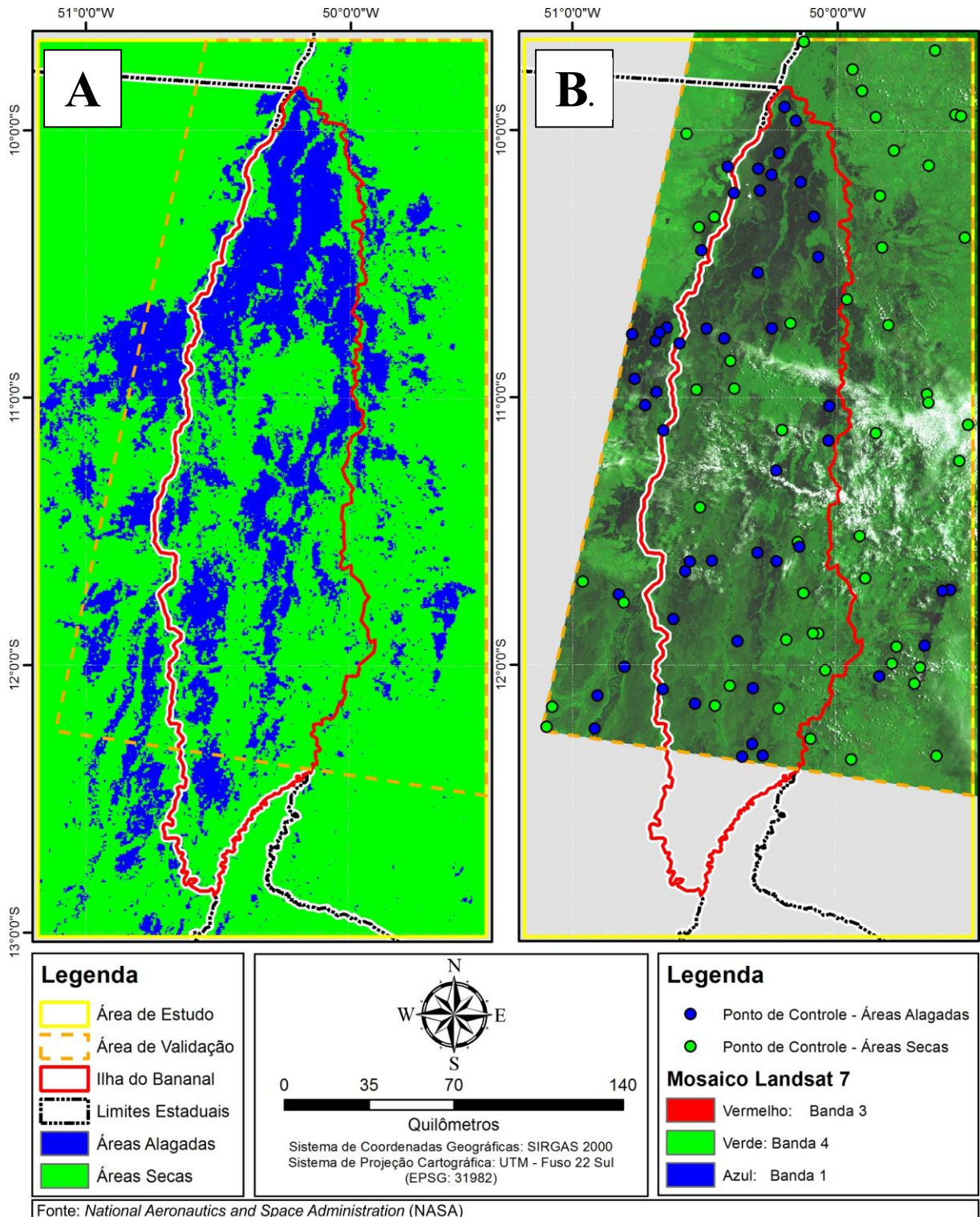
#### 4.2.2. Teste de Acurácia

A aplicação do teste de acurácia ocorreu de forma independente para os dois produtos. A aferição da qualidade do mapeamento das áreas alagadas utilizou 50 amostras aleatórias de cada classe, separadas por uma distância mínima de 250 metros, totalizando 100 pontos de controle (Figura 22). A imagem Landsat 7 ETM+ selecionada para a validação corresponde à data de 15 de março de 2002. Esta data precede o evento de maio de 2003, quando ocorreu o defeito no mecanismo que corrige os efeitos de deslocamento no campo de visada de imageamento do sensor ETM+. A escolha da imagem de validação considerou a presença de inundação e condições de baixa interferência atmosférica, condições essenciais para se obter uma boa distribuição das amostras de alagamento. A Figura 21 evidencia a concordância entre a classificação das áreas alagadas e a imagem de referência. As áreas alagadas são caracterizadas por regiões escuras das imagens Landsat ETM+ devido à maior absorção de radiação pela água.

Cada ponto de controle foi individualmente analisado em sobreposição à imagem Landsat por meio de interpretação visual. Os resultados dessa validação foram compilados na matriz de confusão (Tabela 5), sobre a qual foi calculado o coeficiente *Kappa*. A diagonal principal representa a concordância entre as duas fontes de dados, evidenciando que a maioria das amostras foi classificada corretamente e o mesmo número de pontos foi equivocadamente classificado para ambas as classes.

A Tabela 6 apresenta resultados do cálculo do coeficiente *Kappa* individual para cada classe. O nível de concordância da classe de área alagada e de terra são idênticos uma vez que os erros entre elas foram equivalentes, resultando em um *Kappa* geral de mesmo valor. O coeficiente aferido de 0,800 é considerado um bom resultado pela literatura consultada e permite concluir que o mapeamento realizado apresenta acurácia satisfatória (DUSSEUX et al., 2014).

A análise de acurácia foi aprofundada pela observação dos pontos de controle com erros, procurando a origem das divergências da classificação e identificando as limitações metodológicas ou da base de dados. A Figura 23 apresenta os mapas de detalhe de quatro amostras que exemplificam os locais onde o mapeamento de áreas alagadas não obteve êxito.



**Figura 22 – Teste de acurácia para o mapeamento de áreas alagadas. (A) Resultado da classificação; e (B) imagem de referência.**

**Tabela 5 – Matriz de erro do mapeamento de áreas alagadas**

		Classe de Referência		
		Água	Terra	Total
Classe Original	Água	45	5	50
	Terra	5	45	50
	Total	50	50	100

Fonte: Original do Autor

**Tabela 6 – Coeficiente *Kappa* do mapeamento de áreas alagadas**

	Água	Terra	Geral
<i>Kappa</i>	0.800	0.800	0.800

Fonte: Original do Autor

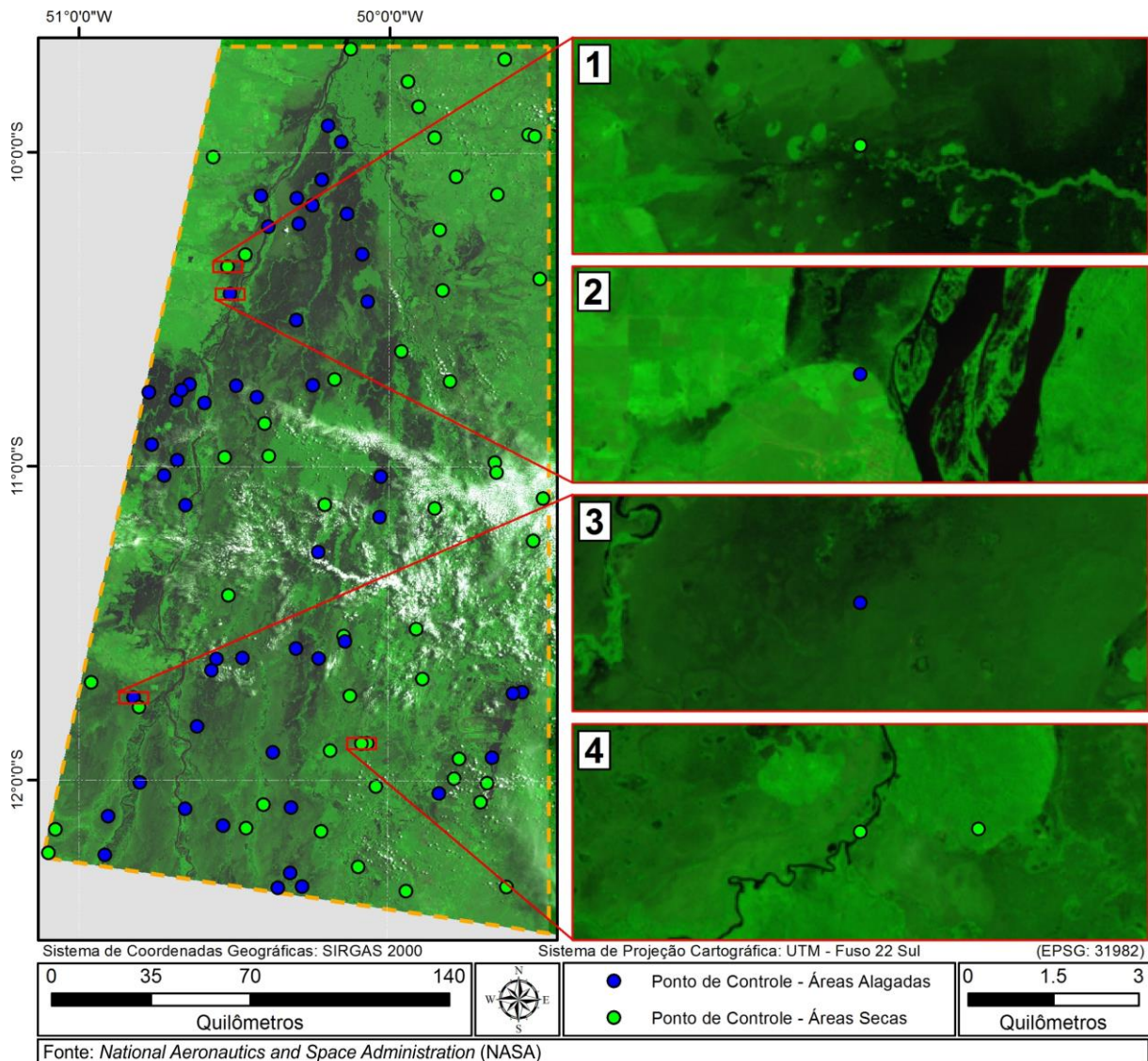
O primeiro caso apresenta um ponto de controle de área alagada que foi erroneamente classificado como áreas secas. Avalia-se que o desacordo tenha sido originado pelo fato dessa localidade apresentar uma rápida transição entre as duas feições além de possuir fragmentos de dossel florestal. Tais detalhes são de difícil distinção nas imagens MODIS com baixa resolução espacial.

O segundo exemplo apresenta um ponto de controle da classe de Áreas Alagadas que claramente se encontra em área seca. A diferença é proveniente da amostra ter sido extraída muito próxima à nítida linha de definição entre as duas classes e, novamente, o tamanho das células do dado original não foi apropriado para distingui-las.

O terceiro ponto de controle encontra-se em uma região de transição suave e gradual entre os solos encharcados e secos e, portanto, de difícil definição da linha limítrofe do alcance da inundação. Essa situação resultou na classificação do ponto como área alagada pelo algoritmo da Mínima Distância, enquanto a interpretação visual indicou pertencer à outra classe.

