



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS

JESLEY MILENA SILVA TENÓRIO

**PROCESSAMENTO DE IMAGENS ÓPTICAS DE ALTA RESOLUÇÃO ESPACIAL
APLICADA AO PLANEJAMENTO MUNICIPAL DE ÁREAS VERDES URBANAS**

RECIFE

2023

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
ENGENHARIA CARTOGRÁFICA E DE AGRIMENSURA

JESLEY MILENA SILVA TENÓRIO

PROCESSAMENTO DE IMAGENS ÓPTICAS DE ALTA RESOLUÇÃO ESPACIAL
APLICADA AO PLANEJAMENTO MUNICIPAL DE ÁREAS VERDES URBANAS

TCC apresentado ao Departamento de Engenharia Cartográfica da Universidade Federal de Pernambuco, Campus Recife, como requisito para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Cartográfica e de Agrimensura.

Orientador(a): Dr^a. Prof.^a Ana Lúcia Bezerra Candeias

RECIFE

2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Tenório, Jesley Milena Silva.

Processamento de imagens ópticas de alta resolução espacial aplicada ao planejamento municipal de áreas verdes urbanas / Jesley Milena Silva Tenório. - Recife, 2023.

81 p. : il., tab.

Orientador(a): Ana Lúcia Bezerra Candeias

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Cartográfica e de Agrimensura - Bacharelado, 2023.

Inclui referências, apêndices.

1. Cadastro ambiental urbano. 2. Gestão de áreas verdes. 3. índices de vegetação. 4. Município de Floresta-PE. I. Candeias, Ana Lúcia Bezerra. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

JESLEY MILENA SILVA TENÓRIO

**PROCESSAMENTO DE IMAGENS ÓPTICAS DE ALTA RESOLUÇÃO ESPACIAL
APLICADA AO PLANEJAMENTO MUNICIPAL DE ÁREAS VERDES URBANAS**

TCC apresentado ao Departamento de Engenharia Cartográfica da Universidade Federal de Pernambuco, Campus Recife, como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Cartográfica de Agrimensura.

Aprovado em: 27 / 04 / 2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dr^a. Ana Lúcia Bezerra Candeias (Orientadora)
(Orientadora - UFPE)

Prof. Dr. João Rodrigues Tavares Junior
(Examinador - UFPE)

Prof^a. Dr^a. Jarcilene Silva de Almeida
(Examinadora - UFPE)

MSc. Laízy de Santana Azevedo
(Examinadora - UFPE)

Dedico meu labor ao meu Senhor Jesus Cristo, e à Cristina Tenório, a melhor Mãe do mundo, bem como a minha querida irmã e às minhas lindas sobrinhas Ana Beatriz e Alicia.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por tornar tudo isto possível, concedendo-me a oportunidade de realizar este sonho, sendo o meu refúgio e a minha fortaleza em todos os momentos, guiando-me em cada desafio, e capacitando-me para concluir cada etapa, por ser o meu companheiro de caminhada, segurando-me a mão e livrando-me dos males desta árdua jornada. Sua presença sustentou-me e Sua Palavra alimentou-me, de modo que não desfaleci, mas venci pelo Seu Nome.

Aos meus pais, Cristina Luis da Silva Tenório e Iraniel Pereira Tenório, que são a base daquilo que me tornei, os quais iluminaram-me com a Palavra da sabedoria e investiram nos meus estudos. Mas em especial, agradeço à minha querida Mãe, que é um presente de Deus em minha vida, é a minha melhor amiga, e está ao meu lado nos momentos mais difíceis, de modo que eu jamais teria conseguido sem ela.

À minha irmã, Jessyca Tenório, pelo apoio, e às minhas sobrinhas, Ana Beatriz e Alicia, cujo brilho é como a luz da manhã que raia sobre a face da Terra, espalhando esperança e alegria. Elas extraem o melhor de mim, mas nunca me esquecerei como era difícil escrever o TCC quando elas estavam em casa.

A todos os meus familiares e amigos que oram e torcem por mim, apoiando-me com palavras e ações de paz, direcionando bons sentimentos ao meu respeito.

À minha estimada orientadora, Dr^a. Ana Lúcia Bezerra Candeias, que com dedicação e carinho, ampliou a minha visão acadêmica e profissional, e adicionou-me conhecimentos preciosos. Agradeço ao Senhor por sua vida.

À Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), instituição à qual estou vinculada e que tem sido uma ponte para muitas experiências, como possibilitar o meu ingresso no PIBIC 2022/2024 (Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica) que me proporcionou uma bolsa graças ao CNPq, Processo 126635/2022-6.

Ao Departamento de Engenharia Cartográfica e de Agrimensura (DECART) e a todos os incríveis professores que compõem o corpo docente, em especial ao Dr. João Tavares Júnior, Dr^a Andrea Carneiro, Dr. Carlos Schuler, Dr. Cezário Lima, Dr. Erison Barros, Dr. Jaime Mendonça, Dr. José Portugal, Dr^a Karoline Jamur, Dr^a Maria de Lourdes Gonçalves, Dr. Rodrigo Mikosz, Dr. Silvio Garnés e também

agradeço aos professores Ms. Weyller Albuquerque e Ms. Carlos Fabrício. Eles foram fundamentais na minha formação e na realização deste trabalho.

E, finalmente, agradeço à banca examinadora, pela disposição em participar na defesa do presente trabalho e acrescentar observações de grande significância, colaborando para melhor compreensão do trabalho.

“Características estruturais da paisagem são observáveis, descritíveis e quantificáveis” (LANG e BLASCHKE, 2009, p. 16).

RESUMO

O programa Cidades+verdes do Governo Federal inseriu os municípios brasileiros em uma nova perspectiva sobre as chamadas áreas verdes urbanas (AVU), estruturando conceitos e criando o Cadastro Ambiental Urbano (CAU), que promove o georreferenciamento tanto dessas áreas como de locais que podem vir a se tornar em uma AVU para que possam ser melhor geridas e monitoradas pelas governanças municipais. Como a principal característica dessas áreas é a presença de cobertura vegetal em zonas urbanas, o presente trabalho se utiliza dessa condição para discriminar e quantizar a extensão espacial dessas feições sem a necessidade de passar por etapas de vetorização do atributo alvo, que demandam muito dos computadores, mas utilizando-se do processamento de imagens de alta resolução. Tal método constitui-se em uma alternativa prática, haja vista que as estruturas vegetais são feições naturais dinamicamente ativas, sendo potencialmente passível de variações estruturais consideráveis no decorrer de um curto período de tempo, de modo que a obtenção de métricas, referentes à cobertura vegetal, precisam ser periodicamente atualizadas, e o sensoriamento remoto de imagens de alta resolução possibilita o mapeamento de estruturas urbanas. Porém, o processamento delas torna-se um pouco mais complexo, em relação às imagens de média resolução, principalmente para áreas urbanizadas, haja vista a diversidade de elementos, de modo que a classificação dessas imagens, visando a detecção de alvos, pode gerar resultados insatisfatórios, até para métodos de classificação supervisionados. A partir disso, como deseja-se extrair as áreas de vegetação urbana, o presente trabalho se utiliza dos índices de vegetação GLI (*Green Leaf Index*), GRVI (*Green-Red Vegetation Index*) e RGBVI (*Red Green Blue Vegetation Index*) para discriminar as áreas vegetadas por um processo de limiarização semiautomatizada mediante estratificação de dados pelo método dos quartis, utilizando o *software* livre Qgis 3.16.11. A metodologia foi aplicada para a cidade de Floresta, município pernambucano com processo de urbanização ascendente, onde obteve-se, para cada índice, camadas *raster*, das áreas de vegetação urbana, cuja extensão pode ser mapeada e quantizada, calculando-se uma média de 9,74 ha, equivalente à 18,34% da zona urbana analisada da cidade. No que diz respeito à acurácia temática dos produtos gerados, a classificação obtida

pelo GRVI obteve os melhores resultados, com exatidão global de 86,62% e Kapa (κ) de 73,23%.

Palavras-chave: Cadastro ambiental urbano; gestão de áreas verdes; índices de vegetação; Floresta-PE.

ABSTRACT

The Federal Government's Cidades+verdes program inserted Brazilian cities into a new perspective on the urban green areas (AVU), structuring concepts and creating the Urban Environmental Registry (CAU), which promotes the georeferencing of both these areas and places that can become an AVU so that they can be better managed and monitored by municipal governance. As the main characteristic of these areas is the presence of vegetation cover in urban areas, the present work uses this condition to discriminate and quantize the spatial extension of these features without the need to go through stages of vectorization of the target attribute, which are very demanding on computers, but using high resolution image processing. This method constitutes a practical alternative, given that plant structures are dynamically active natural features, potentially subject to considerable structural variations over a short period of time, so that obtaining metrics referring to plant cover, need to be periodically updated, and remote sensing of high-resolution images makes it possible to map urban structures. However, their processing becomes a little more complex in relation to medium resolution images, mainly for urbanized areas, given the diversity of elements, so that the classification of these images, aiming at target detection, can generate results unsatisfactory even for supervised classification methods. From this, as it is desired to extract the areas of urban vegetation, the present work uses the vegetation indices GLI (Green Leaf Index), GRVI (Green-Red Vegetation Index) and RGBVI (Red Green Blue Vegetation Index) to discriminate the vegetated areas by a semi-automated thresholding process through data stratification by the quartile method (or equal frequency method), using the free software Qgis 3.16.11. The methodology was applied to the city of Floresta in the state of Pernambuco, with an ascending urbanization process, where, for each index, raster layers of urban vegetation areas were obtained, whose extension can be mapped and quantized, calculating an average of 9.74 ha, equivalent to 18.34% of the analyzed urban area of the city. With regard to the thematic accuracy of the generated products, the classification obtained by the GRVI obtained the best results, with an overall accuracy of 86.62% and Kappa (κ) of 73.23%.

Keywords: Urban environmental cadastre; management of green areas; vegetation indices; city of Floresta-PE.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplificação de representação computacional de dados terrestres pelo modelo vetorial e pelo modelo matricial	26
Figura 2 – Exemplificação do princípio da aritmética de bandas	30
Figura 3 – Representação gráfica do limiar ótimo e erros de comissão e omissão	39
Figura 4 – Localização da quadrícula na qual obteve-se a ortoimagem utilizada	46
Figura 5 – Ortoimagem SC-24-X-A-IV-2-NE-E-II original e recortada	47
Figura 6 – Metodologia em Diagrama de blocos	48
Figura 7 – Pontos de amostragem para realização da análise do espaço de atributos	50
Figura 8 – Comparação entre a ortoimagem original e as imagens estratificadas dos índices em uma porção urbana	51
Figura 9 – Comparação entre a ortoimagem original e as imagens estratificadas dos índices em uma porção periurbana	51
Figura 10 – Imagens binárias dos índices sobrepostas sobre imagem original	52
Figura 11 – Ortoimagem original, as imagens dos índices e a composição colorida	55
Figura 12 – Área recortada da ortoimagem correspondente à zona urbana prevista no plano diretor de Floresta-PE	70

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classificação das Áreas Verdes Urbanas (AVU) adotada pelo Ministério do Meio Ambiente a partir dos serviços ecossistêmicos prestados à zona urbana	24
Quadro 2 – Típica curva de reflectância de vegetação verde fotossinteticamente ativa	28
Quadro 3 – Espectro de absorção de pigmentos foliares	29

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Tendências de desmatamento da vegetação nativa e do aumento das áreas destinadas à infraestrutura urbana	15
Gráfico 2 – Representação gráfica do comportamento do GRVI em função do número digital das bandas <i>Red</i> e <i>Green</i>	32
Gráfico 3 – Curvas de Nível do GRVI conforme a equação 2 para os valores fixos 70, 90 e 110	33
Gráfico 4 – Curvas de Nível do GLI conforme a equação 4 para os valores fixos 70, 90 e 110	35
Gráfico 5 – Curvas de Nível do RGBVI conforme a equação 6 para os valores fixos 70, 90 e 110	37
Gráfico 6 – Análise pluviométrica da área de estudo em relação à época de aquisição da imagem utilizada	44
Gráfico 7 – Histogramas das imagens dos índices GRVI, RGBVI e GLI	56
Gráfico 8 – Espaço bidimensional de atributos GRVI x RGBVI	57
Gráfico 9 – Espaço bidimensional de atributos GRVI x GLI	58
Gráfico 10 - Espaço tridimensional de atributos das imagens dos três índices	58

LISTA DE MAPAS

Mapa 1 – Município de Floresta-PE com centro urbano destacado	41
Mapa 2 – Topografia do município de Floresta-PE	42
Mapa 3 – Topografia da área de estudo sobreposta à ortoimagem SC-24-X-A-IV-2-NE-E-II do local	43
Mapa 4 – Área de estudo em relação ao zoneamento do município de Floresta-PE conforme o plano diretor da cidade	45
Mapa 5 – Análise das seções AA' e BB' do GLI	61
Mapa 6 – Análise das seções AA' e BB' do RGBVI	62
Mapa 7 – Análise das seções AA' e BB' do GRVI	64
Mapa 8 – Resultados das áreas de vegetação extraídas e recortadas de cada índice	66
Mapa 9 – Pontos de amostragem do processo de validação da classificação obtida para cada índice	67
Mapa 10 – Classificação das imagens dos índices recortadas conforme a zona urbana do município de Floresta-PE	71
Mapa 11 - Área de vegetação urbana extraída do trecho leste do centro urbano de Floresta-PE	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Matriz dos coeficientes de correlação dos índices e estatísticas gerais	56
Tabela 2 – Magnitude das áreas de vegetação extraídas em cada índice	65
Tabela 3 – Magnitude das áreas de vegetação extraídas da zona urbana de Floresta-PE em cada índice	66
Tabela 4 – Matriz de confusão da classificação da imagem do GLI	68
Tabela 5 – Indicadores de qualidade da classificação da imagem do GLI	68
Tabela 6 – Matriz de confusão da classificação da imagem do RGBVI	68
Tabela 7 – Indicadores de qualidade da classificação da imagem do RGBVI	69
Tabela 8 – Matriz de confusão da classificação por GRVI	69
Tabela 9 – Indicadores de qualidade da classificação da imagem do GRVI	69
Tabela 10 – Magnitude das áreas de vegetação urbana obtidas em cada índice cujas imagens foram previamente recortadas conforme o limite da zona urbana do município	72

LISTA DE ABREVIações

AVU	Áreas de Verdes Urbanas
APAC	Agência Pernambucana De Águas e Climas
CAU	Cadastro Ambiental Urbano
CBCG	Colóquio Brasileiro De Ciências Geodésicas
COBRAC	Congresso Brasileiro De Cadastro Territorial Multifinalitário
GLI	Green Leaf Index
GRVI	Green-Red Vegetation Index
IBGE	Instituto Brasileiro De Geografia E Estatística
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPA	Instituto Agrônômico de Pernambuco
MMA	Ministério Do Meio Ambiente
PE3D	Projeto Pernambuco Tridimensional
PEC	Padrão de Exatidão Cartográfica
REM	Radiação Eletromagnética
RGB	Red, Green, Blue System
RGBVI	Red Green Blue Vegetation Index
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
USGS	United States Geological Survey

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Objetivo geral	16
1.2 Objetivos específicos	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1 Sensoriamento remoto da paisagem urbana	17
2.2 Elementos de interpretação visual de imagens com aplicação na geração de produtos cartográficos de zonas urbanas	19
2.3 Áreas verdes urbanas (AVU) e áreas livres.....	22
2.4 Quantização da extensão espacial de atributos expressados em dados matriciais	25
2.5 Comportamento espectral da vegetação na faixa do visível	27
2.6 Índices de vegetação	29
2.6.1 GRVI (<i>Green-Red Vegetation Index</i>)	30
2.6.2 GLI (<i>Green Leaf Index</i>).....	33
2.6.3 RGBVI (<i>Red Green Blue Vegetation Index</i>)	36
2.7 Limiarização (binarização) semiautomática.....	38
3 ÁREA DE ESTUDO	41
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	46
4.1 Obtenção das imagens dos índices GRVI, GLI e RGBVI	49
4.2 Estratificação dos dados.....	50
4.3 Extração da área de cobertura vegetal	52
4.4 Validação da classificação	53
4.5 Cálculo da dimensão da área	54
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	55
5.1 Análise estatística dos índices GLI, RGBVI e GRVI.....	55
5.2 Classificação das imagens e extração das áreas de vegetação.....	59
5.3 Magnitude das áreas extraídas	65

5.4 Validação da classificação	66
5.5 Aplicação do método para os casos sem influência das áreas periurbanas altamente vegetadas	69
6 CONCLUSÕES.....	73
REFERÊNCIAS	75
APÊNDICE A – MAPA 11.....	81

1 INTRODUÇÃO

O ambiente urbano é convidativo ao ser humano, pois ele oferece oportunidades e possibilidades que o meio rural ou natural não dá ao homem, como uma integração social maior, maiores oportunidades de trabalho e ascensão econômica, maior acessibilidade ao comércio, centros educacionais e hospitalares, dentre outros serviços secundários. Contudo, uma das principais características do que se entende por urbano atualmente é o afastamento ou extinção do meio natural, das áreas florestadas, da fauna local.