O quarto caso se trata de um ponto de controle sobreposto exatamente a um pequeno curso d'água demasiadamente estreito para ser distinguido na escala dos dados MODIS, fazendo com que o método de mapeamento não tenha identificado a presença da água e o classificasse como área seca.





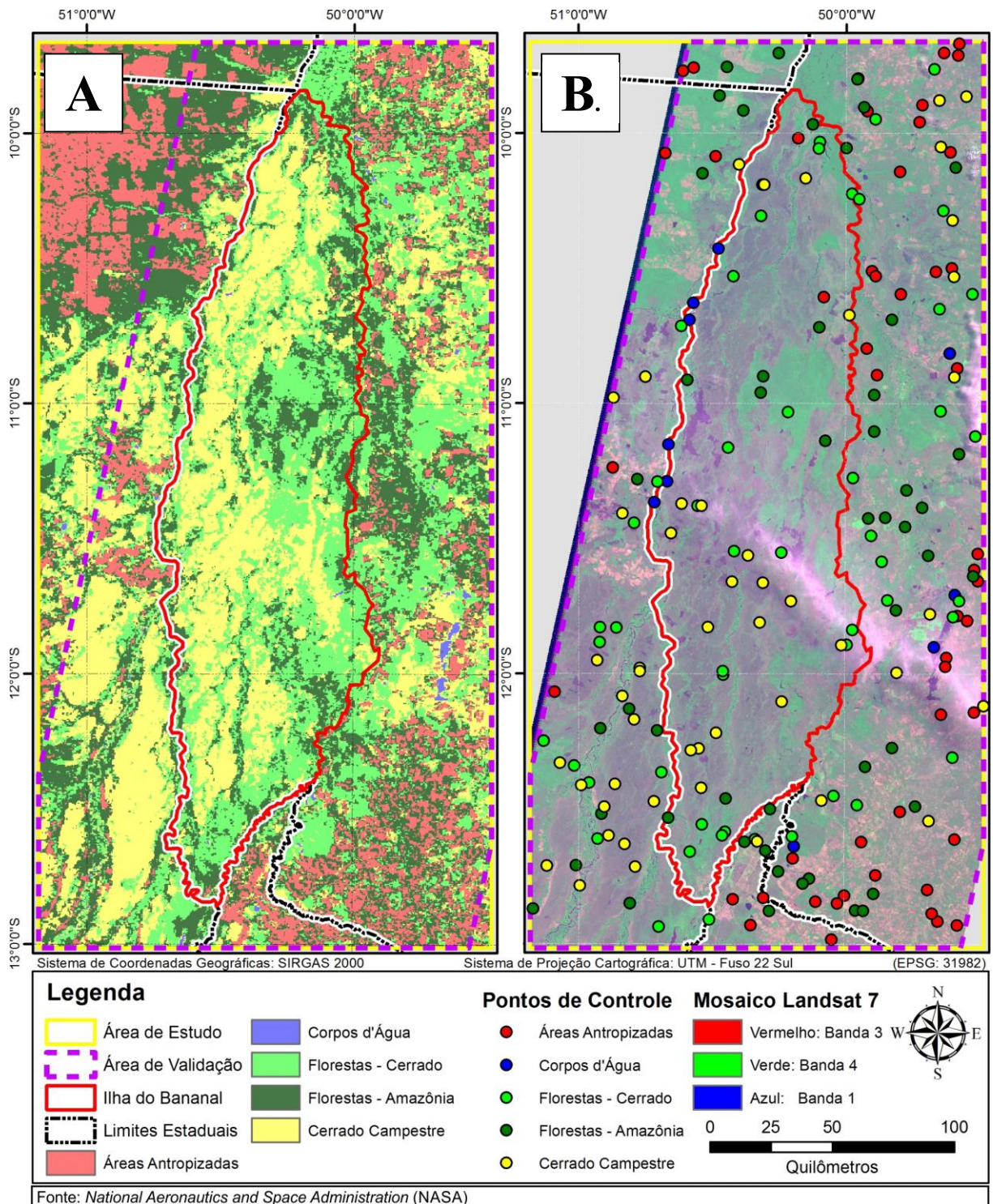
**Figura 23 – Análise do teste de acurácia para o mapeamento de áreas alagáveis**

O teste de acurácia para o mapeamento de uso da terra também utilizou 50 amostras aleatórias de cada classe, exceto para a feição de corpos d'água, na qual a quantidade foi reduzida para apenas 10, considerando que ela é de fácil distinção e abarca uma pequena porção da área de estudo. Totalizou-se, portanto, 210 pontos de controle dentro da área de validação (Figura 24). A imagem selecionada para o controle de qualidade também é proveniente do sensor ETM+ do Landsat 7, datada de 18 de julho de 2001, período de estiagem e pouca precipitação.

Previamente à avaliação quantitativa da classificação, é possível inferir certos aspectos do mapeamento. De maneira geral, a distribuição das classes corresponde ao esperado, com a predominância de Cerrado Campestre nas áreas de alagamento da Ilha do Bananal e na região do estado do Mato Grosso. A classe de Áreas Antropizadas predomina no setor noroeste de maneira consolidada, precisamente na região de fronteira agrícola no bioma Amazônico, e no



setor sudeste de maneira fragmentada, condizente com as características da agropecuária local. Também é importante ressaltar que no interior da ilha a antropização aferida foi mínima.



**Figura 24 – Teste de acurácia para o mapeamento de uso da terra. (A) Resultado da classificação; e (B) imagem de referência.**

As duas formações florestais se confundem ao longo de toda a área de estudo, sendo possível afirmar que as áreas pertencentes ao bioma Cerrado foram equivocadamente classificadas como do bioma Amazônico, enquanto a situação inversa não ocorre

significativamente, visto que a classe de Floresta Amazônica predomina ao noroeste da Ilha do Bananal.

Para a avaliação estatística, assim como no mapeamento de áreas alagadas, os pontos de controle foram interpretados com base na imagem Landsat e compilados na matriz de confusão (Tabela 7). A princípio, nota-se que o mapeamento de uso da terra apresentou menor concordância com a imagem de referência que o anterior, além de menor simetria entre os erros de comissão e omissão.

**Tabela 7 – Matriz de erro do mapeamento de uso da terra**

		Classe de Referência					Total
		C. d'Água	Fl. Amazônica	Fl. Cerrado	Campos	Áreas Antr.	
Classe Original	C. d'Água	8	0	1	1	0	10
	Fl. Amazônica	1	16	19	3	11	50
	Fl. Cerrado	0	0	35	13	2	50
	C. Campestre	2	0	4	42	2	50
	Áreas Antr.	0	1	8	1	40	50
	Total	11	17	67	60	55	210

Fonte: Original do Autor

O exame da matriz de erro demonstra que as classes de corpo d'água, Cerrado campestre e áreas antropizadas foram classificadas majoritariamente de maneira correta e subestimadas pelo mapeamento. No caso das formações campestres a validação indicou um quantitativo 20% maior que o original.

A maior parte dos pontos de controle da classe de Floresta Amazônica foi validada na classe de formações florestais do Cerrado, enquanto o inverso não ocorreu. Destaca-se também uma quantidade considerável de amostras dessa classe interpretada como cerrado campestre na imagem Landsat, o que pode ser compreendido pelas duas fitofisionomias coexistirem de maneira fragmentada na paisagem do bioma.

O resultado do coeficiente *Kappa* foi calculado individualmente para cada classe e de maneira integral para todo o mapeamento, sendo apresentados na Tabela 8. A maior concordância foi aferida para a classe dos corpos d'água, cujo resultado foi de 0,749. As classes de cerrado campestre e áreas antropizadas apresentaram um nível de acurácia intermediário e muito semelhante, respectivamente 0,681 e 0,683. As classes de floresta amazônica e das formações florestais de cerrado foram as de que obtiveram o pior resultado para o coeficiente *Kappa*, com os valores respectivos de 0,406 e 0,448, prejudicando a acurácia geral do mapeamento que foi de apenas 0,574.

**Tabela 8 – Coeficiente *Kappa* do mapeamento de uso da terra**

	C. d'Água	Fl. Amazônica	Fl. Cerrado	C. Campestre	Áreas Antr.	Geral
<b><i>Kappa</i></b>	0.749	0.406	0.448	0.681	0.683	0.574

Fonte: Original do Autor

A incapacidade de distinção entre diferentes formações florestais foi a maior determinante para a baixa acurácia do coeficiente *Kappa*. Soma-se a isso a característica de ecótono, cujo caráter transicional dificulta a definição inequívoca da classe. Por tais razões, as duas classes foram agregadas em uma única classe representativa das formações florestais, o que não prejudica a extração de informações relevantes para a análise da região. A nova matriz de confusão (Tabela 9) compila as informações das duas classes, mantendo o número total de amostras. A classe de formações florestais revela que houve predominância de erro de comissão, indicando que a feição foi superestimada pelo mapeamento.

O recálculo do coeficiente *Kappa* (Tabela 10) indica uma significativa melhoria na acurácia da classe que representa as formações florestais e contribuiu para o aumento da acurácia do mapeamento geral de 0,574 para 0,648, resultando em um mapeamento 13% mais acurado que o anterior. No entanto, a classe de Formações Florestais continua a apresentar mais erro e passa a contribuir com um maior peso para a aferição do *Kappa* geral, pois foi contemplada com mais amostras.

**Tabela 9 – Matriz de erro do mapeamento de uso da terra corrigida**

		Classes de Referência				
		C. d'Água	F. Florestais	C. Campestre	Áreas Antr.	Total
Classes Originais	C. d'Água	8	1	1	0	10
	F. Florestais	1	70	16	13	100
	C. Campestre	2	4	42	2	50
	Áreas Antr.	0	9	1	40	50
	Total	11	84	60	55	210

Fonte: Original do Autor

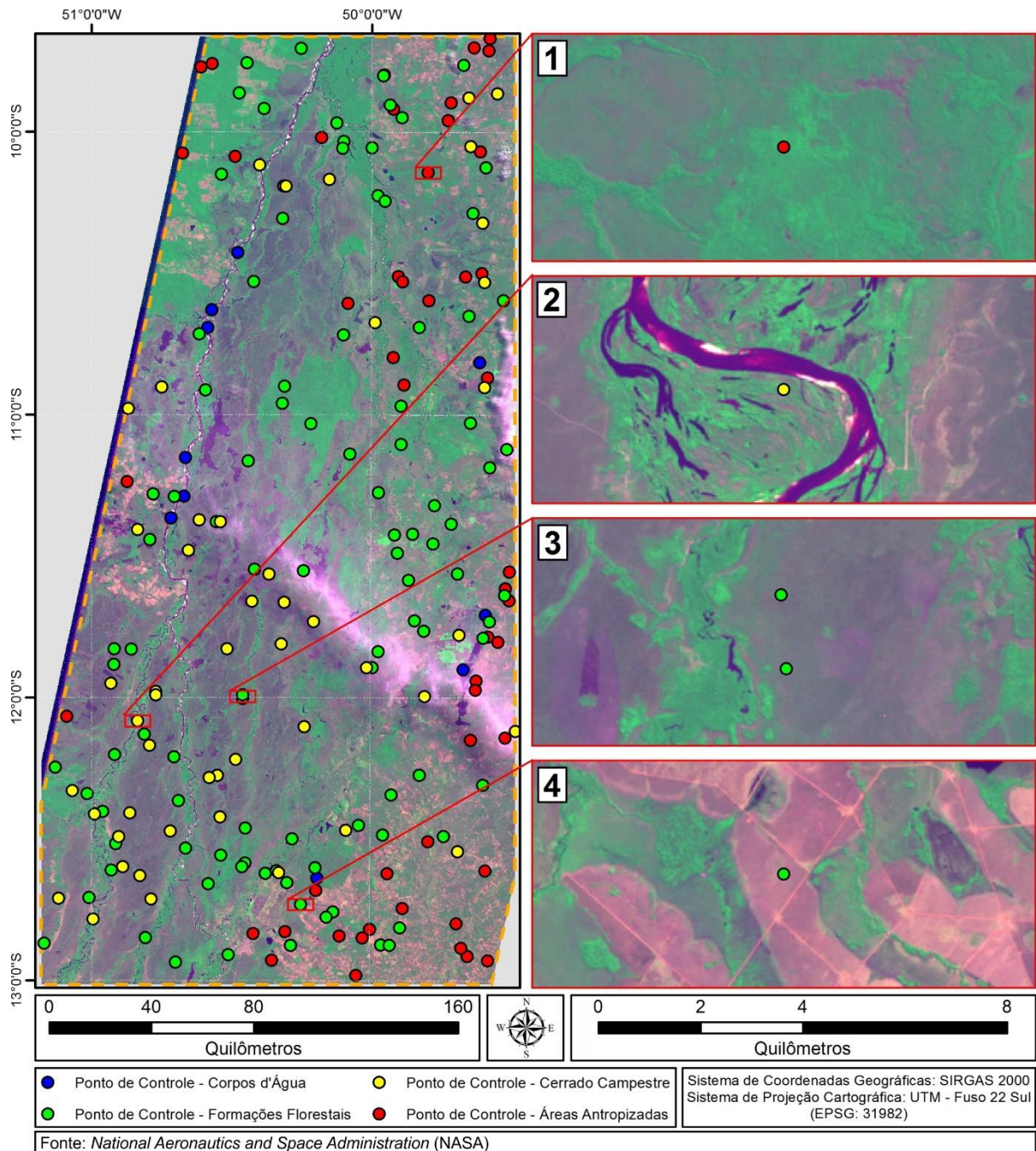
**Tabela 10 – Coeficiente *Kappa* do mapeamento de uso da terra corrigido**

	C. d'Água	F. Florestais	C. Campestre	Áreas Antr.	Geral
<b><i>Kappa</i></b>	0.749	0.577	0.681	0.683	0.648

Fonte: Original do Autor

Novamente procurou-se aprofundar na apuração dos erros de classificação pela análise de caso exemplares das divergências entre o mapeamento de uso da terra e a interpretação visual dos pontos de controle. O mapa da Figura 25 demonstra os casos selecionados para a análise.





**Figura 25 – Análise do teste de acurácia para o mapeamento de uso da terra**

O primeiro exemplo apresenta um ponto de controle da classe de áreas antropizadas que claramente encontra-se em uma área com vegetação florestal. Apesar do aspecto de um erro grosseiro constata-se que as áreas adjacentes não apresentam um dossel consistente, o que pode ter interferido na composição espectral do pixel classificado de maneira equivocada.

O segundo caso exibe uma amostra de validação da classe de cerrado campestre que foi interpretada como floresta de galeria, e por consequência na classe de formações florestais. A paisagem fragmentada desse local é uma particularidade somente possível de ser observada

na imagem Landsat, uma vez que as pequenas áreas de campo, de vegetação densa e até mesmo de água não são distinguíveis pelo sensor MODIS.

No terceiro exemplo são apresentadas duas amostras classificadas como formação florestal pela metodologia do trabalho, mas que encontram-se em uma área interpretada como Cerrado Campestre. Compreende-se, entretanto, que ela possui uma composição que não apresenta apenas campos, sendo essencialmente uma área de transição gradual, possivelmente pertencente à fitofisionomia de Savana Parque.

O último ponto de controle encontra-se claramente em uma área antropizada apesar de ter sido designado para a classe de formações florestais. Esse erro de classificação é facilmente esclarecido ao se notar que o local está confinado entre duas matas de galeria, conferindo um caráter fragmentado a essa paisagem. Novamente aponta-se para a inabilidade do sensor MODIS para distinguir a descontinuidade entre feições em escalas maiores.

Foram apurados dois fatores principais que prejudicaram a acurácia dos mapeamentos. O primeiro é proveniente da dificuldade do classificador aplicado – ou possivelmente da inadequação das amostras de treinamento – de definir a classe de uma célula quando ela se encontra em uma transição gradual ou a composição de sua mistura espectral não é bem definida.

O segundo fator – considerado o mais expressivo e relevante – diz respeito à resolução espacial do sensor MODIS, que foi detectada como a razão para a maioria dos casos de discordância entre a classificação e a validação. Ressalta-se que o método de validação contrastou um mapeamento com pixel de 250 metros com um dado de 30 metros, ressaltando as limitações da escala do mapeamento trabalhado.

Essa conclusão esclarece também a elevada acurácia do mapeamento de áreas alagáveis (0,800) em contraste com o de uso terra (0,648), visto que a natureza contínua da feição de alagamento implica em alvos mais uniformes espacialmente, enquanto a natureza fragmentada das classes de uso da terra em porções vultosas da área de estudo resulta na relativa inaptidão do sensor de distinguir detalhes.

Todavia, a resolução espacial já era um *trade-off* conhecido do sensor MODIS, o qual manifesta na resolução temporal a sua maior riqueza de dados (TOWNSHEND; JUSTICE, 2002). Por conseguinte, a apreciação dos resultados dos mapeamentos será voltada para a análise multitemporal, a qual deve fornecer informações sobre a dinâmica fenológica e

antrópica da região, assim como revelar o comportamento hidrológico intra e interanual da Planície da Bananal.

### **4.2.3. Análise multitemporal**

Inicialmente será analisada a dinâmica periódica da região a partir dos doze meses de um ano específico, onde procurar-se-á entender o comportamento sazonal da região e as características recorrentes do ciclo de alagamento. Em seguida serão estudadas datas análogas nos quinze anos do período do trabalho objetivando compreender as transformações na paisagem e no uso da terra, além da variação ano a ano do alcance máximo dos alagamentos. É importante ressaltar que serão exibidas apenas amostras das coleções de 690 imagens obtidas para cada mapeamento, todas classificadas em conjunto pela metodologia.

#### **4.2.3.1. Análise multitemporal mensal do alagamento**

A Figura 26 apresenta uma imagem de cada mês do ano de 2004, em que é possível observar o ciclo completo com o processo de inundação e vazante. Nesse caso, o nível máximo da água ocorre no mês de março, enquanto no mês de outubro constata-se o nível mínimo.

Assim como indicado pela literatura consultada, é confirmada a concentração do período das cheias (MMA, 2006). O período chuvoso inicia em outubro, no entanto nenhuma inundação significativa ocorre até o mês de janeiro. Da mesma forma, o fim das precipitações, em março, não coincide com o fim das enchentes que perduram até o mês de maio, constituindo um período de quatro meses entre o começo e o fim dos alagamentos. Portanto, o período das inundações é mais concentrado que o período de precipitações e ocorre aproximadamente com dois meses de retardamento em relação às chuvas.

De maneira geral, o processo de alagamento inicia-se em fevereiro pelo canal principal do rio Araguaia e seus maiores tributários no estado do Mato Grosso. No mês de março, a massa d'água se densifica e avança para leste, cobrindo a maior parte da Ilha do Bananal e extravasando o rio Javaés. Nesse momento nota-se a formação de duas grandes ilhas na margem esquerda do rio Araguaia, além de outra pequena área que permanece nitidamente sem inundação ao longo de todo o ciclo.



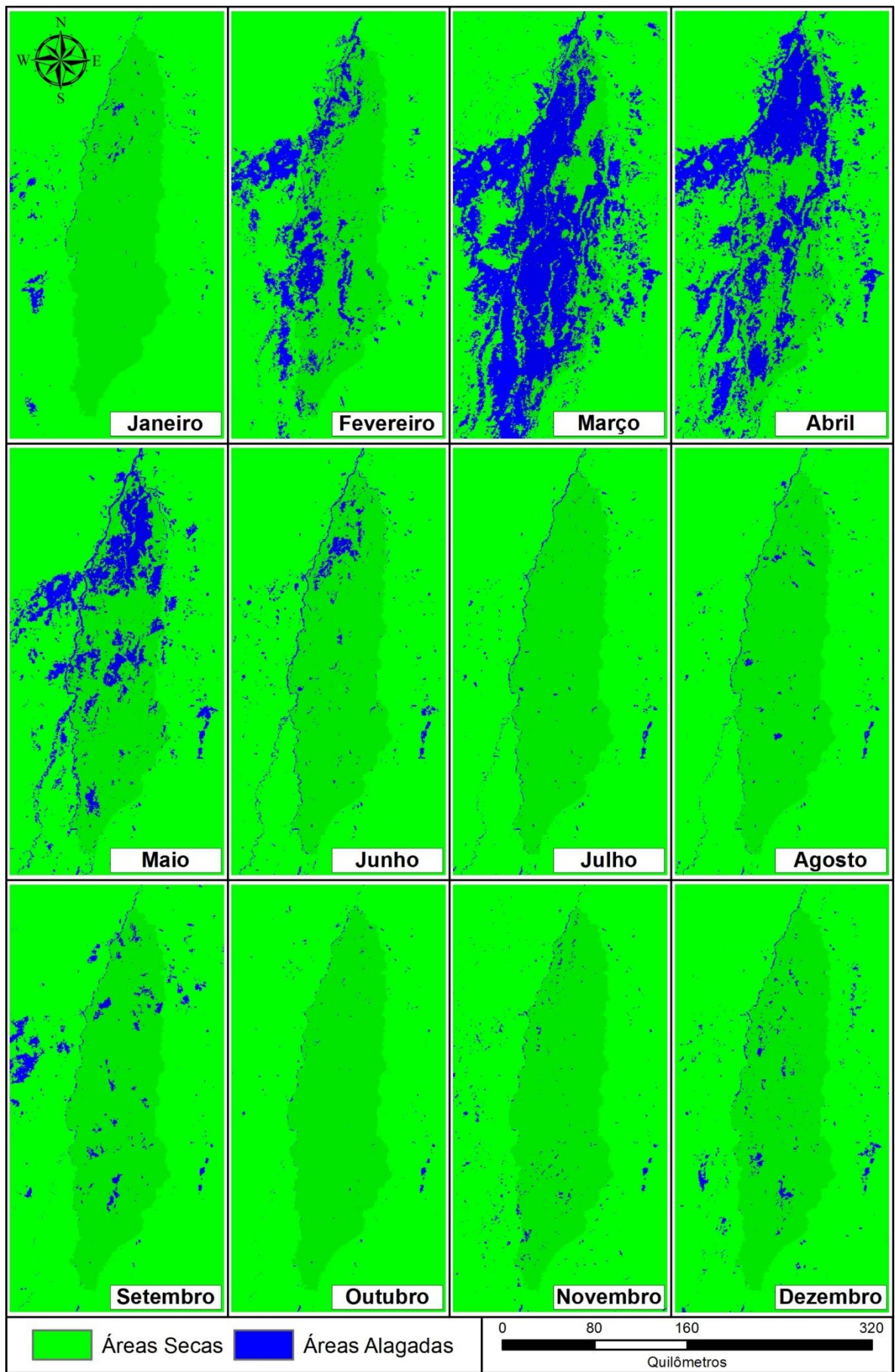


Figura 26 – Análise Multitemporal Mensal – Mapa de Alagamento do ano de 2004

O período de vazante inicia-se em abril, onde as porções da ilha à montante já apresentam menor cobertura d'água. No entanto, à jusante no reencontro do rio Araguaia com seu braço direito nota-se um processo de acumulação da água pelo afunilamento do canal que drena a planície. Ao longo do mês de maio o processo de escoamento prossegue até que em junho encontram-se apenas áreas alagadiças residuais.