Porém, como expresso em MMA (2021. p.7) e LOBODA, *et al.* (2005), a existência de áreas verdes em ambientes urbanos estão relacionadas a melhoria da qualidade do ar, a atenuação dos impactos climáticos, à segurança hídrica e a redução de doenças de natureza física e psicológica. E tendo este conhecimento, Howard (1996. p.110) reflete que a sociedade humana e a natureza existem para serem desfrutadas em conjunto. O urbanista foi o idealizador do movimento denominado cidade jardim, um seguimento do planejamento urbano que tinha por objetivo a valorização da estética campestre, com o plantio de árvores nas vias urbanas como elemento essencial na paisagem (CARMO, REBOLLAR e LOCH, 2016. p.4).

O Estatuto da Cidade, Lei nº 10.257/2001, que destaca, dentre outros objetivos, a garantia do bem estar dos cidadãos, o equilíbrio ambiental e o direito ao lazer através da adoção de políticas urbanas que são conjuntos de planos e ações tanto por parte do poder público, isoladamente, como em conjunto com o setor privado, necessárias à ordem urbanística visando o bem-estar das comunidades (CARVALHO FILHO, 2008). O código florestal brasileiro, Lei nº 12.651/2012, prevê a disposição de estruturas vegetais em zonas urbanas ao conceituar as Áreas de Vegetação Urbana no inciso XX do artigo 3º.

As grandes cidades brasileiras, contudo, apresentam um *déficit* de áreas urbanas vegetadas, o que pode estar relacionado diretamente à como se deu o processo de urbanização, haja vista que, segundo IBGE (2022. p.1), a urbanização é um fenômeno que interfere diretamente na organização do espaço geográfico de um determinado local e, conseqüentemente em sua relação com o meio ao redor.

É sabido, porém, que a urbanização de grande parte das cidades brasileiras, devido a uma etapa de industrialização rápida, ocorreu de modo intenso e

desordenado, de tal modo que as gestões municipais foram incapazes de acompanhar e ordenar o processo de assentamento da população, outrora rural, outrora proveniente de regiões interioranas do Brasil (TERRA e COELHO, 2005; SPOSITO, 2005). Tal fato acarretou muitos problemas como a existência e crescimento de assentamentos urbanos irregulares, que, por ocupar locais impróprios, ocasionaram a degradação da vegetação nativa, desarmonia paisagística, aumento da população de risco, e infraestrutura precária ou inexistente.

Com o objetivo de promover o crescimento e a melhoria dos espaços verdes nos municípios, o Governo Federal instituiu o programa Cidades+Verdes, e o Cadastro Ambiental Urbano (CAU), de caráter declaratório, que busca através do georreferenciamento das AVU, ser uma ferramenta de gestão dessas estruturas, inserindo os governos municipais em uma nova perspectiva sobre a gestão urbana, que de certa forma, que de certa forma, os prepara para a obrigatoriedade do cadastro urbano obrigatório, uma realidade para o futuro próximo.

Sem um planejamento urbano que considere a existência e a gestão inteligente das áreas vegetadas intraurbanas, e coordene o processo de assentamento urbano, inibindo a ocupação de zonas proibidas e áreas de preservação permanente, que monitore o grau de impermeabilização dos locais, prevendo a disposição das áreas verdes para a infiltração de água no solo, a cidade que desenvolve sua zona urbana, tende a enfrentar casos de deslizamentos de terra, de alagamentos e enchentes, degradação da vegetação nativa, ilhas de calor e poluição do ar, ambos com impactos na vida e saúde da população.

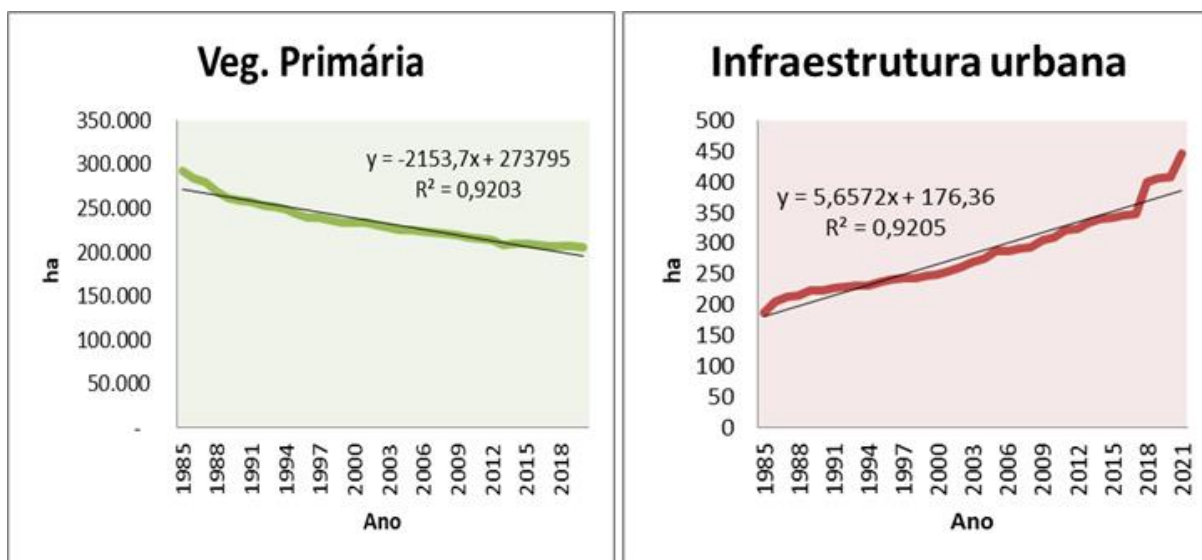
A maioria dos problemas citados, se não todos, ocorrem com frequência nas grandes metrópoles brasileiras, como a Recife, por exemplo, a capital do estado de Pernambuco e a maior metrópole da região Nordeste, sendo o nono município mais populoso do Brasil (Censo de 2010), que enfrenta anualmente principalmente casos severos de enchentes e alagamentos e ilhas de calor. Porém, em contraste com os grandes centros urbanos, estão as cidades de menor porte com tendência à expansão urbana, como o município pernambucano de Floresta, que está a cerca de 433 km da capital do estado, Recife (MASCARENHAS *et al.*, 2005), e possui a segunda maior extensão territorial de Pernambuco.

Segundo o IBGE (2017), conforme o censo de 2010, a região de Floresta apresenta grau de urbanização moderado, e sua área urbanizada equivale a 4,56 km² (2019), correspondendo à apenas 0,13% da área total. Fazendo uma

comparação com Recife, a área urbanizada da capital é, aproximadamente, 31 vezes maior que a área urbanizada existente em Floresta. O município, porém, já apresenta tendência para a expansão urbana, conforme avaliação da Embrapa em 2001, além de apresentarem crescimento ascendente da população urbana, de acordo com os censos do IBGE entre 1970 e 2010.

O município vem apresentando também, ao longo dos últimos 35, decréscimo da vegetação primária (Gráfico 1a), conforme dados oriundos do Mapbiomas (2021), que segundo SILVA (2011), tal redução vegetal, ocorrida desde 1987, é resultado da exploração antrópica de recursos florestais, da necessidade referente à expansão urbana e às atividades agropecuárias. No que diz respeito à expansão urbana, esse fenômeno pode ser constatado pelo crescimento das áreas referentes à infraestrutura urbana (Gráfico 1b).

Gráfico 1 – Tendências de desmatamento da vegetação nativa e do aumento das áreas destinadas à infraestrutura urbana



a) Vegetação Primária; b) Infraestrutura urbana

Fonte: Mapbiomas (2023)

Tendo em vista a tendência à expansão urbana apresentada por cidades de pequeno porte, como o município de Floresta-PE, e a necessidade de garantir a preservação e o crescimento das áreas verdes urbanas (AVU) como parte importante na gestão municipal, o presente trabalho se propõe a discriminar e quantizar a extensão espacial das áreas de vegetação urbana existentes em Floresta-PE, sem a necessidade de passar por etapas de vetorização do atributo

alvo, mas utilizando-se do processamento de imagens de zonas urbanas de alta resolução utilizando índices de vegetação GLI, GRVI e RGBVI para discriminar a vegetação por um processo de limiarização semiautomatizada mediante estratificação de dados pelo método dos quartis utilizando o Software Qgis 3.16.11.

1.1 Objetivo geral

Discriminar e quantizar, de modo semiautomático, a porção espacial ocupada pelas áreas de vegetação urbanas, utilizando índices de vegetação que utilizam as faixas do visível e imagens de alta resolução espacial, promovendo a aplicação do sensoriamento remoto de alta resolução e das técnicas de processamento de imagens, como ferramentas favoráveis ao desenvolvimento urbano ordenado e inteligente.

1.2 Objetivos específicos

- Discriminar e extrair as áreas de vegetação urbana por limiarização semiautomática mediante o método de estratificação por quartis das imagens dos índices GLI, GRVI e RGBVI;
- Verificar a sensibilidade de detecção destes índices no mapeamento das áreas de vegetação urbana por meio de análise de perfis espectrais;
- Analisar a qualidade da classificação por limiarização semiautomática pelos indicadores Exatidão global, Kappa (κ) e Coeficiente Tau (τ).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Sensoriamento remoto da paisagem urbana

Levando em consideração a proposta temática que será abordada no presente trabalho e as discussões que envolvem o complexo conceito de paisagem, adotaremos a definição de paisagem em seu sentido científico, conforme sintetizado por Lang e Blaschke (2009), de acordo com os trabalhos sobre a ecologia e teoria da paisagem de Turner, Gardner e O'Neill (2001) e Neef (1967):

Unidade espacial que em seus efeitos estruturais e na sua estrutura é homogênea, ou seja, uniforme (conceito de homogeneidade). Unidade espacial que em pelo menos um fator seja heterogênea (conceito de heterogeneidade). (LANG e BLASCHKE, 2009, p.400)

Tal junção de conceitos para descrever a paisagem, cuja definição é de grande relevância, haja vista ser um dos objetos de estudo da cartografia, é melhor compreendida quando os dois conceitos são vistos sob diferentes escalas de visualização, metodologia amparada pelas definições de paisagem de George (1970, *apud* ORTIGOZA, 2010, p.82), e Terra e Coelho (2005, p.13) que enfatizam o aspecto da percepção visual.

A partir disso, o conceito de homogeneidade pode ser melhor aplicado sob uma escala de visualização pequena, diante de uma pluralidade de ambientes presentes na superfície terrestre, as porções que compartilham de um mesmo padrão visual, serão entendidos como uma classe, um grupo, um tipo de paisagem. Já o conceito de heterogeneidade se compreende melhor sob uma escala de visualização grande, onde campo visual se limitará a uma paisagem em questão onde a percepção dos detalhes de sua estrutura é mais clara, implicando na distinção de diferentes atributos (heterogeneidade).

Para entender, de fato, a paisagem com a qual o presente trabalho se ambienta, não sendo este, ainda, o objeto de maior interesse, mas de total relevância, faz-se necessário estruturar, sobre diferentes contextos, o que vem a caracterizar atualmente uma paisagem urbana.

No aspecto etimológico da palavra, o termo urbano remeta ao conceito de cidade, que segundo Terra e Coelho (2005):

Está associada à concentração de muitas pessoas em um espaço relativamente restrito e à substituição das atividades primárias (agropecuária) por atividades secundárias (indústria) e terciárias (serviço). A

cidade é uma área urbana para qual convergem pessoas, mercadorias, capitais, tecnologia, etc. (TERRA e COELHO, 2005, p.408).

Esse conceito formal é naturalmente assimilado pelos indivíduos que interagem direta ou indiretamente com o meio urbano, de modo que uma paisagem pode ser grosseiramente classificada como urbana mediante o reconhecimento visual/sensitivo de atributos urbanos característicos (comparação), como a existência de aglomerados residenciais, edificações com mais de um pavimento, rede viária densa, alto fluxo de trânsito, alta atividade comercial, existência de periferias, pouca ou nenhuma área florestada, ou arborizada, pouca ou nenhuma área de cultivo, poluição visual e sonora, dentre outros parâmetros que podem ser facilmente percebidos numa análise *in loco*.

Sabendo, contudo, que o estudo das paisagens à distância é possibilitado mediante processamento e fotointerpretação de imagens digitais obtidas pelo sensoriamento remoto e pela fotogrametria, uma área descrita numa determinada cena pode ser classificada como urbana, mediante a percepção visual dos atributos característicos de uma estrutura espacial urbana, utilizando-se dos elementos de interpretação visual da imagem para reduzir a subjetividade do processo.

No que diz respeito ao aspecto legal do que se define por área ou zona urbana no Brasil, no Decreto – lei nº 311 de 1938, que dispõe sobre a divisão territorial do país, dá-se a entender, especificamente nos artigos 11 e 12, que a delimitação de zonas rurais e urbanas são atribuídas ao poder municipal, de modo que a área abrangesse um número mínimo de moradias. Segundo declaração em estudo do IBGE (2017, p.25) e conforme Damasco (2018, p.1) expressa, O IBGE utiliza o zoneamento urbano municipal para estruturação de sua base territorial para os censos, mas qualifica áreas urbanas e rurais mediante a adoção de parâmetros “administrativos (identificação de cidades e vilas), morfológicos (identificação da dispersão e aglomeração de edificações), e funcionais (presença de comércio, serviços e atividades agropecuárias)” (DAMASCO, 2018, p.1).

Do ponto de vista fotointerpretativo, Jensen (2011, p.445) reflete sobre a heterogeneidade da paisagem urbana através da constatação de diferentes substratos presentes em feições urbanas, como o concreto, o asfalto, metais, plástico, cerâmica, madeira, vidro, água, vegetação, solo, etc., onde cada uma terá uma resposta espectral própria. Além disso, deve-se ressaltar que a manifestação desses materiais não se dá em grandes porções extensas como ocorre nas áreas

rurais, mas em pequenas concentrações, de modo que há uma alta variabilidade espectral em uma breve extensão do espaço, influenciando no grau de complexidade que envolve a análise dos espaços urbanos a partir do sensoriamento remoto.

Contudo, o estudo e monitoramento de áreas urbanizadas ou em expansão, bem como a análise específica de alguma de suas feições, como será abordado no presente trabalho, interessa tanto à órgãos públicos como privados, tanto por motivos estritamente econômicos, como a implantação de um empreendimento, ou atualização da planta de valores do município, quanto para servir de base para gestão local, na atualização do cadastro territorial, no desenvolvimento de políticas públicas, dentro outros.

A aplicação do sensoriamento remoto no planejamento urbano foi, por um tempo, impossibilitada ou limitada, principalmente, devido à baixa resolução espectral e espacial dos produtos gerados. Porém, com o aprimoramento tecnológico das câmeras e sensores, atualmente, tem-se imagens multiespectrais, e com resolução espacial menor do que 1 (um) metro, que possibilita a detecção de detalhes no terreno. No que diz respeito à classificação de imagens de áreas urbanas, Hamburger (1993 *apud* MENESES *et al.*, 2012, p.240) expressa que a resolução espacial é determinante para a simplificação e qualidade dos resultados.