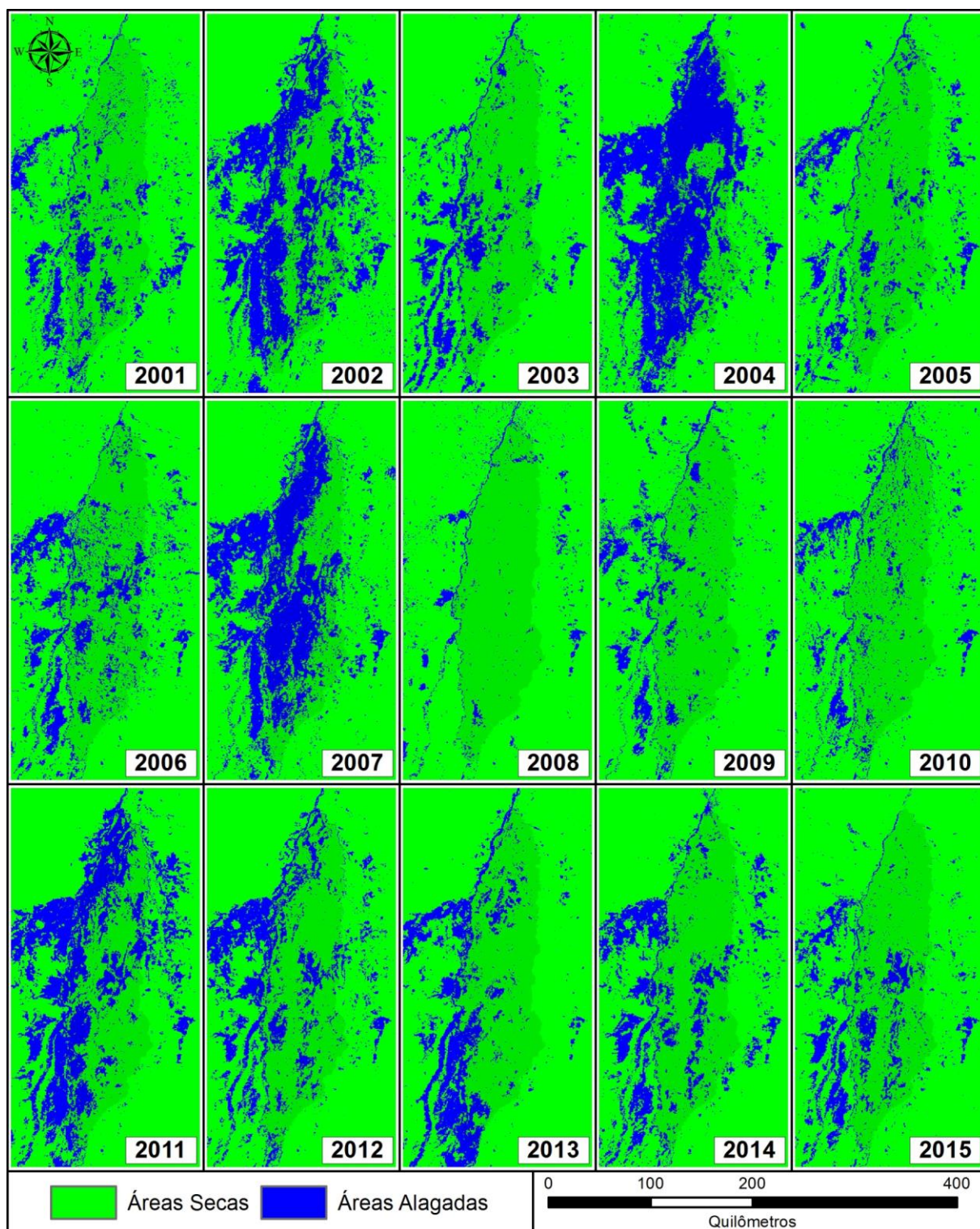
Por fim, a Mata do Mamão na porção central da ilha foi classificada como área seca devido ao dossel florestal, o que também ocorre para as florestas de galeria, resultando na subestimação da amplitude do alagamento uma vez que abaixo das copas das árvores é presumível a presença de água para locais envolvidos pela classe de áreas alagáveis.

#### **4.2.3.2. Análise multitemporal anual do alagamento**

A Figura 27 apresenta a sequência do mapeamento interanual de áreas alagáveis durante os quinze anos estudados. As imagens de cada ano representam a data de enchente máxima daquele ciclo hidrológico, o que permite extrair informações quanto à variabilidade da extensão dos eventos de inundações, além das áreas de maior suscetibilidade e recorrência. Observa-se uma oscilação das enchentes máximas entre os diferentes ciclos anuais de alagamento, onde a maior inundação foi no ano de 2004 e a menor em 2008. O auge do alcance das áreas alagadas atingiu uma área de cerca de 2,2 milhões de hectares sem considerar ainda as áreas de floresta alagadas, o que supera até mesmo o tamanho total da Ilha do Bananal. Também é necessário ponderar, a partir das análises mensais, que em um mesmo ciclo áreas distintas inundam-se em momentos diferentes.

Os anos com maiores enchentes foram 2002, 2004, 2007 e 2011, enquanto que em 2003, 2008 e, 2009 seu alcance foi inferior ao que ocorre regularmente. As áreas de alagamento mais recorrente encontram-se próximas ao canal principal do rio Araguaia, sobretudo em sua margem esquerda, na qual confirma-se a presença das três áreas permanentemente secas descritas anteriormente. A partir de 2011, observa-se uma tendência decrescente de área inundada que necessita ser monitorada nos anos subsequentes.





**Figura 27 – Análise Multitemporal Anual – Mapa de Alagamento**

#### 4.2.3.3. Análise multitemporal anual do uso da terra

Além das variações na dinâmica hidrológica da região, é necessário investigar as condições e possíveis alterações da paisagem. A Figura 28 apresenta a sucessão do mapeamento



de uso da terra durante os quinze de estudo referentes ao mês de julho, o mesmo mês utilizado para o teste de acurácia, permitindo que seu resultado seja considerado de forma parametrizada para a análise.

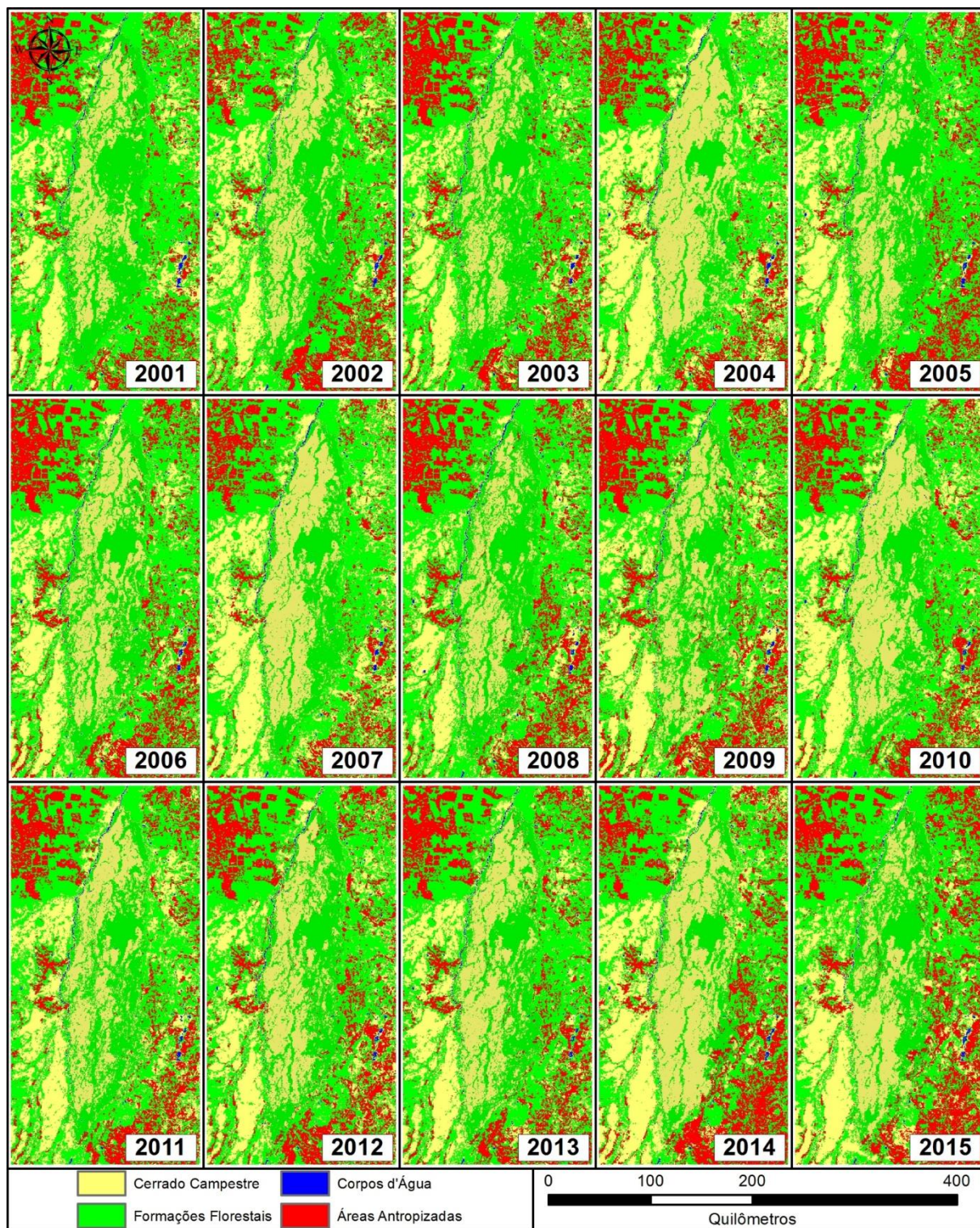


Figura 28 – Análise Multitemporal Anual – Mapa de Uso da Terra



De maneira geral não se verificam alterações significativas ao longo da série histórica. Eventuais variações entre as classes de cerrado campestre e formações florestais podem ser atribuídas à presença de água no ambiente, não significando uma alteração efetiva no uso da terra. Percebe-se, possivelmente, uma intensificação da antropização na porção sudeste da área de estudo a qual se pode atribuir o aumento de aproximadamente 43% da cobertura da classe de áreas antropizadas para toda a região mapeada, de 1,02 milhão de hectares no ano de 2001 para 1,46 milhões em 2015.

A Ilha do Bananal, entretanto, encontra-se livre de interferência significativa de atividades humanas, confirmando as expectativas para o mapeamento ao se considerar os esforços de preservação ambiental empreendidos na região e as limitações de uso proveniente das enchentes periódicas. Destaca-se a importância de um monitoramento continuado da região por sensoriamento remoto, visto que a intensificação da antropização em torno da ilha aumenta a pressão ambiental das áreas protegidas, ao mesmo tempo em que devem ser investigadas perturbações mais tênues que as possíveis de serem identificadas pela base de dados utilizada.

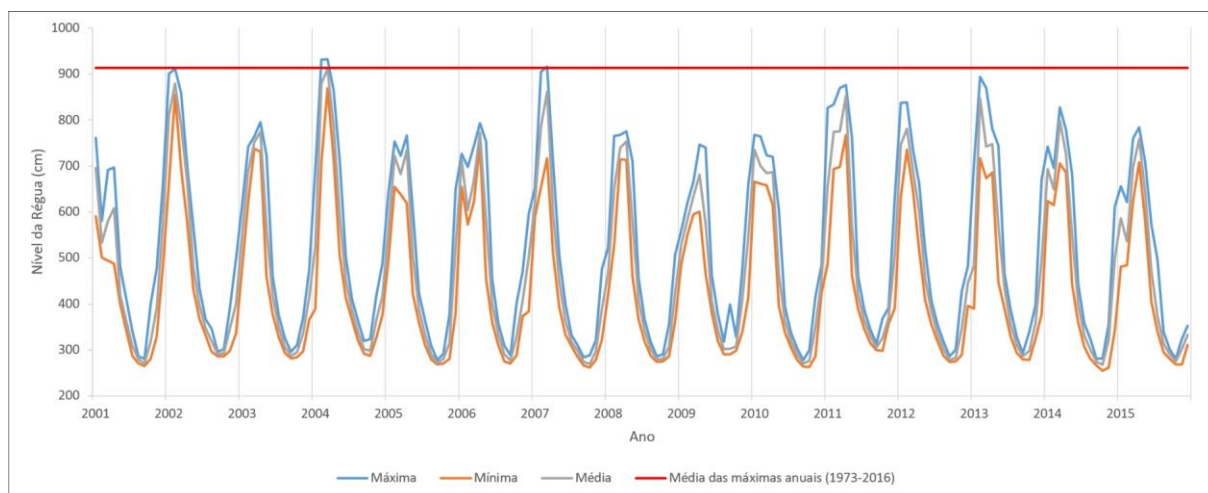
#### **4.2.4. Consolidação da análise**

Inicialmente é necessário enfatizar que a diferença entre os coeficientes de acurácia entre os dois mapeamentos – 0,800 para o de áreas alagáveis e 0,648 para o de uso da terra – tem sua justificativa mais corroborável na incapacidade da resolução do sensor MODIS de distinguir feições da superfície terrestre que se apresentam de forma fragmentada. Mesmo assim, a alta resolução temporal da base de dados foi capaz de fornecer informações relevantes, principalmente acerca da dinâmica hidrológica da planície do Bananal.

Sobre o seu comportamento cíclico foi possível caracterizar o seu período de concentração, desde o início da cheia até o final da vazante, e que é regido principalmente pelo canal do rio Araguaia. Notou-se que existem terraços que se mantêm secos ao longo de todos os anos, formando ilhas na várzea do rio Araguaia, e também que todo o processo tem um desenvolvimento espacial de drenagem muito característico, com a acumulação de água no encontro do rio Araguaia com o Javaés sendo favorecido pelo afunilamento dos canais.

Abordando a variabilidade anual entre os ciclos hidrológicos foi possível averiguar que no ano de maior alagamento – 2004 – foi registrada uma área de alagamento de 2,2 milhões de hectares. Neste aspecto, é possível realizar outra validação independente dos dados obtidos, por meio da comparação com séries históricas de medição do rio Araguaia.

Na Figura 29 apresenta-se a série histórica de medições da estação fluviométrica de São Félix do Araguaia para o mesmo período do estudo. Essa comparação revela que de fato o ano de 2004 foi o com as cheias de maior intensidade, seguido por 2007 e 2002. Verifica-se também que esses anos são os que mais se aproximam da média das máximas calculada para todo o período de coleta de dados – entre 1973 e 2016 – caracterizando, portanto, uma aferição confiável da dimensão da várzea do rio Araguaia. Destaca-se que esse cálculo exclui as máximas de menor intensidade em ciclos de 3 anos e as máximas extraordinárias com ocorrência de 20 anos.



**Figura 29 – Série Fluviométrica da Estação de São Félix do Araguaia (Rio Araguaia)**

Por fim, voltando-se para a análise do uso da terra, retoma-se a constatação de que, enquanto o interior da Ilha do Bananal permanece livre de interferências humanas, seu entorno sofreu um aumento de 43% da feição de áreas antropizadas, confirmando que, apesar da região se encontrar em um contexto de fronteira agrícola, tem sido efetiva a preservação da Unidade de Conservação e das Terras Indígenas.

## 5. CONCLUSÃO

É importante ressaltar alguns aspectos fundamentais deste trabalho com grande destaque para o Hipercubo Espectro-Temporal que pode ser considerado um conceito de vanguarda a ser aplicado no campo do sensoriamento remoto, geoprocessamento ou até mesmo da Geografia. Dessa forma, inaugura-se um novo paradigma para processamento digital de imagens, que permite não só o máximo aproveitamento das informações disponíveis, fazendo com que o pesquisador não tenha que privilegiar o aspecto temporal em detrimento da riqueza de informações disponíveis a partir do espectro eletromagnético, possibilitando uma análise mais completa.

Além dos avanços do ponto de vista técnico, foi possível obter informações da dinâmica hidrológica e do uso da terra da Ilha do Bananal, que se destaca pela combinação única de características ambientais e socioeconômicas, a saber: 1) sua condição dupla de ecótono; 2) sua atratividade a esforços de preservação ambiental; 3) sua importância para a manutenção do modo de vida de populações tradicionais; 4) sua inserção no arco do desmatamento; e 5) a presença de conflitos sociais e fundiários.

Na pesquisa foi adquirida grande quantidade de imagens, submetidas a um tratamento de eliminação de ruídos e construção do Hipercubo Espectro-Temporal com menor interferência de nuvens. A Classificação dos dados obteve séries temporais de mapas de alagamento e uso da terra, os quais atingiram diferentes níveis de acurácia. Ainda assim, foi possível extrair de ambos as informações que subsidiaram o melhor entendimento da dinâmica temporal intra e interanual da Ilha do Bananal e suas áreas adjacentes.

A metodologia aplicada obteve melhor resultado para o mapeamento de áreas alagadas do que para o de uso da terra, com os respectivos coeficientes Kappa de 0,800 e 0,648. Foi possível não só caracterizar o processo cíclico de inundação e vazante da planície do Bananal, como também mensurar os anos de maior e menor ocorrência. Em relação ao uso da terra, o método foi muito sensível para a detecção de mudanças mensais, ao passo que não foi eficaz para distinguir as diferentes formações florestais, devido à resolução espacial do sensor MODIS.

Destacam-se como importantes as constatações, de que a área máxima de alagamento foi 2,2 milhões de hectares no ano de 2004, em concordância com as observações da estação fluviométrica de São Félix do Araguaia; e de que houve um aumento de 43% nas áreas antropizadas ao longo do período do estudo.

A Estrutura do Hipercubo Espectro-Temporal foi fundamental para que fosse possível a extração de um mapeamento para cada tempo da série, uma vez que cada data armazenava todas as informações espectrais que orientaram a classificação a partir da biblioteca de *endmembers*. Essa abordagem permitiu a obtenção das coleções de 690 mapas sequenciais de alagamento e uso da terra que representam o efetivo aproveitamento da resolução temporal do sensor MODIS no resultado final.

É importante frisar que as potencialidades do Hipercubo Espectro-Temporal não foram exploradas de maneira integral, considerando que, apesar da utilização da estrutura tetradimensional proposta, o algoritmo de classificação aplicado ainda não apresenta um método de decisão que mescle ou pondere as informações dos eixos temporais e espectrais. Ainda é possível a implementação de diversas outras ferramentas de manipulação e análise de dados que adicionem complexidade e detalhamento ao resultado final. Destacam-se possibilidades para algoritmos de classificação inovadores, mecanismos de controle para pós-classificação e ferramentas de detecção de mudança capazes de sintetizar a grande quantidade de informações geradas.

Portanto, este trabalho contribui no emprego de séries espectro-temporais contínuas de sensoriamento remoto, sendo uma etapa exploratória das capacidades das análises em quatro dimensões. Sugere-se também a aplicação desse tipo de metodologia a outras bases de dados e outras áreas de estudo.

Este resultado deve contribuir para o acompanhamento da evolução do uso da terra na Ilha do Bananal que, por se tratar de uma área protegida, deve ser constantemente monitorada. O estudo também contribui do ponto de vista científico, uma vez que apresenta uma nova abordagem técnica para a classificação de séries temporais contínuas, além de fornecer informações que podem colaborar na preservação de uma região que apresenta uma combinação única de características bióticas e abióticas.

A análise da paisagem em um contexto temporal é primordial para entender a configuração do espaço geográfico. No caso da Ilha do Bananal, essa pesquisa tem implicação nas políticas públicas voltadas para o desenvolvimento da agropecuária, para a gestão de recursos hídricos, para a preservação ambiental e para a reprodução territorial dos povos tradicionais que ocupam a Ilha. Essa abordagem é o ponto de partida para se entender a relação entre o homem e a natureza no seu contexto político, econômico e social, e, se possível, encontrar equilíbrio entre as diversas funções do território.

Por fim aborda-se a necessidade de se dar continuidade aos esforços de acompanhamento e monitoramento da região, sendo possível somar dados ano a ano às séries de dados utilizadas e, conseqüentemente, verificar se a Ilha do Bananal continuará livre de interferências antrópicas ou se com o passar dos anos será verificado o início de um processo de degradação ambiental.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AB`SABER, A. N. Os domínios morfoclimáticos na América do Sul: primeira aproximação. **Geomorfologia**, v. 52, p. 1-22, 1977.

ABADE, N.; JÚNIOR, O.; GUIMARÃES, R.; DE OLIVEIRA, S. Comparative Analysis of MODIS Time-Series Classification Using Support Vector Machines and Methods Based upon Distance and Similarity Measures in the Brazilian Cerrado-Caatinga Boundary. **Remote Sensing**, v. 7, n. 9, p. 12160-12191, 2015.

ALCANTARA, C.; KUEMMERLE, T.; PRISHCHEPOV, A. V.; RADELOFF, V. C. Mapping abandoned agriculture with multi-temporal MODIS satellite data. **Remote Sensing of Environment**, v. 124, p. 334-347, 2012.

ALDRICH, S.; WALKER, R.; SIMMONS, C.; CALDAS, M.; PERZ, S. Contentious Land Change in the Amazon's Arc of Deforestation. **Annals of the Association of American Geographers**, v. 102, n. 1, p. 103-128, 2012.

ALI, A.; DE BIE, C. A. J. M.; SKIDMORE, A. K.; SCARROTT, R. G.; HAMAD, A.; VENUS, V.; LYMBERAKIS, P. Mapping land cover gradients through analysis of hyper-temporal NDVI imagery. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 23, p. 301-312, 2013.

ARAÚJO, J. B.; CARNEIRO, R. G. Planície do Araguaia, reconhecimento geológico-geofísico. (Relatório Técnico Interno, 348). **PETROBRAS-Região Norte**, p. 11, Belém, 1977.

ATAMAN, E.; AATRE, V.; WONG, K. Some statistical properties of median filters. **IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing**, v. 29, n. 5, p. 1073-1075, 1981.