Apesar das possibilidades que as imagens de alta resolução proporcionaram, utilizá-las para discriminar alvos em zona urbana por processos de classificação não é trivial além de trazerem à tona detalhes indesejáveis, dependendo do se quer analisar, como comenta Meneses *et al.* (2012, p.243) e Silva (2020, p.26), de modo que o segundo sugere que tal processo seja realizado a partir de camadas auxiliares, sendo uma delas os índices de vegetação GRVI, GLI, RGBVI e VARI, obtidos por relações aritméticas entre as bandas do visível (Red, Green e Blue), utilizados para mapear a cobertura vegetal urbana presente.

2.2 Elementos de interpretação visual de imagens com aplicação na geração de produtos cartográficos de zonas urbanas

Conforme consta nos manuais de fotogrametria desenvolvidos por McGlone e Philipson (*apud* JENSEN, 2011, p.129), a fotointerpretação pode ser definida como

uma análise minuciosa de imagens com o propósito de discriminar as feições existentes e avaliar o significado delas. Contudo, em consonância com as ideias expressadas por Anderson (1982, p.2), o conceito de fotointerpretação é mais amplo. A partir disso, o presente trabalho admite em acrescentar que a fotointerpretação consiste em um conjunto de técnicas para analisar imagens e distinguir corretamente as feições presentes, possibilitando o conhecimento do ambiente no âmbito geométrico analítico, social, cultural, paisagístico, ambiental, agrícola, etc. Logo, como a cartografia se preocupa em gerar modelos de representação terrestre acurados, a fotointerpretação é uma ferramenta indispensável para os profissionais dessa área, que fazem uso dos produtos oriundos da fotogrametria e do sensoriamento remoto para obter dados geográficos de locais e regiões.

Segundo Rosa (2009, p.165) e Jensen (2011, p.132), a obtenção de dados a partir de imagens pode ocorrer mediante o uso de técnicas de processamento de imagens ou pelo uso de princípios, elementos básicos de interpretação visual. Segundo Teng (1997 *apud* ARAUJO, 2005, p.35), tais elementos constituem-se em 10, a saber, tamanho, forma, sombra, tom ou cor, textura, padrão, altura, local, associação e tempo. Em consonância, Anderson (1982, p.41) cita que tais elementos consistem em tonalidade, forma, padrão, densidade, declividade, textura, tamanho, sombra, posição e adjacências. Jensen (2011, p.133) defende 15 elementos básicos, a saber, localização, tom/cor, tamanho, forma, textura, padrão, sombra, altura e profundidade, volume, declividade, aspecto, sítio, situação e associação. Com o intuito de sintetizar a abordagem desses elementos, eles serão comentados a partir da classificação adotada por Teng.

A cor ou tonalidade é resultado da intensidade e frequência da radiação eletromagnética (luz) refletida ou emitida por diferentes corpos, e da capacidade que o ser humano tem de assimilar uma estreita faixa de ondas eletromagnéticas, e ser sensível a diferenças de nível de cinza. Logo, a percepção de cor é o principal elemento de reconhecimento dos alvos, haja vista que diferentes feições da paisagem apresentarão matizes de cores diferentes em intensidades diferentes, possibilitando uma discriminação primária dos objetos existentes na imagem analisada. A diferenciação de telhados em relação à matéria prima em uma imagem colorida pode, por exemplo, ser realizada através da percepção da diferente coloração expressada por cada tipo de telhado.

Quanto à geometria dos objetos, enquadram-se os elementos forma, referente à estrutura e disposição espacial dos objetos no plano, tamanho, referente à extensão da feição, sombra, altura e profundidade, volume, declividade, que depende da estereoscopia e aspecto. Uma aplicação desses elementos pode ser exemplificada na diferenciação da tipologia das edificações, onde as residências populares possuem uma forma poligonal regular de tamanho reduzido, enquanto que grandes centros comerciais apresentam tamanhos maiores e formas mais irregulares, e os edifícios projetam uma sombra maior no plano.

Os elementos que estão relacionados ao arranjo espacial dos alvos são textura, que consiste no aspecto granular apresentado pelos objetos como a textura grosseira apresentada pela vegetação em contraste com o aspecto liso visualizado em área concretadas, o padrão, que refere-se à forma de agrupamento, ou organização de uma mesma feição que se repete como os diferentes padrões apresentados por diferentes assentamentos humanos, e densidade, que consiste na quantidade ou intensidade do agrupamento de um objeto.

Já os demais elementos abordados, enquadram-se em características que estão relacionada com a análise do contexto geográfico dos alvos como local ou posição, associação ou adjacência, que se refere à identificação de uma feição a partir da discriminação de outras a ela associada, o tempo, o sítio, referente à ação de agregar à análise, informações socioeconômicas, e situação, que consiste na observação da organização e orientação expressada pelos alvos. Uma aplicação desses elementos ocorre na distinção visual de zonas específicas como uma zona residencial, ou industrial, etc.

Diante do que foi exposto nas Seções 2.1 e 2.2, no que diz respeito à complexidade que envolve a análise da paisagem urbana e do processamento de imagens de alta resolução espacial, os dados e produtos extraídos a partir desse processamento, principalmente nos executados de modo automático, podem ter sua acurácia temática avaliada, num primeiro momento, mediante o uso das técnicas de fotointerpretação, a partir dos elementos básicos descritos nesta seção, haja vista que, conforme será abordado nas Seções 5.1 e 5.2 referentes aos resultados obtidos, no processo de discriminação de feições em zona urbana por sensoriamento remoto deve-se prever que haja confusão entre classes, culminando em erros de omissão e erros de comissão.

2.3 Áreas verdes urbanas (AVU) e áreas livres

Segundo o Código Florestal Brasileiro, Lei nº 12.651/2012, artigo 3º, inciso XX, entende-se por áreas verdes urbanas os:

Espaços, públicos ou privados, com predomínio de vegetação, preferencialmente nativa, natural ou recuperada, previstos no Plano Diretor, nas Leis de Zoneamento Urbano e Uso do Solo do Município, indisponíveis para construção de moradias, destinados aos propósitos de recreação, lazer, melhoria da qualidade ambiental urbana, proteção dos recursos hídricos, manutenção ou melhoria paisagística, proteção de bens e manifestações culturais.

Fundamentando-se no que a legislação brasileira atual entende por áreas verdes urbanas, podemos sinteticamente descrevê-las ou abordá-las sob os aspectos paisagístico, normativo e funcional. Paisagístico, pois podem ser visualmente assimiladas como áreas urbanas cobertas por vegetação. Normativo, pois não corresponde a qualquer área vegetada, mas àquelas previstas e geridas pela legislação municipal local. E funcional porque elas possuem finalidades específicas. Logo, áreas urbanas vegetadas que não se enquadram nessa classificação podem encontrar-se definidas, segundo a legislação atual, como espaços livres, ou como áreas verdes em potencial (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2021, p.19).

A existência dos espaços verdes é prevista em projetos de loteamento, conforme a Lei Nº 6.766/1979, que dispõe sobre o Parcelamento do Solo Urbano, e a delimitação dessas áreas deve atender às diretrizes estabelecidas pelo município, que por sua vez, passará a ter o domínio delas. Deve-se ressaltar que tais espaços podem estar ou não cobertos por vegetação, mas são áreas não edificadas, porém não podem ser enquadradas como potenciais áreas verdes. Estas, por sua vez, assim como as áreas verdes, estão bem definidas no artigo 7º da Portaria nº504/2020 como:

Espaço público não edificado e não enquadrado como espaço livre ou área livre pela Lei nº 6.766/1979, que possa ser convertido, nos termos dos marcos normativos vigentes e das condições locais, em área verde urbana capaz de fornecer serviços ecossistêmicos.

Em Setembro de 2020, o Ministério do Meio Ambiente instituiu o Programa Cidades+Verdes, a partir da Portaria nº 504/2020, que por sua vez também instituiu o Cadastro Ambiental Urbano (CAU), de caráter declaratório. O programa federal tem por objetivo promover o crescimento e a melhoria das áreas verdes urbanas do

país, corroborando na melhoria da qualidade de vida nos municípios, marcados pelo histórico de ocupação urbana desordenada. Segundo dados do Ministério do Meio Ambiente, as cidades brasileiras possuem um déficit desses espaços, tanto no aspecto qualitativo como no aspecto quantitativo.

Quanto ao déficit no aspecto qualitativo, o Ministério do Meio Ambiente ressalta a má gestão das áreas verdes urbanas, expressada pela falta de manutenção e conservação desses espaços que, conforme destacado em CARMO, REBOLLAR e LOCH (2006), tornam-se em locais propícios à atividades ilícitas, contribuindo para o aumento da insegurança em áreas urbanas, além de comprometer a harmonia paisagística da cidade e a geração de lucro por parte do setor turístico.

No que diz respeito ao déficit no aspecto quantitativo, o Ministério do Meio Ambiente (2021) conclui que o número reduzido de áreas urbanas vegetadas é um dos fatores que corroboram para a diminuição da qualidade de vida da população urbana, e conseqüentemente, tem a tendência de afetar perspectivas futuras de desenvolvimento da cidade, haja vista que o ambiente caminha para condições inóspitas, pois conforme é descrito em MMA (2021) e LOBODA, *et al.* (2005), as áreas verdes estão relacionadas a melhoria da qualidade do ar, a atenuação dos impactos climáticos, à segurança hídrica e a redução de doenças de natureza física e psicológica.

Os benefícios promovidos pela presença das áreas verdes em zonas urbanas são conseqüências dos chamados serviços ecossistêmicos, que é definido, segundo a legislação brasileira, pela Lei nº 14.119/2021, no inciso II do artigo 2º como benefícios relevantes para a sociedade gerados pelos ecossistemas, em termos de manutenção, recuperação ou melhoria das condições ambientais nas modalidades de provisão, suporte, regulamentação e cultural. E a partir desse parâmetro, as áreas verdes são classificadas conforme o Quadro 1. Logo, no processo de mapeamento e detecção de feições vegetais presentes em zonas urbanas e periurbanas, deve-se considerar que a camada vegetal extraída constitui-se numa macroclasse que pode ser subdividida em 6 classes, de modo que um determinado trecho de vegetação urbana pode ser uma AVU sociocultural, socioambiental, econômica ou ecológica, possuindo uma importância social, ecológica e econômica. Mas esse trecho também pode ser uma AVU em potencial, de modo que deve ser enquadrado no CAU. E por fim, esse trecho pode ser apenas uma vegetação

procedente de um espaço livre coberto por vegetação, que não tem importância nem social, nem econômica, e, com exceção da importância ecológica, haja vista ser uma estrutura vegetal, pode ser um fator problemático para a área urbana a qual pertence, de modo que seu monitoramento não deve ser desconsiderado pela governança municipal.

Quadro 1 – Classificação das Áreas Verdes Urbanas (AVU) adotada pelo Ministério do Meio Ambiente a partir dos serviços ecossistêmicos prestados à zona urbana

CATEGORIA DE ÁREA VERDE URBANA (AVU)	TIPOLOGIA DE AVU	PRINCIPAIS SERVIÇOS ECOSISTÊMICOS PARA O AMBIENTE URBANO
Sociocultural 	Praça	Serviços Culturais
	Canteiro	
	Jardim Zoológico	
	Área Verde Institucional	
Socioambiental 	Horto Florestal	Serviços Culturais Serviços de Regulação
	Jardim Botânico	
Econômica 	Agricultura Urbana	Serviços de Provisão Serviços de Suporte
Ecológica 	Parque	Serviços de Regulação Serviços Culturais Serviços de Suporte
	Bosque	
	Áreas Protegidas Urbanas	

Fonte: MMA (2021)

A partir disso, mediante os detalhes que motivaram o programa, fica claro que gerir bem as áreas verdes urbanas, bem como os espaços livres com cobertura vegetal, implica em uma boa gestão urbana, haja vista a necessidade de ordenação do uso e ocupação da paisagem urbana, de assegurar a obediência ao zoneamento estabelecido pelo Plano Diretor monitorando áreas periurbanas, da aplicação de políticas públicas inteligentes, de promover o turismo, de garantir a segurança, de

angariar financiamentos públicos e privados, além das necessidades sociais, biológicas, paisagísticas e ambientais apresentadas.

2.4 Quantização da extensão espacial de atributos expressados em dados matriciais

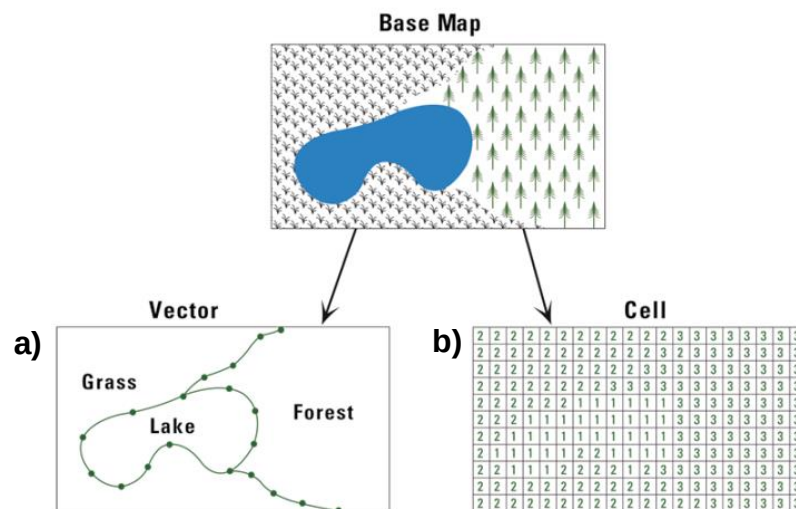
No processo de análise de uma estrutura que possui uma abrangência espacial considerável, a área é uma métrica básica e indispensável, sendo um dos parâmetros básicos de avaliação de uma feição ou classe superficial. Para tal, foram desenvolvidos ao longo dos anos copiosos métodos de determinação de áreas. Logo, a extensão espacial de porções terrestres pode ser mensurada mediante levantamentos de campo, com medições *in loco*, através de medições em mapas e ortofotos em meio analógico e digital, ou mediante o uso de softwares. Dentre os métodos mais utilizados, destaca-se o método das coordenadas ou de Gauss (LANG e BLASCHKE, 2009. p.256; GUILANI e WOLF, 2013).

Para feições terrestres com estrutura constituída de formas geométricas elementares e discretas, a determinação da área é simples, contudo, para estruturas irregulares e complexas, métodos que necessitam de trabalho de campo ou análise manual de mapas são ineficientes pelo alto detalhamento da superfície, principalmente em trabalhos com escalas de alta resolução espacial, de modo que o uso de softwares especializados em geoprocessamento é indispensável, tais como programas de CAD e GIS.

No que diz respeito à representação computacional de dados geográficos, sabe-se que a estrutura do dado espacial pode ser definida como vetorial ou matricial (INPE, 2006, p.19). Sabendo que o modelo de dados vetoriais está baseado na representação a partir das estruturas geométricas básicas, a saber, ponto, linha e polígono, mediante conjuntos de pontos coordenados (Figura 1a), a obtenção da área em softwares baseia-se em modelos matemáticos que utilizam esses parâmetros geométricos (MATOS, 2008. p.29; LANG e BLASCHKE, 2009. p.52). No software Qgis, por exemplo, tem-se a opção de obter a magnitude da área de polígonos tanto pelo método de Gauss como pelo método geodésico, em relação ao geóide do sistema de referência utilizado.

Quanto aos dados matriciais (arquivos *raster*), a sua estrutura corresponde a uma malha (Figura 1b) que pode ser expressada por uma matriz A (n, m) constituída de n linha e m colunas, cujos elementos constituintes correspondem às unidades celulares na malha (pixels), que possuem um valor z , resultante da resposta espectral referente à porção terrestre compreendida no limite da dimensão do pixel, haja vista que, conforme citado por Matos (2008), nos modelos matriciais, a partição do espaço antecede a identificação dos atributos presentes (FITZ, 2008. p.54; MATOS, 2008. p.39; LANG e BLASCHKE, 2009. p.54).