BASSET, A.; BARBONE, E.; ELLIOTT, M.; LI, B.-L.; JORGENSEN, S. E.; LUCENA-MOYA, P.; PARDO, I.; MOUILLOT, D. A unifying approach to understanding transitional waters: Fundamental properties emerging from ecotone ecosystems. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 132, p. 5-16, 2013.

BERNAL, B.; MITSCH, W. J. Comparing carbon sequestration in temperate freshwater wetland communities. **Global Change Biology**, v. 18, n. 5, p. 1636-1647, 2012.

BLACHMAN, N. M. Random exploration of the three regular polytopes. **IEEE Transactions on Information Theory**, v. 41, n. 6, p. 2081-2087, 1995.

BONTEMPS, S.; BOGAERT, P.; TITEUX, N.; DEFURNY, P. An object-based change detection method accounting for temporal dependences in time series with medium to coarse spatial resolution. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 6, p. 3181-3191, 2008.

BRASIL. Constituição dos Estados Unidos do Brasil, de 18 de setembro de. 1946a.

\_\_\_\_\_. Decreto-Lei N° 9.760, de 5 de setembro de. 1946b.

\_\_\_\_\_. Lei N° 1.806, de 6 de Janeiro de. 1953.

\_\_\_\_\_. Lei N° 5.173, de 27 de outubro de. 1966.

\_\_\_\_\_. Decreto Presidencial nº 84.844, de 24 de junho de. 1980.

\_\_\_\_\_. Constituição da República Federativa do Brasil de. 1988.

\_\_\_\_\_. Decreto Presidencial s/nº, de 14 de abril de. 1998.

\_\_\_\_\_. Decreto Presidencial s/nº, de 18 de abril de. 2006.

CAI, D.; GUAN, Y.; GUO, S.; ZHANG, C.; FRAEDRICH, K. Mapping Plant Functional Types over Broad Mountainous Regions: A Hierarchical Soft Time-Space Classification Applied to the Tibetan Plateau. **Remote Sensing**, v. 6, n. 4, p. 3511-3532, 2014.

CARVALHO JUNIOR, O. A.; MACIEL, L.; DE CARVALHO, A.; GUIMARÃES, R.; SILVA, C.; GOMES, R.; SILVA, N. Probability Density Components Analysis: A New Approach to Treatment and Classification of SAR Images. **Remote Sensing**, v. 6, n. 4, p. 2989-3019, 2014.

CARVALHO JÚNIOR, O. A.; MENEZES, P. R. Spectral Correlation Mapper (SCM): An Improving Spectral Angle Mapper. **Summaries of the Ninth JPL Airborne Earth Science Workshop**, v. 1, p. 65-74, 2000.

CARVALHO JUNIOR, O. A.; SAMPAIO, C. S.; SILVA, N. C.; COUTO JUNIOR, A. F.; GOMES, R. A. T.; CARVALHO, A. P. F.; SHIMABUKURO, Y. E. Classificação de padrões de savana usando assinaturas temporais NDVI do sensor MODIS no parque Nacional Chapada dos Veadeiros. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 26, n. 4, p. 505-517, 2008.

CARVALHO JUNIOR, O. A.; SILVA, N. C.; CARVALHO, A. P. F.; COUTO JUNIOR, A. F.; SILVA, C. R.; SHIMABUKURO, Y. E.; GUIMARÃES, R. F.; GOMES, R. A. T. Combining Noise-Adjusted Principal Components transform and median filter techniques for denoising MODIS temporal signatures. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 30, n. 2, p. 147-157, 2012.

CHANG, J.; HANSEN, M. C.; PITTMAN, K.; CARROLL, M.; DIMICELI, C. Corn and Soybean Mapping in the United States Using MODIS Time-Series Data Sets. **Agronomy Journal**, v. 99, n. 6, p. 1654, 2007.

CHUVIECO, E.; VENTURA, G.; MARTÍN, M. P.; GÓMEZ, I. Assessment of multitemporal compositing techniques of MODIS and AVHRR images for burned land mapping. **Remote Sensing of Environment**, v. 94, n. 4, p. 450-462, 2005.

COHEN, W. B.; YANG, Z.; KENNEDY, R. Detecting trends in forest disturbance and recovery using yearly Landsat time series: 2. TimeSync — Tools for calibration and validation. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, n. 12, p. 2911-2924, 2010.

CONGALTON, R. G. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. **Remote Sensing of Environment**, v. 37, n. 1, p. 35-46, 1991.



COPPIN, P.; JONCKHEERE, I.; NACKAERTS, K.; MUYS, B.; LAMBIN, E. Review Article Digital change detection methods in ecosystem monitoring: a review. **International Journal of Remote Sensing**, v. 25, n. 9, p. 1565-1596, 2004.

COUTINHO, L. M. O conceito de bioma. **Acta Botanica Brasílica**, v. 20, n. 1, p. 13-23, 2006.

CPRM. Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo. Folha SC-22 Tocantins. **Serviço Geológico do Brasil - Ministério de Minas e Energia (MME)**, 2004a.

\_\_\_\_\_. Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo. Folha SD-22 Goiás. **Serviço Geológico do Brasil - Ministério de Minas e Energia (MME)**, 2004b.

DA SILVA, A.; LOPES, R.; VASCONCELOS, A.; BAHIA, R. Bacias sedimentares paleozóicas, meso-cenozóicas interiores. In: BIZZI, L. A.; SCHOBENHAUS, C., *et al* (Ed.). **Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil**, 2003. cap. 2, p.55-85.

DANIELS, A. E.; CUMMING, G. S. Conversion or Conservation? Understanding Wetland Change in Northwest Costa Rica. **Ecological Applications**, v. 18, n. 1, p. 49-63, 2008.

DELLA CHIESA, B. Wanted: Tesseract. One Hypothesis on Languages, Cultures, and Ethics for Mind, Brain, and Education. **Mind, Brain, and Education**, v. 4, n. 3, p. 135-148, 2010.

DOMINGUES, M. S.; BERMAN, C. O arco de desflorestamento na Amazônia: da pecuária à soja. **Ambiente & sociedade**, v. 15, n. 2, p. 1-22, 2012.

DUFFY, W. G.; KAHARA, S. N. Wetland ecosystem services in California's Central Valley and implications for the Wetland Reserve Program. **Ecological Applications**, v. 21, n. 3, 2011.

DUSSEUX, P.; VERTES, F.; CORPETTI, T.; CORGNE, S.; HUBERT-MOY, L. Agricultural practices in grasslands detected by spatial remote sensing. **Environ Monit Assess**, v. 186, n. 12, p. 8249-65, Dec 2014.

DWYER, J.; SCHMIDT, G. The MODIS Reprojection Tool. In: QU, J. J. G., W.; KAFATOS, M.; MURPHY, R.E.; SALOMONSON, V.V. SPRINGER (Ed.). **Earth science satellite remote sensing**, 2006. p.162-177.

ENG, H.-L.; MA, K. K. Noise adaptive soft-switching median filter for image denoising. v. 4, p. 2175-2178, 2000.

FALCK, A. S.; MAGGIONI, V.; TOMASELLA, J.; VILA, D. A.; DINIZ, F. L. R. Propagation of satellite precipitation uncertainties through a distributed hydrologic model: A case study in the Tocantins–Araguaia basin in Brazil. **Journal of Hydrology**, v. 527, p. 943-957, 2015.

FEARNSIDE, P. M.; DE ALENCASTRO GRACA, P. M. BR-319: Brazil's Manaus-Porto Velho highway and the potential impact of linking the arc of deforestation to central amazonia. **Environ Manage**, v. 38, n. 5, p. 705-16, Nov 2006.

FENG, L.; HU, C.; CHEN, X.; CAI, X.; TIAN, L.; GAN, W. Assessment of inundation changes of Poyang Lake using MODIS observations between 2000 and 2010. **Remote Sensing of Environment**, v. 121, p. 80-92, 2012.

FENSHOLT, R.; RASMUSSEN, K.; NIELSEN, T. T.; MBOW, C. Evaluation of earth observation based long term vegetation trends — Intercomparing NDVI time series trend analysis consistency of Sahel from AVHRR GIMMS, Terra MODIS and SPOT VGT data. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, n. 9, p. 1886-1898, 2009.

FITCH, D. T.; STOW, D. A.; HOPE, A. S.; REY, S. MODIS vegetation metrics as indicators of hydrological response in watersheds of California Mediterranean-type climate zones. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, n. 11, p. 2513-2523, 2010.

FRANKLIN, S. E.; WILSON, B. A. Spatial and spectral classification of remote-sensing imagery. **Computers & Geosciences**, v. 17, n. 8, p. 1151-1172, 1991.

FUNK, C. C.; BROWN, M. E. Intra-seasonal NDVI change projections in semi-arid Africa. **Remote Sensing of Environment**, v. 101, n. 2, p. 249-256, 2006.

GALFORD, G. L.; MUSTARD, J. F.; MELILLO, J.; GENDRIN, A.; CERRI, C. C.; CERRI, C. E. P. Wavelet analysis of MODIS time series to detect expansion and intensification of row-crop agriculture in Brazil. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 2, p. 576-587, 2008.

GALLAGHER, N.; WISE, G. A theoretical analysis of the properties of median filters. **IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing**, v. 29, n. 6, p. 1136-1141, 1981.

GANGULY, S.; FRIEDL, M. A.; TAN, B.; ZHANG, X.; VERMA, M. Land surface phenology from MODIS: Characterization of the Collection 5 global land cover dynamics product. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, n. 8, p. 1805-1816, 2010.

GUENTHER, B.; XIONG, X.; SALOMONSON, V. V.; BARNES, W. L.; YOUNG, J. On-orbit performance of the Earth Observing System Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer; first year of data. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n. 1-2, p. 16-30, 2002.

GUTZWILLER, K. J.; FLATHER, C. H. Wetland features and landscape context predict the risk of wetland habitat loss. **Ecological Applications**, v. 21, n. 3, p. 968-982, 2011.

HALDER, A.; GHOSH, A.; GHOSH, S. Supervised and unsupervised landuse map generation from remotely sensed images using ant based systems. **Applied Soft Computing**, v. 11, n. 8, p. 5770-5781, 2011.

HAMDI, M.; SONG, S. W. Embedding hierarchical hypercube networks into the hypercube. **IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems**, v. 8, n. 9, p. 897-902, 1997.

HAN, G.; XU, J. Land surface phenology and land surface temperature changes along an urban-rural gradient in Yangtze River Delta, china. **Environ Manage**, v. 52, n. 1, p. 234-49, Jul 2013.

HANDISYDE, N.; LACALLE, D. S.; ARRANZ, S.; ROSS, L. G. Modelling the flood cycle, aquaculture development potential and risk using MODIS data: A case study for the floodplain of the Rio Paraná, Argentina. **Aquaculture**, v. 422-423, p. 18-24, 2014.

HAO, P.; WANG, L.; NIU, Z. Comparison of Hybrid Classifiers for Crop Classification Using Normalized Difference Vegetation Index Time Series: A Case Study for Major Crops in North Xinjiang, China. **PLoS One**, v. 10, n. 9, p. e0137748, 2015.

HELMER, E. H.; RUZYCKI, T. S.; WUNDERLE, J. M.; VOGESSER, S.; RUEFENACHT, B.; KWIT, C.; BRANDEIS, T. J.; EWERT, D. N. Mapping tropical dry forest height, foliage height profiles and disturbance type and age with a time series of cloud-cleared Landsat and ALI image mosaics to characterize avian habitat. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, n. 11, p. 2457-2473, 2010.

HENGL, T.; HEUVELINK, G. B. M.; PERČEC TADIĆ, M.; PEBESMA, E. J. Spatio-temporal prediction of daily temperatures using time-series of MODIS LST images. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 107, n. 1-2, p. 265-277, 2011.

HENTHORNE, T. String theory, French horns, and the infrastructure of cyberspace. **Technology in Society**, v. 32, n. 3, p. 204-208, 2010.

HESS, L. L.; MELACK, J. M.; AFFONSO, A. G.; BARBOSA, C.; GASTIL-BUHL, M.; NOVO, E. M. L. M. Wetlands of the Lowland Amazon Basin: Extent, Vegetative Cover, and Dual-season Inundated Area as Mapped with JERS-1 Synthetic Aperture Radar. **Wetlands**, v. 35, n. 4, p. 745-756, 2015.

HMIMINA, G.; DUFRÊNE, E.; PONTAILLER, J. Y.; DELPIERRE, N.; AUBINET, M.; CAQUET, B.; DE GRANDCOURT, A.; BURBAN, B.; FLECHARD, C.; GRANIER, A.; GROSS, P.; HEINESCH, B.; LONGDOZ, B.; MOUREAUX, C.; OURCIVAL, J. M.; RAMBAL, S.; SAINT ANDRÉ, L.; SOUDANI, K. Evaluation of the potential of MODIS satellite data to predict vegetation phenology in different biomes: An investigation using ground-based NDVI measurements. **Remote Sensing of Environment**, v. 132, p. 145-158, 2013.

HUANG, C.; CHEN, Y.; WU, J. Mapping spatio-temporal flood inundation dynamics at large river basin scale using time-series flow data and MODIS imagery. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 26, p. 350-362, 2014.

JÖNSSON, A. M.; EKLUNDH, L.; HELLSTRÖM, M.; BÄRRING, L.; JÖNSSON, P. Annual changes in MODIS vegetation indices of Swedish coniferous forests in relation to snow dynamics and tree phenology. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, n. 11, p. 2719-2730, 2010.

JULIEN, Y.; SOBRINO, J. A. Comparison of cloud-reconstruction methods for time series of composite NDVI data. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, n. 3, p. 618-625, 2010.

JUSTICE, C. O.; TOWNSHEND, J. R. G.; VERMOTE, E. F.; MASUOKA, E.; WOLFE, R. E.; SALEOUS, N.; ROY, D. P.; MORISETTE, J. T. An overview of MODIS Land data processing and product status. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n. 1-2, p. 3-15, 2002.

JUSTICE, C. O.; VERMOTE, E.; TOWNSHEND, J. R. G.; DEFRIES, R.; ROY, D. P.; HALL, D. K.; SALOMONSON, V. V.; PRIVETTE, J. L.; RIGGS, G.; STRAHLER, A.; LUCHT, W.; MYNENI, R. B.; KNYAZIKHIN, Y.; RUNNING, S. W.; NEMANI, R. R.; ZHENGMIN, W.; HUETE, A. R.; VAN LEEUWEN, W.; WOLFE, R. E.; GIGLIO, L.; MULLER, J.; LEWIS,

P.; BARNESLEY, M. J. The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): land remote sensing for global change research. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 36, n. 4, p. 1228-1249, 1998.

KANNAN, K. A new Decision Based Median Filter using Cloud Model for the removal of high density Salt and Pepper noise in digital color images. **International Journal of Image, Graphics and Signal Processing**, v. 6, n. 4, p. 46-53, 2014.

KE, Y.; IM, J.; LEE, J.; GONG, H.; RYU, Y. Characteristics of Landsat 8 OLI-derived NDVI by comparison with multiple satellite sensors and in-situ observations. **Remote Sensing of Environment**, v. 164, p. 298-313, 2015.

KEMP, M. Dali's dimensions. **Nature**, v. 391, n. 6662, p. 27-27, 1998.

KENNEDY, R. E.; YANG, Z.; COHEN, W. B. Detecting trends in forest disturbance and recovery using yearly Landsat time series: 1. LandTrendr — Temporal segmentation algorithms. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, n. 12, p. 2897-2910, 2010.

KHALEGHI, M.; RANJBAR, H.; SHAHABPOUR, J.; HONARMAND, M. Spectral angle mapping, spectral information divergence, and principal component analysis of the ASTER SWIR data for exploration of porphyry copper mineralization in the Sarduiyeh area, Kerman province, Iran. **Applied Geomatics**, v. 6, n. 1, p. 49-58, 2014.

KOBAYASHI, H.; DYE, D. G. Atmospheric conditions for monitoring the long-term vegetation dynamics in the Amazon using normalized difference vegetation index. **Remote Sensing of Environment**, v. 97, n. 4, p. 519-525, 2005.

KOLTUNOV, A.; USTIN, S. L.; ASNER, G. P.; FUNG, I. Selective logging changes forest phenology in the Brazilian Amazon: Evidence from MODIS image time series analysis. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, n. 11, p. 2431-2440, 2009.

KRIKKE, J. Axonometry: a matter of perspective. **IEEE Computer Graphics and Applications**, v. 20, n. 4, p. 7-11, 2000.

LATRUBESSE, E. M. Large rivers, megafans and other Quaternary avulsive fluvial systems: A potential "who's who" in the geological record. **Earth-Science Reviews**, v. 146, p. 1-30, 2015.

LATRUBESSE, E. M.; STEVAUX, J. Geomorphology and Environmental aspects of the Araguaia fluvial basin, Brazil. **Zeitschrift Fur Geomorphologie**, v. 129, p. 109-127, 2002.

LIN, C.-L.; KUO, C.-W.; LAI, C.-C.; TSAI, M.-D.; CHANG, Y.-C.; CHENG, H.-Y. A novel approach to fast noise reduction of infrared image. **Infrared Physics & Technology**, v. 54, n. 1, p. 1-9, 2011.

LIU, C.; FRAZIER, P.; KUMAR, L. Comparative assessment of the measures of thematic classification accuracy. **Remote Sensing of Environment**, v. 107, n. 4, p. 606-616, 2007.

- LIU, T.; YANG, X. Mapping vegetation in an urban area with stratified classification and multiple endmember spectral mixture analysis. **Remote Sensing of Environment**, v. 133, p. 251-264, 2013.
- LONG, D.; SINGH, V. P. An Entropy-Based Multispectral Image Classification Algorithm. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 51, n. 12, p. 5225-5238, 2013.
- LPDAAC. MODIS Reprojection Tool User's Manual. **Land Processes Distributed Active Archive Center**, v. 4.1, 2011.
- LUCAS, C. M.; SHEIKH, P.; GAGNON, P. R.; MCGRATH, D. G. How livestock and flooding mediate the ecological integrity of working forests in Amazon River floodplains. **Ecological Applications**, v. 26, n. 1, p. 190-202, 2016.
- LUNETTA, R. S.; KNIGHT, J. F.; EDIRIWICKREMA, J.; LYON, J. G.; WORTHY, L. D. Land-cover change detection using multi-temporal MODIS NDVI data. **Remote Sensing of Environment**, v. 105, n. 2, p. 142-154, 2006.
- MA, M.; VEROUSTRAETE, F. Reconstructing pathfinder AVHRR land NDVI time-series data for the Northwest of China. **Advances in Space Research**, v. 37, n. 4, p. 835-840, 2006.
- MAEDA, E. E.; ARCOVERDE, G. F. B.; PELLIKKA, P. K. E.; SHIMABUKURO, Y. E. Fire risk assessment in the Brazilian Amazon using MODIS imagery and change vector analysis. **Applied Geography**, v. 31, n. 1, p. 76-84, 2011.
- MARTIN-HERRERO, J. Anisotropic Diffusion in the Hypercube. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 45, n. 5, p. 1386-1398, 2007.
- MARTÍNEZ, B.; GILABERT, M. A. Vegetation dynamics from NDVI time series analysis using the wavelet transform. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, n. 9, p. 1823-1842, 2009.
- MELESSE, A. M.; NANGIA, V.; WANG, X.; MCCLAIN, M. Wetland Restoration Response Analysis using MODIS and Groundwater Data. **Sensors**, v. 7, n. 9, p. 1916-1933, 2007.
- MERÉNYI, E.; FARRAND, W. H.; TARANIK, J. V.; MINOR, T. B. Classification of hyperspectral imagery with neural networks: comparison to conventional tools. **EURASIP Journal on Advances in Signal Processing**, v. 2014, n. 1, p. 71, 2014.
- MESAS-CARRASCOSA, F. J.; CASTILLEJO-GONZÁLEZ, I. L.; DE LA ORDEN, M. S.; PORRAS, A. G.-F. Introducing sensor spectral response into the classification process. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 21, p. 195-204, 2013.
- MILNE, A. K. Change Direction Analysis Using Landsat Imagery: A Review Of Methodology. v. 1, p. 541-544, 1988.
- MMA. Ministério do Meio Ambiente. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis - IBAMA. Plano de Manejo do Parque Nacional do Araguaia - TO. Brasília, DF, Brasil, 2001.

\_\_\_\_\_. Ministério do Meio Ambiente. Caderno da Região Hidrográfica do Tocantins-Araguaia. **Plano Nacional de Recursos Hídricos**, Brasília, DF, Brasil, 2006.

MME. Folha SC. 22. Tocantins: Geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra. **Projeto RADAMBRASIL**, Rio de Janeiro, 1981.

MORTON, D. C.; DEFRIES, R. S.; SHIMABUKURO, Y. E.; ANDERSON, L. O.; ARAI, E.; ESPIRITO-SANTO, F. D. B.; FREITAS, R.; MORISETTE, J. Cropland expansion changes deforestation dynamics in the southern Brazilian Amazon. **Proc Natl Acad Sci U S A**, v. 103, n. 39, p. 14637-41, Sep 26 2006.

NARASIMHAN, R.; STOW, D. Daily MODIS products for analyzing early season vegetation dynamics across the North Slope of Alaska. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, n. 6, p. 1251-1262, 2010.

NASA. MODIS Surface Reflectance User's Guide. **MODIS Land Surface Reflectance Science Computing Facility**, v. 1.4, 2015.

NIDAMANURI, R. R.; ZBELL, B. Normalized Spectral Similarity Score (NS<sup>3</sup>) as an Efficient Spectral Library Searching Method for Hyperspectral Image Classification. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 4, n. 1, p. 226-240, 2011.

ORDOYNE, C.; FRIEDL, M. A. Using MODIS data to characterize seasonal inundation patterns in the Florida Everglades. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 11, p. 4107-4119, 2008.

OTHMAN, H.; SHEN-EN, Q. Noise reduction of hyperspectral imagery using hybrid spatial-spectral derivative-domain wavelet shrinkage. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 44, n. 2, p. 397-408, 2006.

OZDOGAN, M. The spatial distribution of crop types from MODIS data: Temporal unmixing using Independent Component Analysis. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, n. 6, p. 1190-1204, 2010.

PADMANABHAN, K. Cube structures for multiprocessors. **Communications of the ACM**, v. 33, n. 1, p. 43-52, 1990.

PARK, E.; LATRUBESSE, E. M. Modeling suspended sediment distribution patterns of the Amazon River using MODIS data. **Remote Sensing of Environment**, v. 147, p. 232-242, 2014.