Figura 1 – Exemplificação de representação computacional de dados terrestres pelo modelo vetorial e pelo modelo matricial



Fonte: Turner e Gardner (2015)

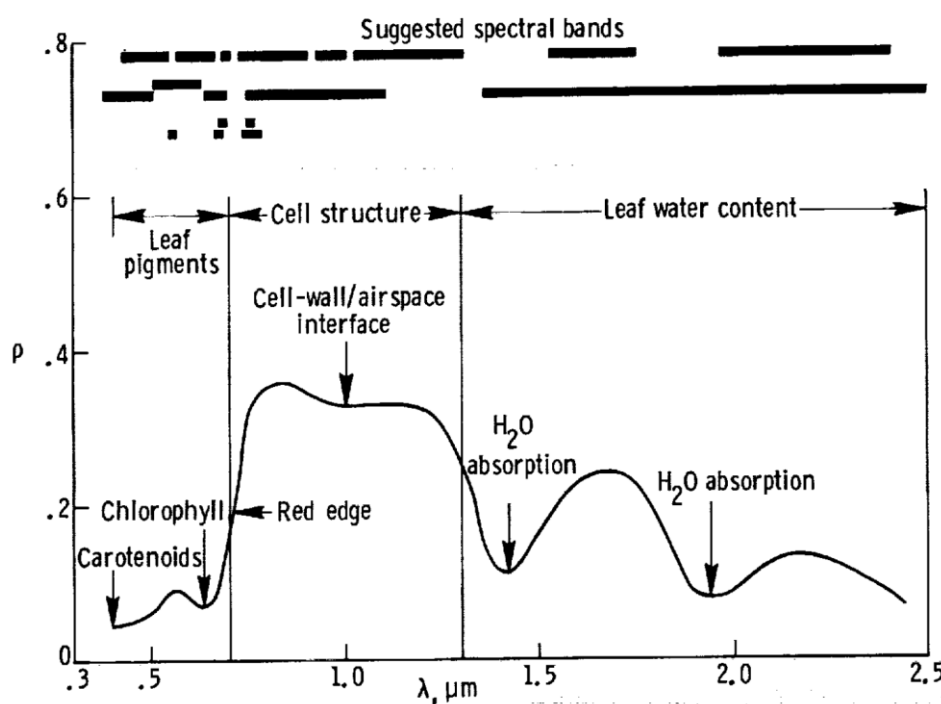
A partir disso, diferentemente do que ocorre nos arquivos vetoriais, a mensura da área total de uma feição descrita por uma camada *raster* tem como base a quantidade total de pixels que, por discriminação, descrevem ou representam o atributo em questão, e a área unitária da célula matricial, mediante o conhecimento de suas dimensões ou da resolução espacial da imagem digital utilizada (LANG e BLASCHKE, 2009. p.256). Tal metodologia baseia-se no mesmo princípio utilizado no método de cálculo de área por contagem das quadras, aplicado na obtenção da métrica a partir de mapas, e outros produtos cartográficos analógicos (GUILANI e WOLF, 2013. p.272), além disso, à medida que sua acurácia é afetada pelas discrepâncias ocorridas nas regiões de borda, devido à estrutura fixa dos pixels, ela

é inversamente proporcional à dimensão dele, ou seja, quanto menor for o pixel da camada *raster* utilizada, maior a acurácia do método.

2.5 Comportamento espectral da vegetação na faixa do visível

A região espectral do visível corresponde à faixa dos comprimentos de onda emitidos com maior intensidade pelo Sol. Tal região tem sua importância, principalmente, porque compreende a faixa do espectro eletromagnético que pode ser visualmente percebida pelo homem. Logo, as imagens pancromáticas coloridas ou composições RGB das bandas *red*, *green* e *blue*, respectivamente, expressam características das feições terrestres que a capacidade visual humana também percebe. Contudo, além de problemas que podem vir a apresentar, relacionados ao espalhamento da radiação ocasionado por gases atmosféricos, nesse trecho, algumas feições terrestres são melhores expressadas, ou discriminadas, em outras bandas, como a vegetação (Quadro 2), que, sobre condições normais do meio, reflete melhor a banda do infravermelho próximo (FITZ, 2008. p.123; PONZONI e SHIMABUKURO, 2009. p.19). Apesar disso, em situações onde há a necessidade de se trabalhar com imagens de baixa resolução espectral, ou mesmo pela necessidade de um parâmetro comparativo, tem-se a alternativa de se trabalhar apenas com dados na faixa do visível.

Quadro 2 – Típica curva de reflectância de vegetação verde fotossinteticamente ativa



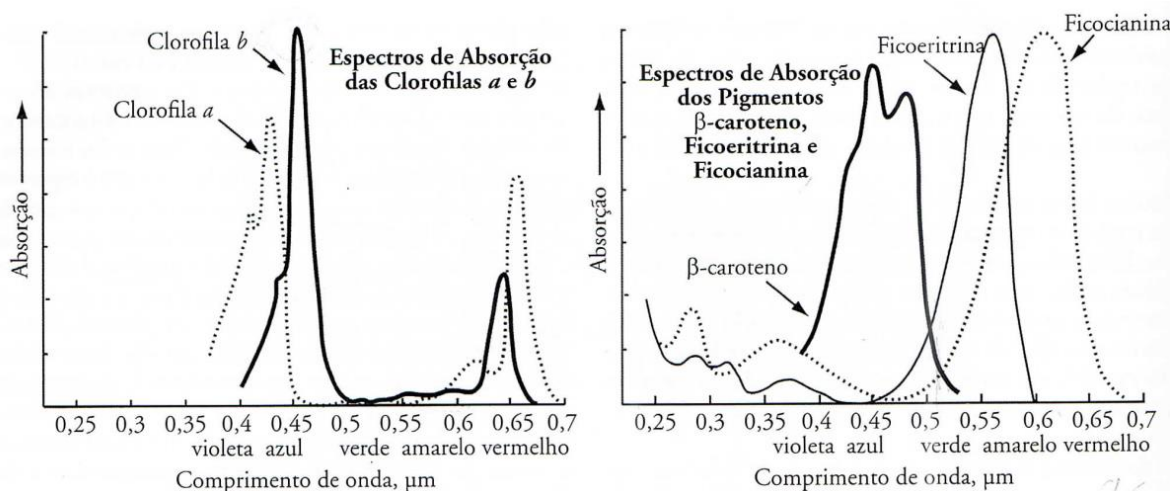
Fonte: BOWKER et al. (1985)

A interação da vegetação com a radiação eletromagnética ocorre através das folhas, de modo que o comportamento espectral das espécies está diretamente relacionado à morfologia e estrutura interna das folhas, bem como sua composição química (PONZONI e SHIMABUKIRO, 2009.p.79 e IBGE, 2001.p.35). Estudos mostram que os fatores que mais interferem na resposta espectral foliar são os pigmentos, o espalhamento interno, referente à estrutura celular, e a umidade da folha (IBGE, 2001.p.35; JENSEN, 2011. p.358). Contudo, no que diz respeito ao comportamento espectral da vegetação na faixa do visível, os pigmentos foliares, que são moléculas que retêm a radiação eletromagnética para a fotossíntese, são os fatores mais predominantes (Quadro 2).

O pigmento foliar mais abundante nas espécies vegetais são as clorofilas, que absorvem mais radiação nas faixas do azul e do vermelho, conforme representado no Quadro 3a, seguido pelo Quadro 3b (ambos são espectros de absorção de pigmentos puros em solução), onde são descritos outros espectros de absorção de outros pigmentos, mas percebe-se que a faixa referente a banda verde é a que menos é absorvida, o que permite que nas composições RGB das *red*, *green* e *blue*, respectivamente, a vegetação sadia, e sob condições normais no momento de

aquisição do dado, expresse coloração verde, assim como é assimilado pela visão humana numa análise *in loco*.

Quadro 3 – Espectro de absorção de pigmentos foliares



Quadro 3a à esquerda e Quadro 3b à direita.

Fonte: Jensen (2011)

2.6 Índices de vegetação

Buscando classificar o solo urbano, Silva (2020) recorre, dentre outras técnicas, ao uso de índices de vegetação que utilizam as faixas do visível (*Red, Green, Blue*) no intuito de discriminar a vegetação intraurbana, dos quais o presente trabalho se limita a abordar apenas 3 (três) dos 7 (sete) índices trabalhados, a saber, o GRVI (*Green-Red Vegetation Index*), o GLI (*Green Leaf Index*) e o RGBVI (*Red Green Blue Vegetation Index*).

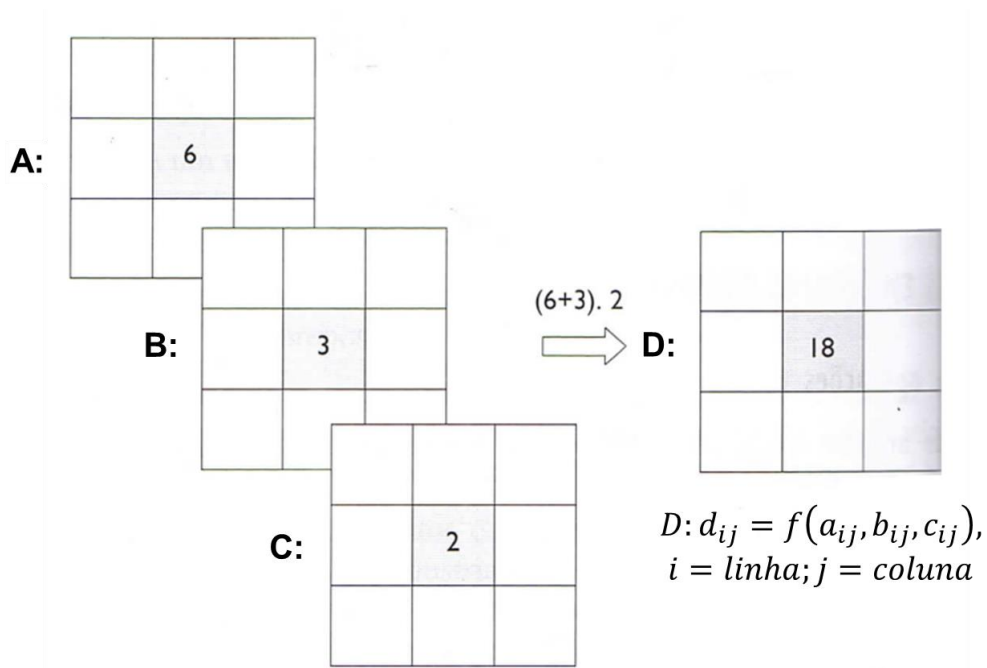
Os Índices de vegetação são medidas radiométricas adimensionais que funcionam como indicadores de parâmetros biofísicos de feições vegetais que geralmente possuem a propriedade de realçar variações de densidade da cobertura vegetal, característica importantíssima para detecção e discriminação dessas feições na superfície terrestre, além de minimizar efeitos negativos referentes à iluminação e à topografia do local (JENSEN, 2011, p.384 e MENESES et al., 2012, p.157). Tais índices são obtidos mediante a relação aritmética entre mais de uma banda (Figura 2), e esta propriedade é possibilitada devido à estrutura dos dados matriciais (imagens *raster*).

Tais operações referem-se à funções de análise espacial local de sobreposição, que são funções obtidas por combinação dos elementos, por

aritmética, das imagens digitais (das bandas) que ocupam a mesma posição matricial no *raster*, de modo que uma nova matriz (Figura 2) é gerada e seus elementos correspondem ao resultados das operações (MATOS, 2008).

A Figura 2 exemplifica essa propriedade, onde A , B e C são matrizes (imagens raster) e a_{ij} , b_{ij} , e c_{ij} são seus respectivos elementos, ocupam posições homólogas em suas matrizes, que se combinam, mediante uma função matemática f , para gerar uma nova matriz D com elementos d_{ij} resultantes da operação entre os elementos das matrizes envolvidas.

Figura 2 – Exemplificação do princípio da aritmética de bandas



Fonte: Mod. De Matos (2008)

2.6.1 GRVI (Green-Red Vegetation Index)

O índice GRVI é definido matematicamente por Tucker (1979) como a razão entre a diferença das bandas *Green* e *Red* e a soma delas, comparando-o com outras combinações para aplicação no monitoramento da biomassa da vegetal. Em FALKOWSKI (2005) o mesmo índice é aplicado visando o monitoramento da biomassa vegetal para prevenção de incêndios, mas em MOTOHKA *et al.* (2010) aplica-se o índice como um indicador fenológicos, utilizando a reflectância (ρ). A

partir disso, o presente trabalho adotará, bem como Silva (2020), o uso das bandas e coeficientes para regulação numérica, conforme expressado na equação (1).

$$GRVI = a \left(\frac{(Green - Red)}{(Green + Red)} \right) + b \quad (1)$$

Onde,

Green = Número digital da banda do verde

Red = Número digital da banda do vermelho

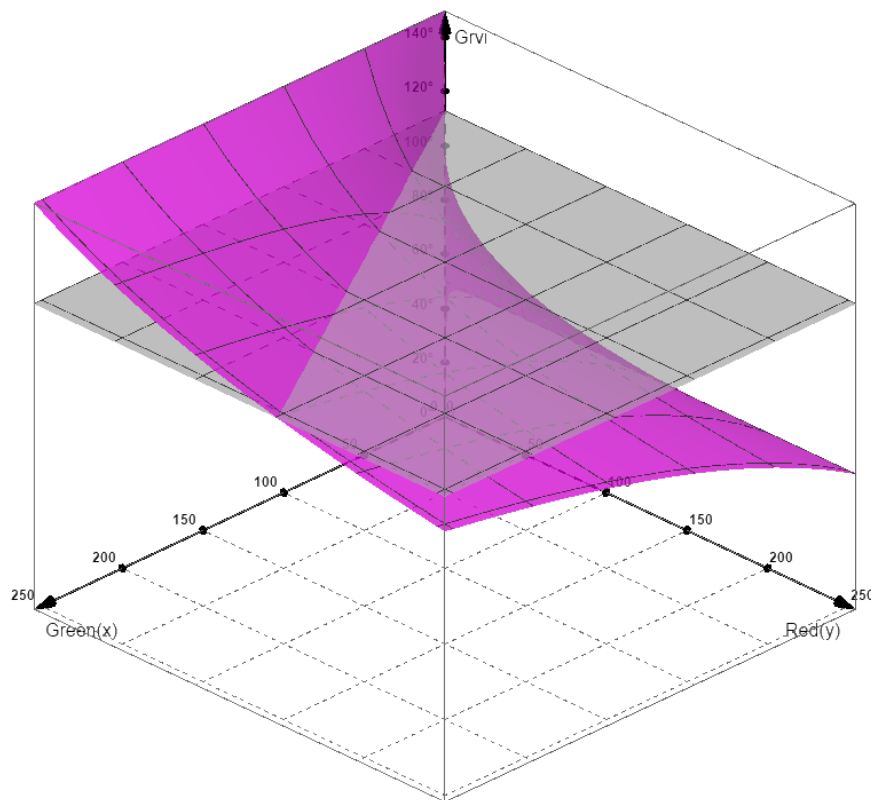
a = Coeficiente de rotação

b = Coeficiente de translação

Uma análise gráfica pode ser feita para entender a relação entre o valor correspondente às bandas e o resultado do índice, observando o índice com um olhar mais matemático. Considerando o GRVI como uma função $f(x,y)$, e sendo x e y variáveis correspondentes, respectivamente, às bandas *Green* e *Red*, ambas pertencentes ao intervalo $[0, 255]$, podemos reescrever a equação (1) na equação (2), que descreve a superfície expressa no Gráfico 2, já com os coeficientes a e b , determinados conforme o uso sugerido em TENÓRIO e CANDEIAS (2022a), no intuito de proporcionar uma visualização que atenda aos objetivos da análise (transformação isométrica).

$$f(x,y) = 50 \left(\frac{(x - y)}{(x + y)} \right) + 100 \quad (2)$$

Gráfico 2 – Representação gráfica do comportamento do GRVI em função do número digital das bandas *Red* e *Green*



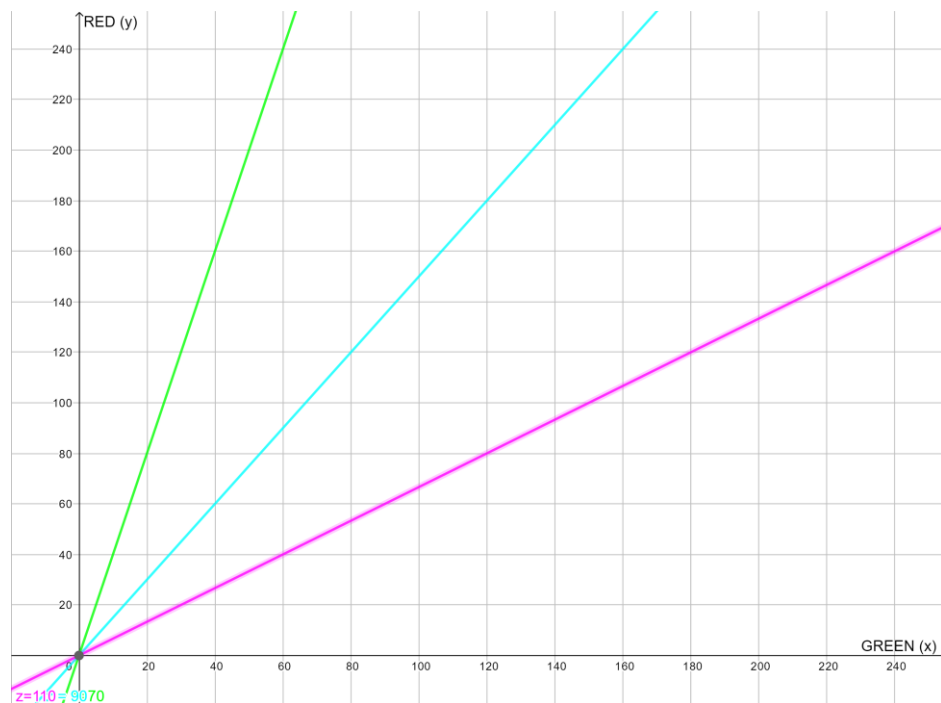
Fonte: Autor (2023)

A partir da análise do Gráfico 2 gerado, pode-se fazer implicações referentes ao comportamento do índice GRVI em relação aos valores das bandas *Green* e *Red* de modo facilitado e com maior praticidade do que poderia se ter analisando apenas a expressão numérica do índice. Logo, atentando-se para a desenvoltura da superfície, é possível inferir, nesta porção do gráfico, conforme os intervalos de interesse trabalhados, que os valores de GRVI tendem a ser mais altos quando os valores da banda *Green* são consideravelmente mais altos que os valores da banda *Red*, e que à medida que a diferença entre elas diminui o índice diminui também, e decai mais ainda à medida que os valores da banda *Green* diminuem, e os da banda *Red* continuam altos.

As considerações anteriores podem ser mais explícitas apelando-se para a representação gráfica das curvas de nível do GRVI na porção do plano definida conforme os intervalos de interesse trabalhados para cada variável, de modo que é

determinado para o índice valores fixos, tais como 70, 90 e 110, e projetada as curvas, ou, no presente caso, as retas, no plano, conforme o Gráfico 3.

Gráfico 3 – Curvas de Nível do GRVI conforme a equação 2 para os valores fixos 70, 90 e 110



Fonte: Autor (2023)

Logo, em consonância com a primeira análise, conclui-se que, para esta porção do espaço, conforme os intervalos de interesse trabalhados, o valor do GRVI aumenta com o aumento dos valores da banda Green e decaimento dos valores da banda Red, o que intuitivamente era de se esperar, haja vista ser um índice de vegetação, cuja finalidade é realçar as feições vegetais, levando-se em consideração que, na faixa do visível, as folhas refletem mais a banda do verde em relação ao azul e ao vermelho.

2.6.2 GLI (Green Leaf Index)

O índice GLI, conforme a equação (3), é definido em LOUHAICHI (2001), como a razão entre a diferença do dobro da banda *Green* e as bandas *Red*, *Blue* e a soma do dobro da banda *Green* e das bandas *Red* e *Blue*, onde o autor propõe a aplicação do índice no monitoramento de plantações de trigo prejudicadas presença

de gansos. Em HUNT *et al.* (2013) encontramos uma aplicação do índice como indicador de clorofila, utilizando a reflectância (ρ) das bandas.

$$GLI = a \left(\frac{(2 \cdot Green - Red - Blue)}{(2 \cdot Green + Red + Blue)} \right) + b \quad (3)$$

Onde,

Green = Número digital da banda do verde

Red = Número digital da banda do vermelho

Blue = Número digital da banda do azul

a = Coeficiente de rotação

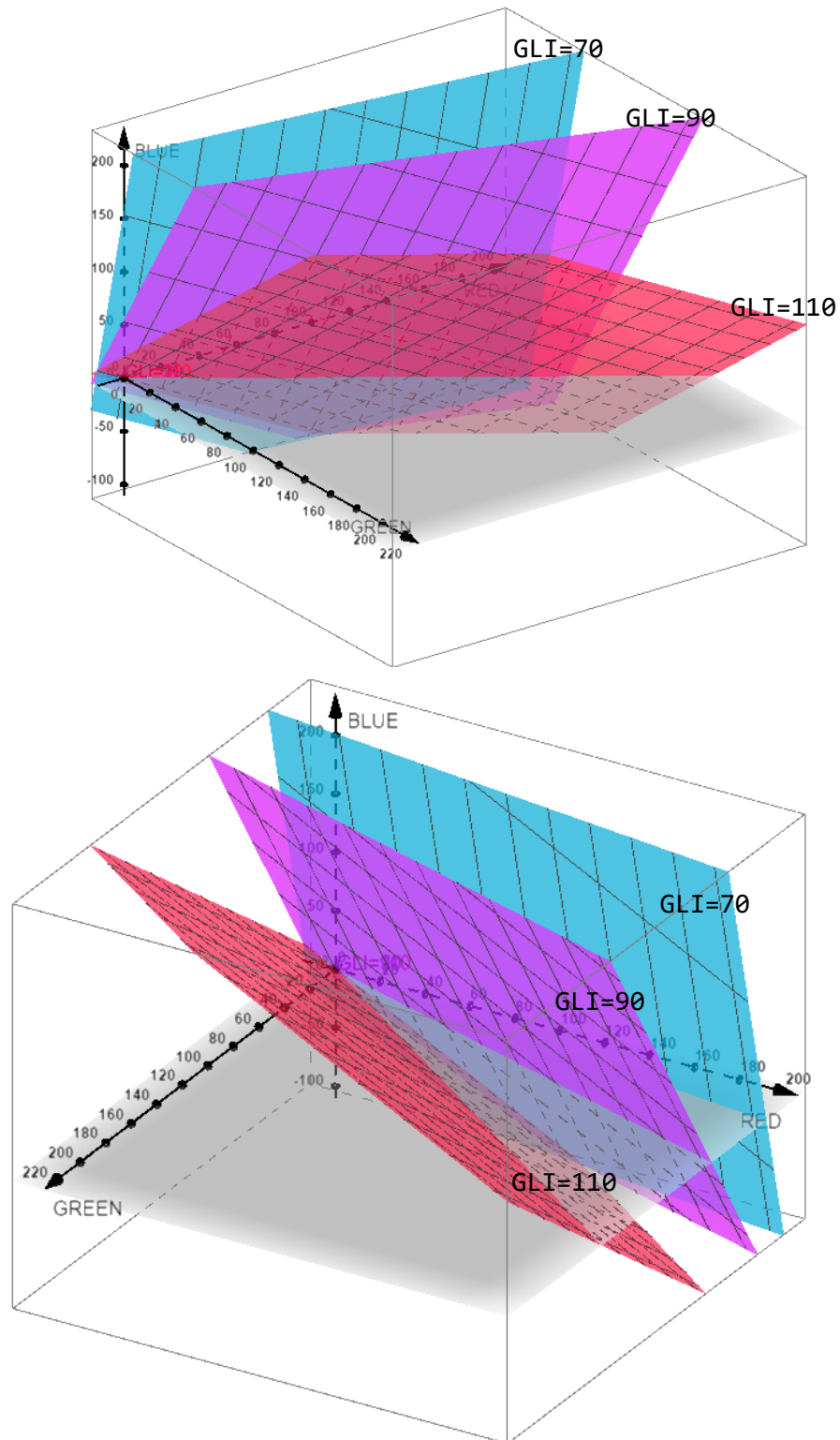
b = Coeficiente de translação

A mesma análise gráfica pode ser feita para o GLI, considerando o índice como uma função $g(x,y,z)$ dependente de, não duas, mas três variáveis a saber, as bandas *Green*, *Red* e *Blue*, associando a cada triplete de ordenadas (x, y, z), um valor g em $\mathbb{R}^4$, de modo que a expressão gráfica do índice é impossibilitada por não poder ser representada no espaço tridimensional, haja vista que se encontra, matematicamente, numa quarta dimensão. Contudo, o GLI pode ser analisado através de suas superfícies de nível, obtidas fixando-se valores fixos para o índice. Desse modo, a equação (3) é reescrita na equação (4), adotando como x a banda *Green*, como y a banda *Red* e como z a banda *Blue*, ambas pertencentes ao intervalo $[0, 255]$, de acordo uma resolução radiométrica de 8 bits.

$$g(x, y, z) = 50 \left(\frac{2x - y - z}{2x + y + z} \right) + 100 \quad (4)$$

Fixando valores para g , tais como 70, 90 e 110, obtém-se planos, como está representado no Gráfico 4. A partir disso, observa-se, para esta porção do espaço, conforme os intervalos de interesse trabalhados, que valores menores de GLI (no caso, menores que 70) implicam em valores insignificantes da banda *Green*, mas à medida que o índice aumenta, a contribuição dela torna-se mais significativa ante às das outras duas bandas.

Gráfico 4 – Curvas de Nível do GLI conforme a equação 4 para os valores fixos 70, 90 e 110



Fonte: Autor (2023)

2.6.3 RGBVI (Red Green Blue Vegetation Index)

O índice RGBVI é descrito matematicamente em BENDIG *et al.* (2015) pela razão entre a diferença do quadrado da reflectância da banda *Green* e o produto das reflectâncias das bandas *Blue* e *Red* e a soma do quadrado da reflectância da banda *Green* e o produto das reflectâncias das bandas *Blue* e *Red*, de modo semelhante à LUSSEM *et al.* (2018). Mas, assim como em SILVA (2020), utilizou-se a informação contida no número digital das bandas, conforme equação (5).

$$RGBVI = a \left(\frac{(Green^2 - (Blue.Red))}{(Green^2 + (Blue.Red))} \right) + b \quad (5)$$

Onde,

Green = Número digital da banda do verde

Red = Número digital da banda do vermelho

Blue = Número digital da banda do azul

a = Coeficiente de rotação

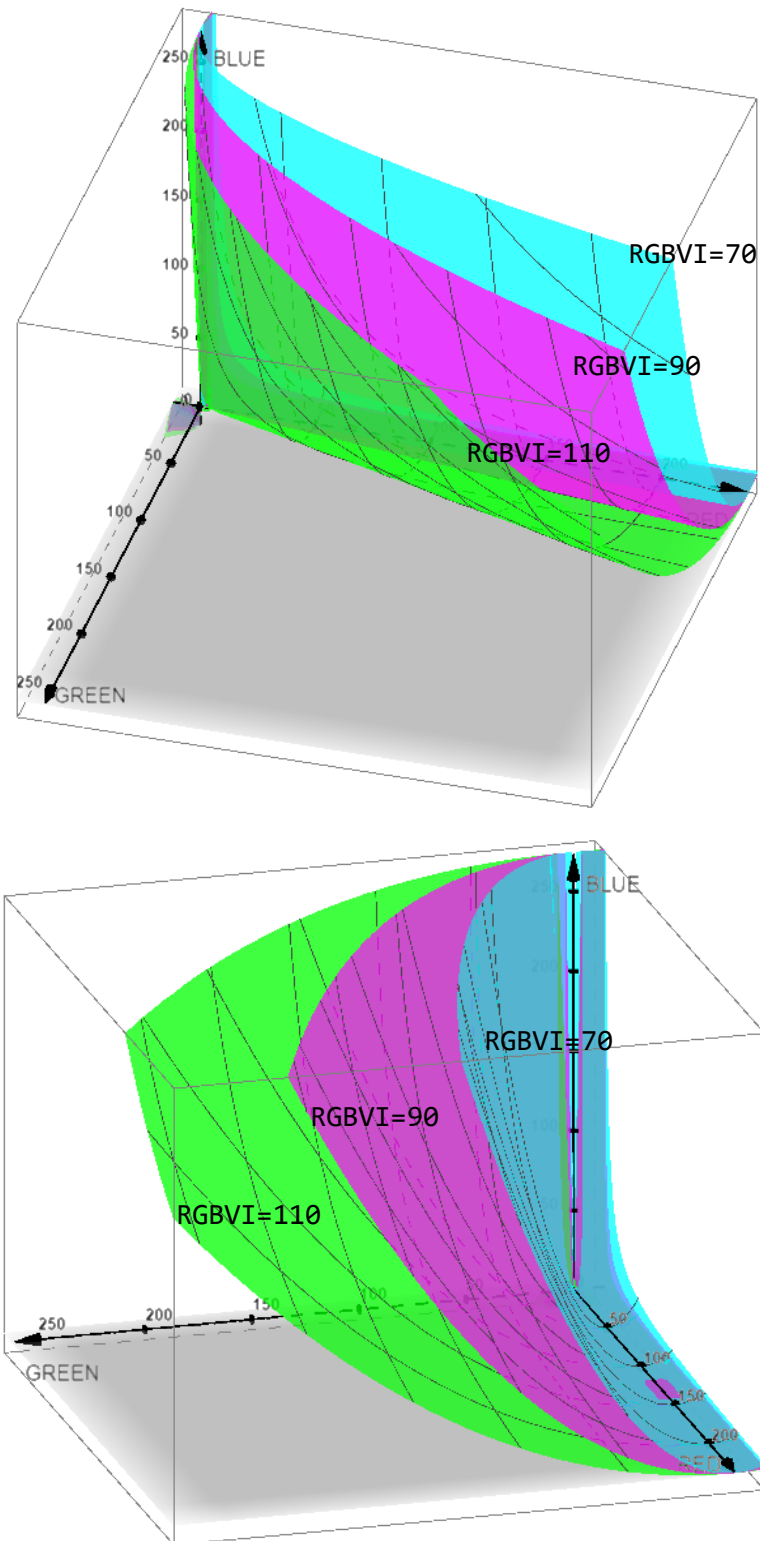
b = Coeficiente de translação

Equivalente à análise realizada para o GLI, admite-se que o índice RGBVI é uma função $h(x,y,z)$, sendo a variável x correspondente à banda *Green*, a variável y correspondente à banda *Red* e a variável z correspondente à banda *Blue*, ambas pertencentes ao intervalo $[0, 255]$, de acordo uma resolução radiométrica de 8 bits.

$$h(x, y, z) = 50 \left(\frac{x^2 - zy}{x^2 + zy} \right) + 100 \quad (6)$$

Logo, o Gráfico 5 expressa as superfícies de nível do RGBVI para os valores fixos de 70, 90 e 110, numa porção do espaço, conforme os intervalos de interesse trabalhados, a partir do qual pode-se concluir que valores menores do índice (no caso, menores que 70) corresponde à valores insignificantes da banda *Green*, mas à medida que o índice aumenta, a contribuição do verde torna-se cada vez mais significativa ante às das outras duas bandas.