PENG, D.; HUETE, A. R.; HUANG, J.; WANG, F.; SUN, H. Detection and estimation of mixed paddy rice cropping patterns with MODIS data. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 13, n. 1, p. 13-23, 2011.

PETTORELLI, N.; VIK, J. O.; MYSTERUD, A.; GAILLARD, J. M.; TUCKER, C. J.; STENSETH, N. C. Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. **Trends in Ecology & Evolution**, v. 20, n. 9, p. 503-10, Sep 2005.



PETUS, C.; LEWIS, M.; WHITE, D. Monitoring temporal dynamics of Great Artesian Basin wetland vegetation, Australia, using MODIS NDVI. **Ecological Indicators**, v. 34, p. 41-52, 2013.

RAMSAR CONVENTION. Convention on Wetlands of International Importance especially as Waterfowl Habitat (Iran), 2 February 1971. UN Treaty Series No. 14583. As amended by the Paris Protocol, 3 December 1982, and Regina Amendments, 28 May 1987. 1971.

\_\_\_\_\_. The List of Wetlands of International Importance. Rue Mauverney 28, CH-1196 Gland, Switzerland (accessed on 01.23.16 at ramsar.org). 2016.

RICOURTE, L. F.; JOKELA, J.; SIQUEIRA, A.; NÚÑEZ-AVELLANEDA, M.; MARIN, C.; VELÁZQUEZ-VALENCIA, A.; WANTZEN, K. M. Wetland Habitat Diversity in the Amazonian Piedmont of Colombia. **Wetlands**, v. 32, n. 6, p. 1189-1202, 2012.

SAKAMOTO, T.; PHUNG, C. V.; KOTERA, A.; NGUYEN, K. D.; YOKOZAWA, M. Analysis of rapid expansion of inland aquaculture and triple rice-cropping areas in a coastal area of the Vietnamese Mekong Delta using MODIS time-series imagery. **Landscape and Urban Planning**, v. 92, n. 1, p. 34-46, 2009a.

\_\_\_\_\_. Detection of Yearly Change in Farming Systems in the Vietnamese Mekong Delta from MODIS Time-Series Imagery. **Japan Agricultural Research Quarterly: JARQ**, v. 43, n. 3, p. 173-185, 2009b.

SAKAMOTO, T.; VAN NGUYEN, N.; KOTERA, A.; OHNO, H.; ISHITSUKA, N.; YOKOZAWA, M. Detecting temporal changes in the extent of annual flooding within the Cambodia and the Vietnamese Mekong Delta from MODIS time-series imagery. **Remote Sensing of Environment**, v. 109, n. 3, p. 295-313, 2007.

SAKAMOTO, T.; VAN NGUYEN, N.; OHNO, H.; ISHITSUKA, N.; YOKOZAWA, M. Spatio-temporal distribution of rice phenology and cropping systems in the Mekong Delta with special reference to the seasonal water flow of the Mekong and Bassac rivers. **Remote Sensing of Environment**, v. 100, n. 1, p. 1-16, 2006.

SAKAMOTO, T.; WARDLOW, B. D.; GITELSON, A. A.; VERMA, S. B.; SUYKER, A. E.; ARKEBAUER, T. J. A Two-Step Filtering approach for detecting maize and soybean phenology with time-series MODIS data. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, n. 10, p. 2146-2159, 2010.

SANTHANA VANNAN, S. K.; COOK, R. B.; PAN, J. Y.; WILSON, B. E. A SOAP Web Service for accessing MODIS land product subsets. **Earth Science Informatics**, v. 4, n. 2, p. 97-106, 2011.

SCHUBERT, P.; LUND, M.; STRÖM, L.; EKLUNDH, L. Impact of nutrients on peatland GPP estimations using MODIS time series data. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, n. 10, p. 2137-2145, 2010.

SHALIMETTILSHA, S.; ANTO KUMAR, R. P. A New Proposed Modification on the BDND Filtering Algorithm for the Removal of High Density Impulse Noise. **International Journal of Engineering Research and Applications**, v. 4, n. 4, p. 306-308, 2014.

SIMS, N. C.; COLLOFF, M. J. Remote sensing of vegetation responses to flooding of a semi-arid floodplain: Implications for monitoring ecological effects of environmental flows. **Ecological Indicators**, v. 18, p. 387-391, 2012.

SIWE, R. N.; KOCH, B. Change vector analysis to categorise land cover change processes using the tasselled cap as biophysical indicator. **Environ Monit Assess**, v. 145, n. 1-3, p. 227-35, Oct 2008.

SOUZA-FILHO, P. W. M.; PARADELLA, W. R.; RODRIGUES, S. W. P.; COSTA, F. R.; MURA, J. C.; GONÇALVES, F. D. Discrimination of coastal wetland environments in the Amazon region based on multi-polarized L-band airborne Synthetic Aperture Radar imagery. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 95, n. 1, p. 88-98, 2011.

STANLEY, K. O.; D'AMBROSIO, D. B.; GAUCI, J. A hypercube-based encoding for evolving large-scale neural networks. **Artif Life**, v. 15, n. 2, p. 185-212, Spring 2009.

STEVEN, D. D.; LOWRANCE, R. Agricultural conservation practices and wetland ecosystem services in the wetland-rich Piedmont-Coastal Plain region. **Ecological Applications**, v. 21, n. 3, 2011.

SU, B.; NOGUCHI, N. Discrimination of Land Use Patterns in Remote Sensing Image Data using Minimum Distance Algorithm and Watershed Algorithm. **Engineering in Agriculture, Environment and Food**, v. 6, n. 2, p. 48-53, 2013.

THAKUR, J. K.; SRIVASTAVA, P. K.; SINGH, S. K.; VEKERDY, Z. Ecological monitoring of wetlands in semi-arid region of Konya closed Basin, Turkey. **Regional Environmental Change**, v. 12, n. 1, p. 133-144, 2011.

TOWNSHEND, J. R. G.; JUSTICE, C. O. Towards operational monitoring of terrestrial systems by moderate-resolution remote sensing. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n. 1-2, p. 351-359, 2002.

UNESCO. List of BIOSPHERE RESERVES which are wholly or partially RAMSAR Wetlands. **Man and the Biosphere (MAB)**, 2009.

VALENTE, C. R.; LATRUBESSE, E. M. Fluvial archive of peculiar avulsive fluvial patterns in the largest Quaternary intracratonic basin of tropical South America: The Bananal Basin, Central-Brazil. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 356-357, p. 62-74, 2012.

VALENTE, C. R.; LATRUBESSE, E. M.; FERREIRA, L. G. Relationships among vegetation, geomorphology and hydrology in the Bananal Island tropical wetlands, Araguaia River basin, Central Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 46, p. 150-160, 2013.

- VARADE, R. R.; DHOTRE, M. R.; PAHURKAR, A. B. A Survey on Various Median Filtering Techniques for Removal of Impulse Noise from Digital Images. **International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology**, v. 2, n. 2, p. 606-609, 2013.
- VENKATESWARAN, C. J.; VIJAYA, R.; SARAVANAN, A. M. A Fuzzy Based Approach to Classify Remotely Sensed Images. **International Journal of Engineering and Technology**, v. 5, n. 3, p. 3051-3055, 2013.
- WALDROP, M. M. Hypercube Breaks a Programming Barrier: A deceptively simple approach allows a massively parallel computer to approach the maximum theoretical speedup. **Science**, v. 240, n. 4850, p. 286, Apr 15 1988.
- WANG, Q.; ADIKU, S.; TENHUNEN, J.; GRANIER, A. On the relationship of NDVI with leaf area index in a deciduous forest site. **Remote Sensing of Environment**, v. 94, n. 2, p. 244-255, 2005.
- WEISS, D. J.; CRABTREE, R. L. Percent surface water estimation from MODIS BRDF 16-day image composites. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 8, p. 2035-2046, 2011.
- WEN, L.; YANG, X.; SAINTILAN, N. Local climate determines the NDVI-based primary productivity and flooding creates heterogeneity in semi-arid floodplain ecosystem. **Ecological Modelling**, v. 242, p. 116-126, 2012.
- WOLFE, R. E.; NISHIHAMA, M.; FLEIG, A. J.; KUYPER, J. A.; ROY, D. P.; STOREY, J. C.; PATT, F. S. Achieving sub-pixel geolocation accuracy in support of MODIS land science. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n. 1-2, p. 31-49, 2002.
- WULDER, M. A.; MASEK, J. G.; COHEN, W. B.; LOVELAND, T. R.; WOODCOCK, C. E. Opening the archive: How free data has enabled the science and monitoring promise of Landsat. **Remote Sensing of Environment**, v. 122, p. 2-10, 2012.
- XIAO, X.; HAGEN, S.; ZHANG, Q.; KELLER, M.; MOORE, B. Detecting leaf phenology of seasonally moist tropical forests in South America with multi-temporal MODIS images. **Remote Sensing of Environment**, v. 103, n. 4, p. 465-473, 2006.
- XU, Y.; SHEN, Y. Reconstruction of the land surface temperature time series using harmonic analysis. **Computers & Geosciences**, v. 61, p. 126-132, 2013.
- YAN, Y.-E.; OUYANG, Z.-T.; GUO, H.-Q.; JIN, S.-S.; ZHAO, B. Detecting the spatiotemporal changes of tidal flood in the estuarine wetland by using MODIS time series data. **Journal of Hydrology**, v. 384, n. 1-2, p. 156-163, 2010.
- YUGANDHAR, D.; NAYAK, S. K. Performance analysis of median filtering approaches for image de-noising in the presence of impulsive noise. **European Scientific Journal**, v. 10, n. 15, p. 537-544, 2014.
- ZAITSEV, D. A.; SHMELEVA, T. R. Verification of hypercube communication structures via parametric Petri nets<sup>1</sup>. **Cybernetics and Systems Analysis**, v. 46, n. 1, p. 105-114, 2010.

ZEDLER, J. B.; KERCHER, S. WETLAND RESOURCES: Status, Trends, Ecosystem Services, and Restorability. **Annual Review of Environment and Resources**, v. 30, n. 1, p. 39-74, 2005.

ZENG, H.; JIA, G. Impacts of snow cover on vegetation phenology in the arctic from satellite data. **Advances in Atmospheric Sciences**, v. 30, n. 5, p. 1421-1432, 2013.

ZHANG, S.; KARIM, M. A. A new impulse detector for switching median filters. **IEEE Signal Processing Letters**, v. 9, n. 11, p. 360-363, 2002.

ZHANG, X.; FRIEDL, M. A.; SCHAAF, C. B. Global vegetation phenology from Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): Evaluation of global patterns and comparison with in situ measurements. **Journal of Geophysical Research**, v. 111, n. G4, 2006.

ZHAO, B.; YAN, Y.; GUO, H.; HE, M.; GU, Y.; LI, B. Monitoring rapid vegetation succession in estuarine wetland using time series MODIS-based indicators: An application in the Yangtze River Delta area. **Ecological Indicators**, v. 9, n. 2, p. 346-356, 2009.

ZHAO, J.; WANG, Y.; HASHIMOTO, H.; MELTON, F. S.; HIATT, S. H.; ZHANG, H.; NEMANI, R. R. The Variation of Land Surface Phenology From 1982 to 2006 Along the Appalachian Trail. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 51, n. 4, p. 2087-2095, 2013.

ZHOU, W.; ZHANG, D. Progressive switching median filter for the removal of impulse noise from highly corrupted images. **IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Analog and Digital Signal Processing**, v. 46, n. 1, p. 78-80, 1999.