Gráfico 5 – Curvas de Nível do RGBVI conforme a equação 6 para os valores fixos 70, 90 e 110



Fonte: Autor (2023)

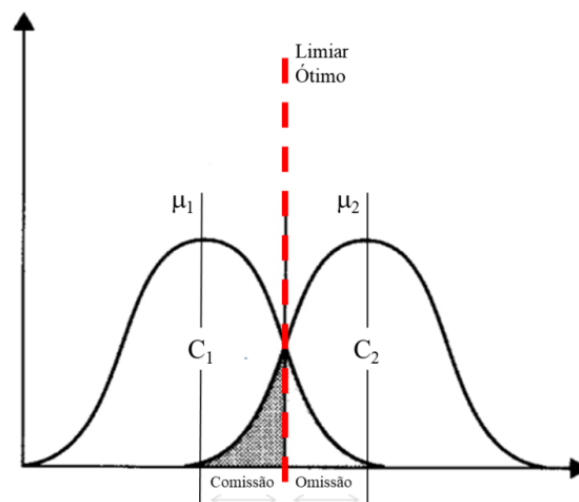
As conclusões obtidas das análises gráficas eram intuitivamente esperadas, haja vista se tratarem de índices de vegetação, cuja finalidade é realçar as feições vegetais, que na faixa do visível, refletem mais a banda do verde do que as bandas do azul e do vermelho.

2.7 Limiarização (binarização) semiautomática

Em processamento de imagens, um limiar é, em síntese, um limite numérico. Tal princípio é empregado em alguns métodos de classificação supervisionados e não supervisionados, e em filtragens direcionais conforme citado em Meneses *et al.* (2012), Crósta (2002) e Rosa (2009). Este conceito também é a base da técnica de limiarização, ou binarização, que é aplicada no processo de manipulação do histograma de imagens digitais. Tal técnica consiste em particionar, geralmente em duas classes, a imagem a partir da definição de um limiar, de modo que os pixels são segregados em dois níveis de cinza a partir do valor do número digital, em relação ao limiar (FILHO e NETO, 1999; IBGE, 2001, p.48). Este, por sua vez, pode ser determinado manualmente a partir da análise do histograma.

A partir disso, tendo em vista situações onde busca-se extrair, ou discriminar, apenas um atributo presente na imagem analisada, a técnica de linearização pode ser utilizada, em alternativa aos métodos convencionais supervisionados de classificação de imagens. Logo, na aplicabilidade da limiarização para este fim, deve-se levar em consideração que a discriminação da feição alvo será baseada no valor do pixel em relação ao limiar. Logo, sabendo-se que a definição de um limiar ótimo implicará em um produto cartográfico de acurácia temática que atenda aos objetivos do trabalho, com erros de comissão e omissão mínimos expressados pela Figura 3, a técnica pode ser refinada pela semiautomatização do processo, aplicando-se técnicas de estratificação de dados para obtenção de um limiar conciso, desprovido de subjetividade.

Figura 3 – Representação gráfica do limiar ótimo e erros de comissão e omissão



Ao discriminar a classe 1 (C_1), inevitavelmente ocorrerá comissão de pixels da Classe 2 (C_2) e esta enquadrará pixels omissos da Classe 1.

Fonte: (Modif. de DRURY, 1989).

A classificação de dados advém da necessidade de simplificar a informação expressada por um grande número de dados, facilitando o entendimento e a compreensão mediante agrupamentos em classes heterogêneas entre si, abrangendo conteúdos similarmente homogêneos. A cartografia temática se utiliza de copiosos métodos de estratificação baseados em princípios gráficos analíticos ou conceitos estatísticos para expressar dados quantitativos através de mapas claros e acurados (RAMOS *et al.*, 2016 e SLOCUM, 1999, p.67).

Dentre os métodos mais comuns destacam-se intervalos iguais (*equal intervals* ou *equal steps*), baseado em classes com um intervalo constante e quantidade de atributos variável, quartis (*equal frequency* ou *quantiles*), baseado em classes com a mesma quantidade de atributos, desvio padrão (*mean-standard deviation*), baseado em classes formadas a partir do desvio padrão em relação à média do conjunto de dados, e quebra natural de Jenks (*natural breaks*), baseado em classes formadas a partir do agrupamento natural de dados (*clusters*) e nos vazios (*gaps*) formados (DENT *et al.*, 2009 e SLOCUM, 1999). Apesar das peculiaridades descritas, deve-se considerar que ambos os métodos não consideram o contexto espacial do dado.

Tais métodos podem ser aplicados manualmente ou a partir do uso de *softwares* como o Qgis, que em sua versão 3.16.11 disponibiliza a aplicação de alguns métodos de classificação para arquivos de natureza vetorial e matricial, contudo, para dados *raster* há apenas três possibilidades disponíveis, a saber, a classificação manual, por intervalos iguais e por quartis. Sabendo, porém, que a proposta do presente trabalho destaca processos automatizados, o método de classificação manual não será abordado.

A estratificação por intervalos iguais e por quartis são semelhantes no que diz respeito à simplicidade de aplicação do método, e pelo fato de não considerarem a similaridade entre as observações no processo de classificação (RAMOS *et al.*, 2016, p.611 e SLOCUM, 1999). Apesar disso, dependendo do conjunto de dados, podem gerar resultados discrepantes.

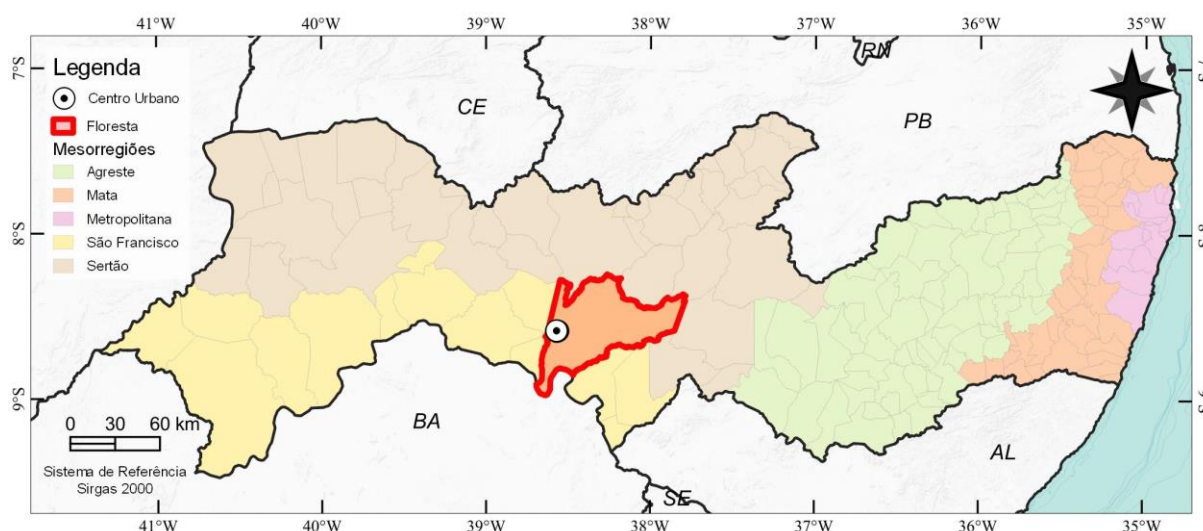
Na classificação por intervalos iguais a informações é facilmente expressada e interpretada permitindo que a avaliação da distribuição das observações seja feita em intervalos numéricos constantes, contudo, para conjuntos de dados que possuem descontinuidades, gera-se conjuntos vazios, classes que não têm representatividade, o que é incoerente com o número de estratos escolhidos, além disso, o aspecto visual da tematização gerada tende a ficar monopolizado por uma única cor predominante, fazendo com que o mapa gerado perca a sua finalidade (RAMOS *et al.*, 2016, p.617 e SLOCUM, 1999, p.67).

Já o método dos quartis, também tem a vantagem de ser empregado de modo prático e gerar resultados facilmente compreendidos, onde todas as classes possuem elementos representativos. Além disso, este método possui a peculiaridade de possibilitar ao usuário ter a compreensão proporcional das classes em relação ao total de observações. Contudo, haja vista que estratifica a informação conforme o número de dados, acaba por separar observações similares em classes diferentes e agregar observações discrepantes em uma mesma classe, remetendo à abordagem feita anteriormente sobre a ocorrência de erros de comissão e omissão nos processos de classificação. Deve-se ressaltar, porém, que tais desvantagens tornam-se consideravelmente comprometedoras em um conjunto de dados cuja distribuição de frequência é disforme e descontínua (RAMOS *et al.*, 2016, p.620 e SLOCUM, 1999, p.67).

3 ÁREA DE ESTUDO

A área abrangida pela ortoimagem analisada no presente trabalho compreende a porção leste do centro urbano do município de Floresta, no Sertão do estado de Pernambuco (APAC, 2013), cuja sede municipal está a 8°36'02"S de latitude e 38°34'05"W de longitude, a 316 m de altitude em relação ao nível do mar, segundo o portal das cidades do IBGE. A cidade está inserida na Mesorregião do São Francisco, conforme expressado no Mapa 1, e possui extensão territorial de 3.604,948 km² (2022), sendo o segundo maior município do estado. A população estimada em 2021 é de 33.488 habitantes, conforme dados do IBGE, possuindo uma densidade de 8,04 hab/km² (2010). A área urbanizada compreende a extensão de 4,56 km² (2019), correspondendo à apenas 0,13% da área total.

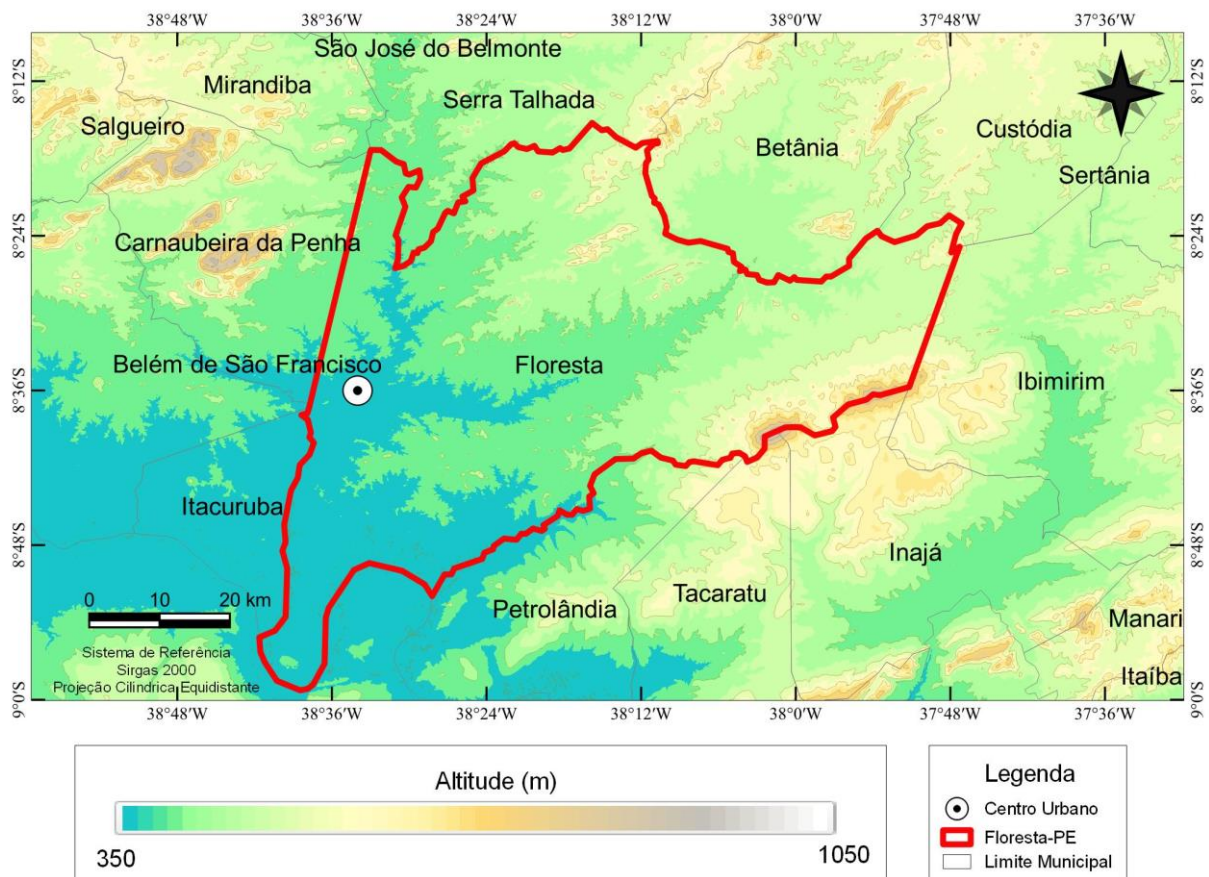
Mapa 1 – Município de Floresta-PE com centro urbano destacado



Fonte: Autor (2023).

O município possui um relevo suave, predominantemente plano, como pode-se verificar no Mapa 2, cujo dado altimétrico procede de modelo digital do terreno (MDT) oriundo do projeto Topodata, do INPE, gerado com base nos dados SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) disponibilizados pelo USGS (*United States Geological Survey*) na rede mundial de computadores (INPE, 2008), como resolução espacial de 30 metros.

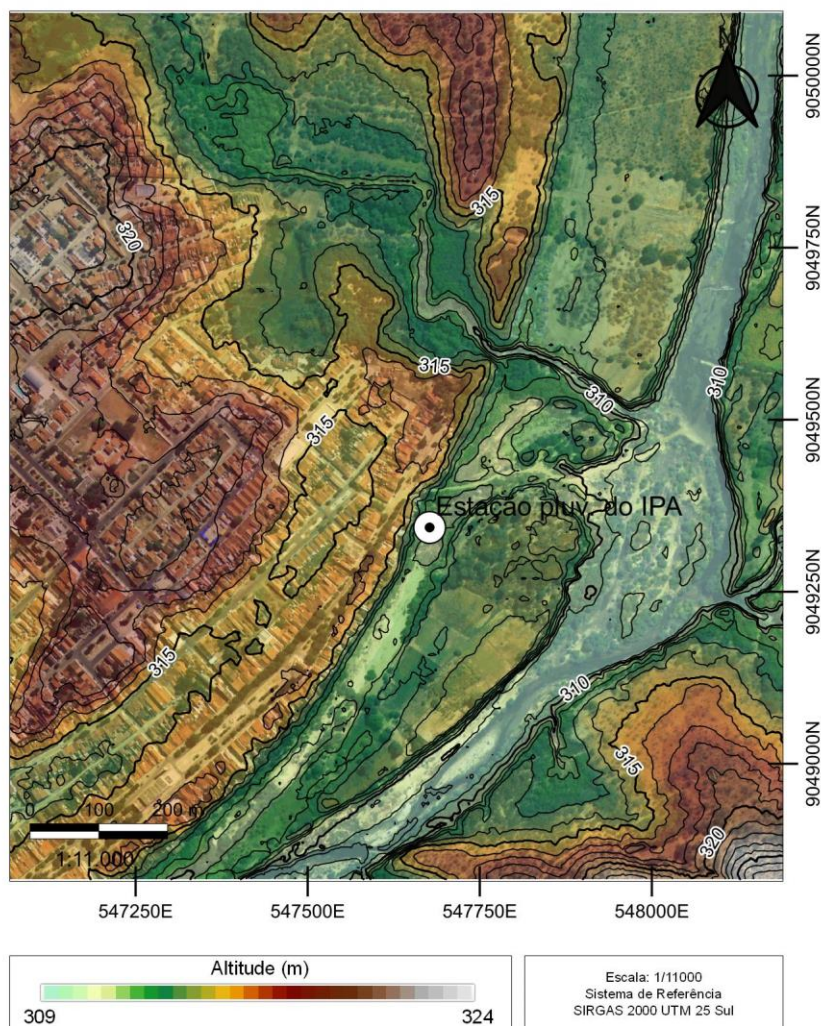
Mapa 2 – Topografia do município de Floresta-PE



Fonte: Autor (2023).

A área específica do presente estudo, localizada na porção leste do centro urbano de Floresta-PE, apresenta uma topografia suave, onde a zona urbana concentra-se em um planalto e o terreno vai declinando para leste em direção ao leito Rio Pajéu, conforme é observado no Mapa 3, cujo dado altimétrico procede do modelo digital de elevação (MDT) referente à ortoimagem SC-24-X-A-IV-2-NE-E-II oriundo do PE3D com resolução espacial de 0,5 metros.

Mapa 3 – Topografia da área de estudo sobreposta à ortoimagem SC-24-X-A-IV-2-NE-E-II do local



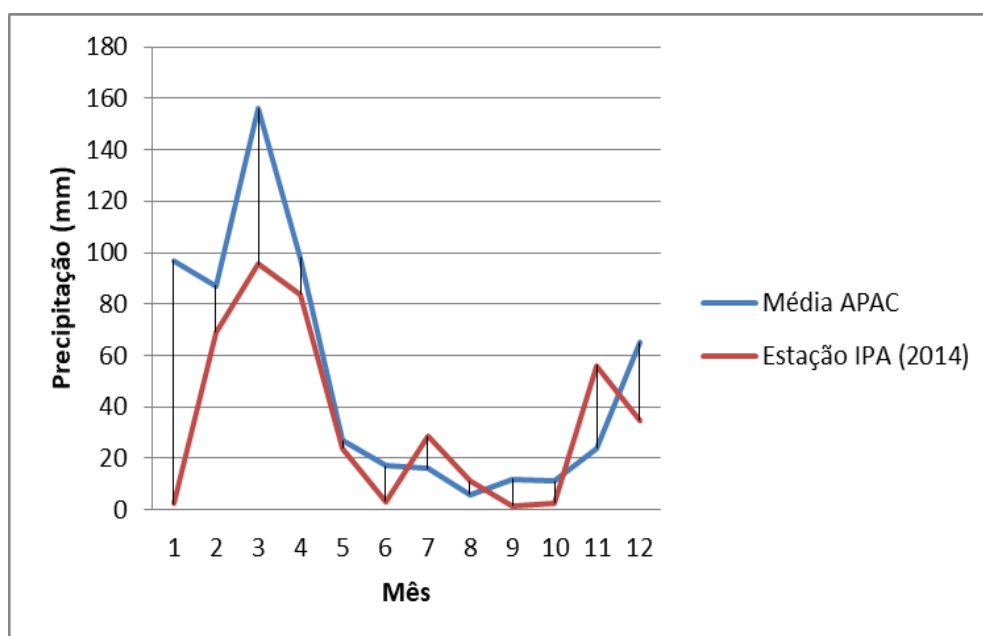
Fonte: Autor (2023).

Em Floresta, o bioma da caatinga é dominante, de modo que a vegetação existente é basicamente composta por espécies de Caatinga hiperxerófilas e trechos de Floresta caducifólia (MASCARENHAS *et al.*, 2005). Conforme o mapa de clima do Brasil (IBGE, 2002), a cidade localiza-se numa região onde a temperatura média anual é maior que 18°C e a pluviosidade anual é baixa, seguida por períodos de seca que podem chegar a 10 meses. Tais especificações caracterizam o clima Tropical semi-árido do município de Floresta.

No que diz respeito à pluviosidade da região, um aspecto importante no processo de mapeamento de estruturas vegetais, o Gráfico 6 relaciona a precipitação média de cada mês para o município de Floresta-PE, segundo dados

da APAC (2023), e a precipitação média observada em 2014, conforme os resultados apresentados pela estação pluviométrica do IPA (φ : $-08^{\circ}36'00''$; λ : $-38^{\circ}34'0,12''$), tendo em vista que a cena da ortoimagem utilizada no presente trabalho data de Agosto de 2014, como será melhor detalhado na Seção 4 (Materiais e Métodos).

Gráfico 6 – Análise pluviométrica da área de estudo em relação à época de aquisição da imagem utilizada



Fonte: Autor (2023)

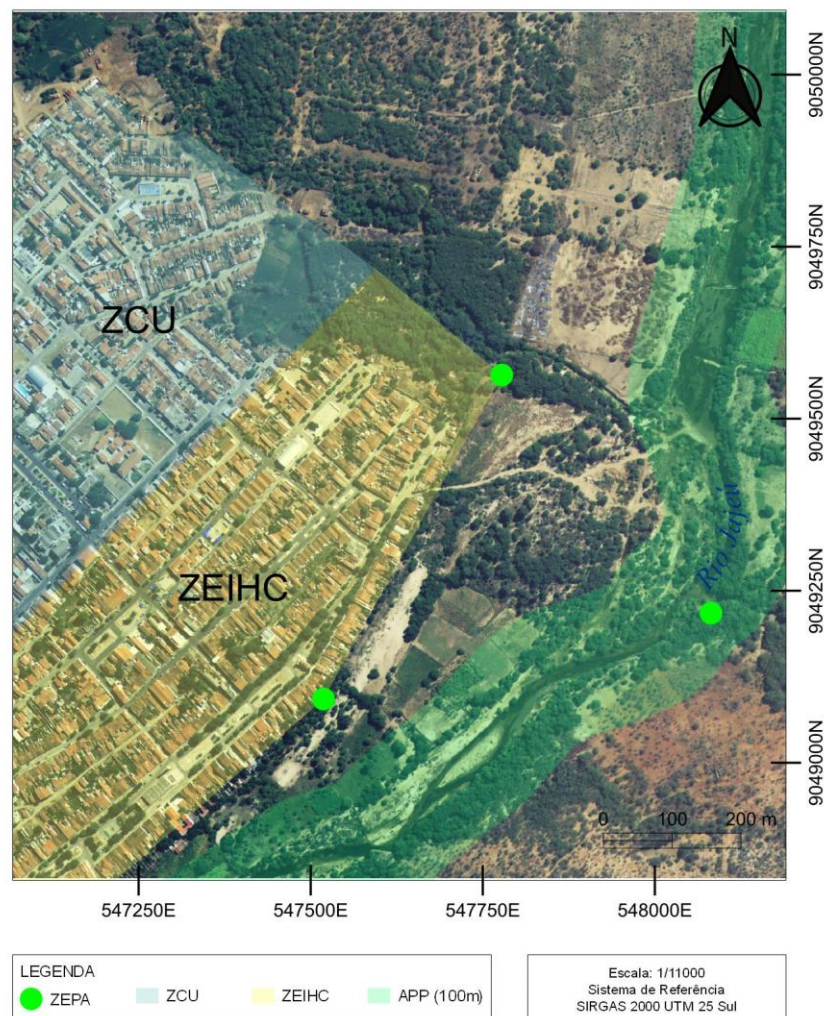
O Gráfico 6 descreve os dados pluviométricos históricos obtidos da estação do IPA no ano de 2014, pela APAC, comparado aos valores médios de precipitação de cada mês do ano para o município de Floresta, conforme expresso pela APAC. A partir disso, pode-se verificar que o período mais seco da região ocorre entre Junho e Outubro, e que em Julho e Agosto de 2014 choveu mais do que a média.

Haja vista que a análise da vegetação no centro urbano de Floresta será feita por uma ortoimagem que data de Agosto de 2014, tais observações serão importantes na compreensão dos resultados, pois entende-se que nesse período a vegetação presente estava sob *stress* pela escassez de chuva, e conforme as explicações encontradas em PONZONI (2008 p.19) e JENSEN (2011 p. 368), a perda de umidade nas plantas acarreta em um aumento da reflectância em todas as faixas, porém se a água perdida não for suficientemente reposta, ocorrerá perda da

folhagem da planta e a fotossíntese cessará, fazendo com que a vegetação tenda à morte.

O município de Floresta possui Plano Diretor vigente (Lei Nº 479/2012) que estabelece o zoneamento territorial, no qual o trecho trabalhado está inserido na Zona de Consolidação Urbana (ZCU) e na Zona Especial de Interesse Histórico Cultural (ZEIHC) da região, e a Zona Especial de Proteção Ambiental (ZEPA), que integra apenas a porção periurbana, destacada pela área de proteção permanente do Rio Pajeú com faixa de 100 m, conforme o Plano Diretor (Mapa 4).

Mapa 4 – Área de estudo em relação ao zoneamento do município de Floresta-PE conforme o plano diretor da cidade

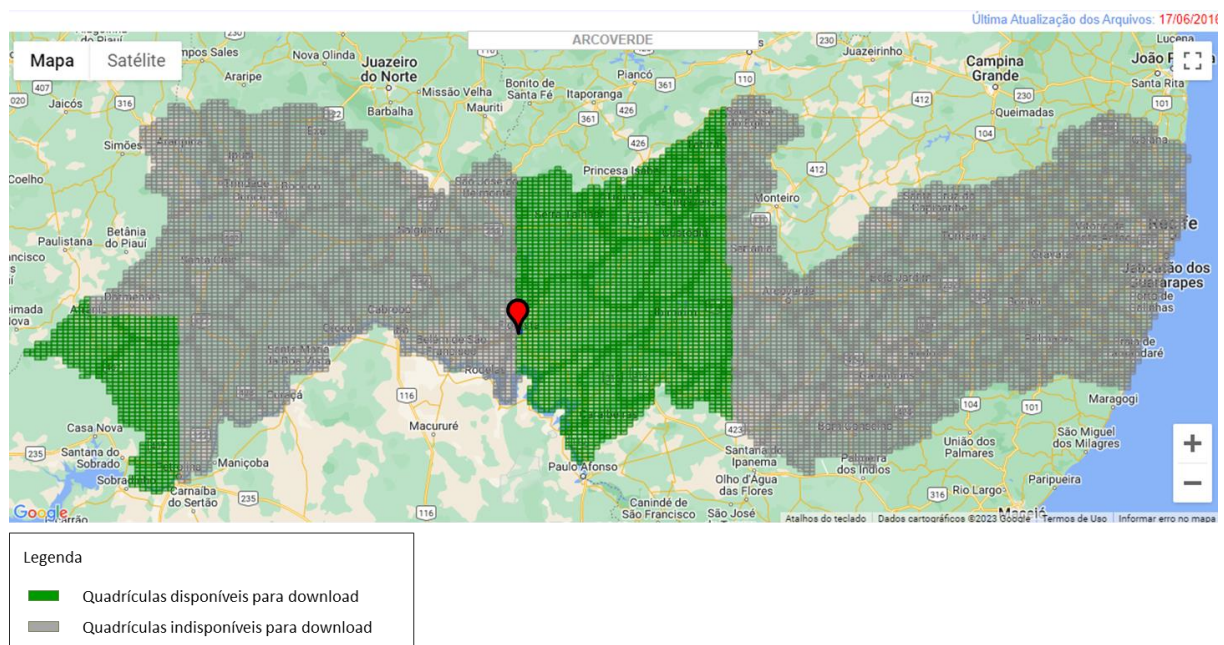


Fonte: Autor (2023).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Para extração e quantificação da área verde urbana e periurbana de um trecho do centro urbano do município de Floresta utilizou-se, no presente trabalho, uma ortoimagem de escala 1/5000, quadrícula 2522 – FLORESTA (Figura 4), procedente do PE3D, o programa de mapeamento tridimensional de todo o estado de Pernambuco, realizado por meio da Secretaria de Recursos Hídricos e Energéticos (SRHE), conforme descrito no site do PE3D entre os anos de 2014 e 2016 (CIRILO *et al*, 2005, p.2). A cena está inserida na folha SC-24-X-A-IV-2-NE-E-II e atende ao PEC-PCD (Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais) Classe A para referida escala, segundo a plataforma digital do PE3D, e foi adquirida gratuitamente pela plataforma do site oficial do projeto em extensão *Geotiff* no sistema Sirgas 2000 UTM 24 Sul.

Figura 4 – Localização da quadrícula na qual obteve-se a ortoimagem utilizada



Fonte: Modificada de PE3D (2016).

A paisagem descrita na cena data de Agosto de 2014, possui resolução espacial de 50 cm e resolução radiométrica de 8 *bits*, com dimensão 2250 x 4815, abrangendo uma área de 2,708 km², que foi posteriormente reduzida e mediante recorte por uma camada de máscara *shapefile*, para a extensão útil de 2248 x 2517,

correspondendo a um área territorial de 1,415 km², destacando melhor o centro urbano do município de Floresta – PE (Figura 5).

Figura 5 – Ortoimagem SC-24-X-A-IV-2-NE-E-II original e recortada

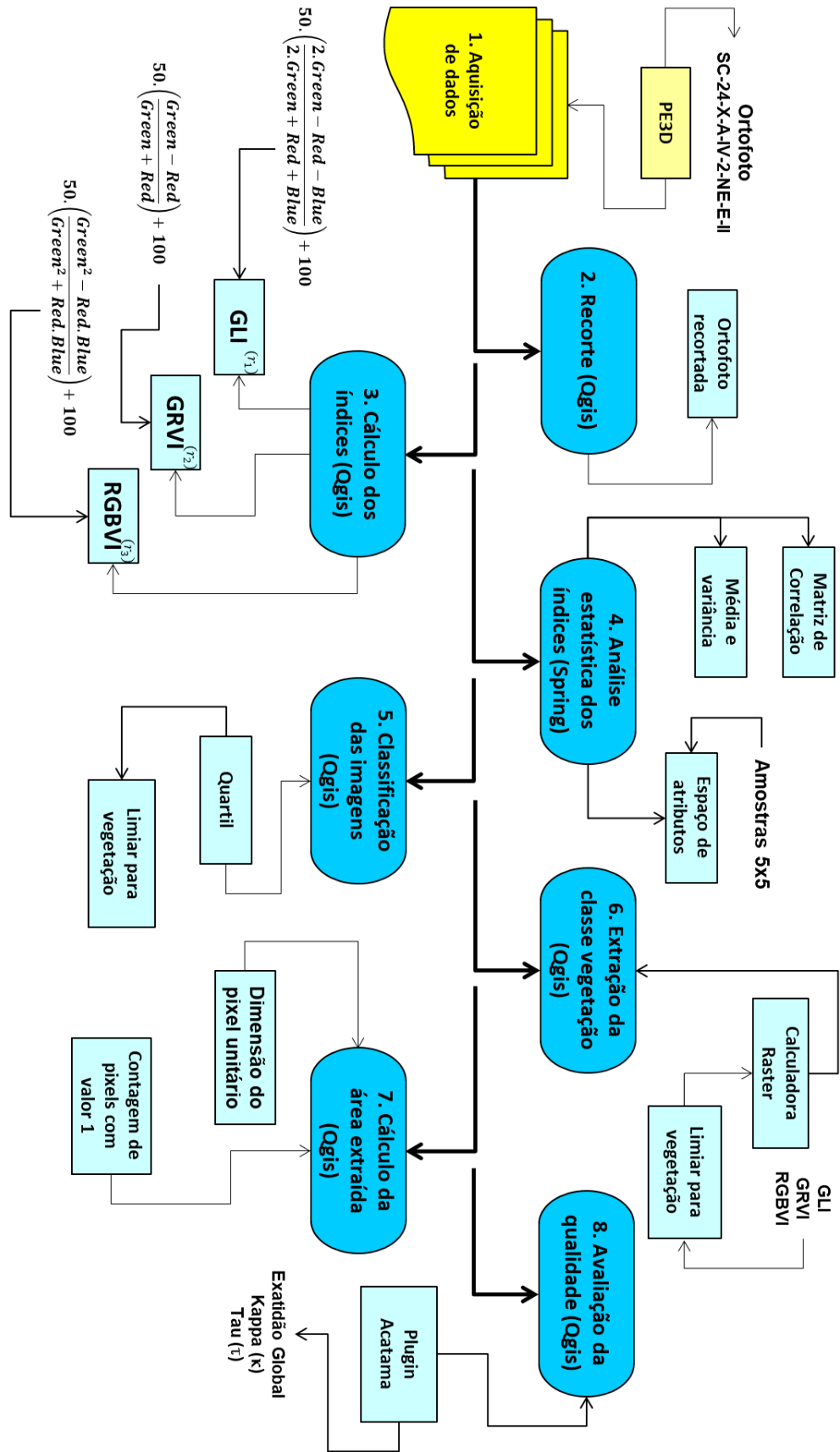


a) Imagem original, b) Imagem recortada

Fonte: Autor (2023).

A partir da descrição do processo de obtenção, bem como as características técnicas da ortofotografia utilizada no presente trabalho, as seções seguintes descrevem, de modo detalhado, as etapas e processos realizados, ordenadamente, visando o alcance dos objetivos especificados no início. Logo, o diagrama de blocos seguinte, expresso na Figura 6, dispõe sucintamente dos passos seguidos e dos softwares utilizados, corroborando para compreensão da metodologia utilizada.

Figura 6 – Metodologia em Diagrama de blocos



Fonte: Autor (2023).

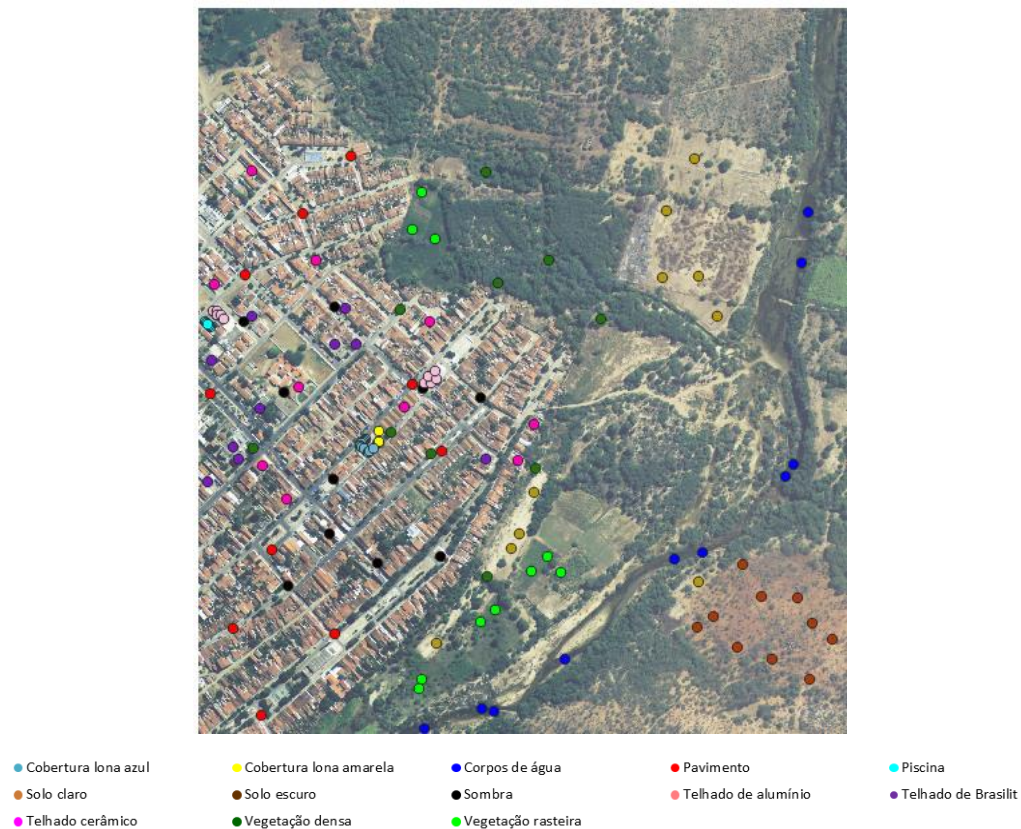
4.1 Obtenção das imagens dos índices GRVI, GLI e RGBVI

As etapas iniciais de processamento da cena e geração dos índices de vegetação foram realizadas no software SIG de dados aberto, Qgis versão 3.16.11, utilizando a ferramenta Calculadora Raster para realizar as operações aritméticas com as bandas da ortoimagem, conforme as fórmulas dos índices descritas anteriormente, nas equações (1), (2) e (3), com os ajustes mediante aplicação dos coeficientes *a* e *b* de rotação e translação respectivamente, de modo a facilitar a análise e a expressão dos resultados, haja vista que os pixels dos índices apresentam valores negativos e muito próximos ao valor de zero quando calculados pela fórmula base.

As imagens dos índices gerados foram analisadas estatisticamente, em relação à distribuição de valores, pelo histograma, e outros parâmetros estatísticos como a média, variância e desvio, haja vista que tais métricas estão diretamente relacionadas ao brilho, ao contraste e à textura da imagem (MENESES *et al.*, 2012; CRÓSTA, 2002), respectivamente, e também a matriz de correlação entre elas. Tal operação foi realizada através da ferramenta Componentes Principais, no software Spring versão 5.5.6. Também foram coletadas amostras dos pixels (matrizes 5x5) por julgamento e orientadas por feições (IBGE, 2019. p.34), através da ferramenta Leitura de Pixels, utilizando uma composição RGB com o GLI na banda *Red*, o GRVI na banda *Green*, e o RGBVI na banda *Blue*.

Este processo foi realizado no intuito de obter uma representação gráfica aproximada dos *clusters* em cada índice, visando prever as possíveis misturas de classes, ou seja, as omissões e comissões ocorridas no processo de classificação e detecção das áreas com cobertura vegetal presentes na cena, e foi realizado de dois modos, primeiramente foram coletadas amostras pontuais das feições Telhado cerâmico, Telhado Brasilit, Telhado Alumínio, Cobertura de lona azul, Cobertura de lona amarela, Pavimento, Solo claro, Solo escuro, Corpos d'água, Piscina, Vegetação densa, Vegetação rasteira e Sombra, com 25 pixels cada uma, gerando-se um espaço de atributos tridimensional (Gráfico 10). Posteriormente, foram realizadas 10 amostras (matrizes 5x5) das mesmas feições com um total de 250 pixels, com exceção de duas feições, onde foram obtidas apenas 5 amostras (125 pixels), por serem áreas de pequena extensão, mas de abordagem necessária (Figura 7).

Figura 7 – Pontos de amostragem para realização da análise do espaço de atributos



Fonte: Autor (2023).

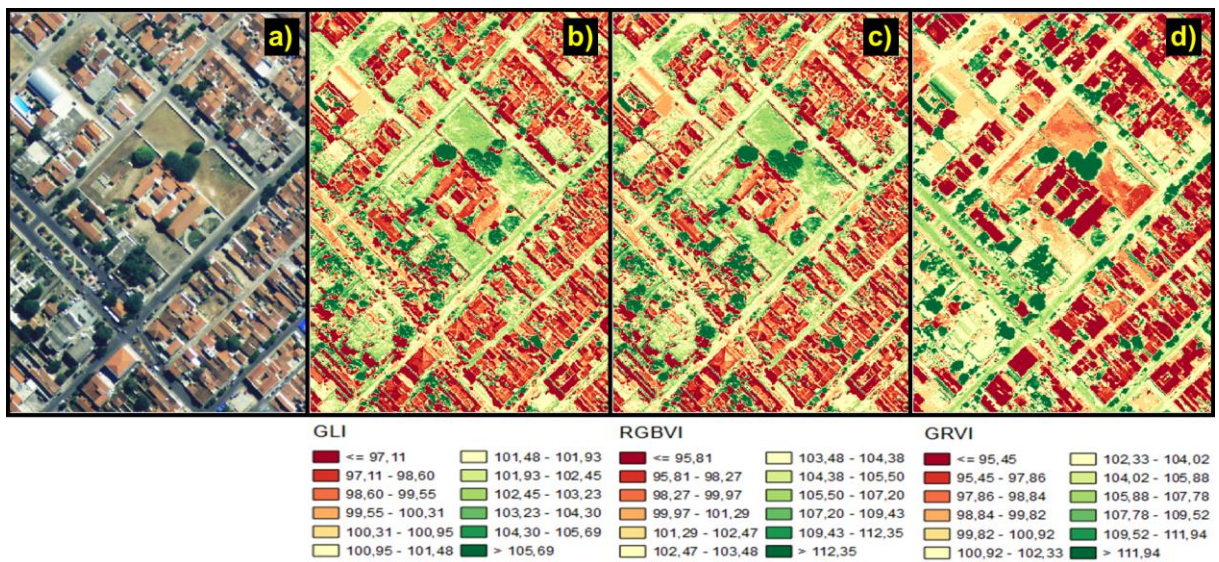
4.2 Estratificação dos dados

A classificação das imagens dos índices gerados foi realizada segundo o método dos Quartis, utilizando renderização do tipo falsa-cor, aplicando-se uma paleta de cores RedYellowGreen. Tal escolha foi motivada pelo fato de ser o método de classificação automático, disponibilizado pelo software Qgis 3.16.11, que discriminou melhor visualmente, em comparação com o método contínuo e de intervalos iguais, as feições presentes, principalmente as áreas com cobertura vegetal, classe onde as áreas verdes urbanas estão inseridas.

As imagens, então, foram categorizadas, automaticamente, em 12 (doze) classes, que por sua vez, foi determinado conforme a base do método dos quartis, que estratifica os dados de modo que cada classe possua o mesmo número de elementos (Figura 8 e Figura 9). Logo, como as imagens para essa extensão possuem um total de 5.658.216 pixels, esse valor deve ser múltiplo do número de classes. Partindo do múltiplo 3 (três), os resultados foram analisados visualmente até o múltiplo 24 (vinte e quatro) e concluiu-se que os resultados com mais de 4

(quatro) classes apresentavam uma configuração quase constante, especialmente as áreas vegetadas, e que seria mais interessante observar os dados em porcentagens pequenas, mas sem exceder no número de classes, considerando que o próximo múltiplo de 5.658.216 após é 12 (doze) é 24 (vinte e quatro).

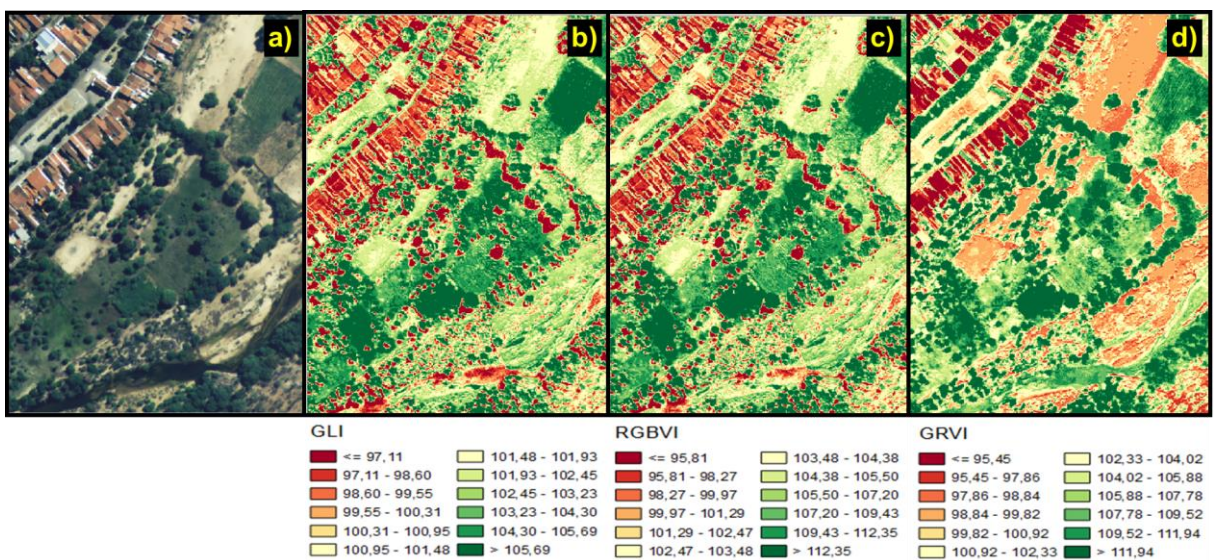
Figura 8 – Comparação entre a ortoimagem original e as imagens estratificadas dos índices em uma porção urbana



a) Imagem original, b) GLI, c) RGBVI, d) GRVI

Fonte: Autor (2023).

Figura 9 – Comparação entre a ortoimagem original e as imagens estratificadas dos índices em uma porção periurbana



a) Imagem original, b) GLI, c) RGBVI, d) GRVI

Fonte: Autor (2023).

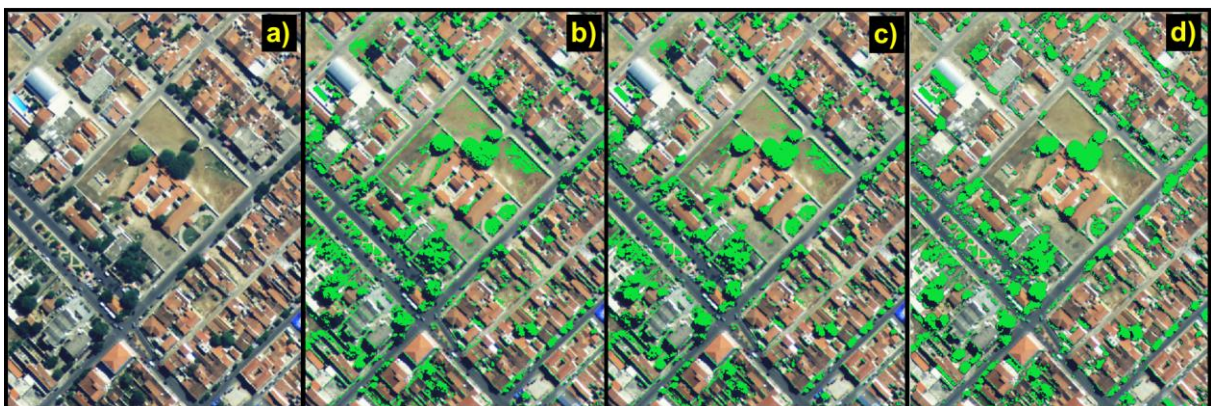
A Figura 8 apresenta a visualização de um trecho, da imagem original trabalhada, em comparação com as imagens classificadas dos índices em uma porção urbana, onde pode-se observar as peculiaridades dos resultados obtidos em cada índice. E a Figura 9 segue as mesmas diretrizes, porém abordando uma porção periurbana.

4.3 Extração da área de cobertura vegetal

A partir da classificação automática realizada, pelo método dos quartis, foram identificadas as áreas vegetadas nas imagens dos três índices a partir da análise das classes para determinação de um limiar que defina numericamente os intervalos correspondentes à vegetação, haja vista que os valores mais altos dos índices correspondem à presença de cobertura vegetal, devido às propriedades espectrais da vegetação na faixa do visível. A partir disso, destacou-se, das 12 (doze) classes, as 3 (três) últimas da estratificação de cada índice como vegetação, de modo que, considerou-se área vegetada os pixels cujos valores fossem iguais ou maiores ao menor valor do intervalo da 10ª (décima) classe, correspondendo ao limiar (Figura 10).

A partir disso, através da ferramenta Calculadora Raster do software Qgis, utilizando os limiares encontrados, sendo 103,23 para GLI, 107,20 para RGBVI, e 107,78 para GRVI, e o critério anteriormente descrito para classificação das áreas vegetadas, foram obtidas imagens binárias dos índices, de modo que os pixels cujos valores são 1 (um), indicam presença de vegetação e os de valor nulo referem-se aos demais atributos.

Figura 10 – Imagens binárias dos índices sobrepostas sobre imagem original



- a) Imagem original, b) Vegetação extraída do GLI, c) Vegetação extraída do RGBVI, d) Vegetação extraída do GRVI
Fonte: Autor (2023).

4.4 Validação da classificação

Em trabalhos precursores que utilizaram os índices GLI, GRVI e RGBVI, os autores também destinaram uma das etapas da metodologia para avaliar o desempenho dos índices conforme a aplicação dada. Em TUCKER (1979), LUSSEM (2018) e BENDIG (2015), onde verifica-se o uso dos índices no monitoramento da biomassa, o processo de avaliação ocorre baseado na regressão linear, pela verificação do coeficiente de determinação (R^2), onde analisa-se a correção entre os resultados previstos pelos índices e os valores mensurados pelas amostras. Já em LOUHAICHI (2001), onde o GLI é utilizado na análise de danos em uma cultura de trigo, a avaliação do desempenho do índice ocorre de modo visual, devido a alta resolução espacial da imagem trabalhada.

A partir disso, no presente trabalho a avaliação da qualidade do processo de determinação das áreas de vegetação urbana baseia-se na avaliação da acurácia temática da classificação gerada por cada índice, através da análise da matriz de confusão, dos indicadores de qualidade derivados dela, como a exatidão global, o índice Kappa (κ) e o coeficiente Tau (τ) (MUÑOZ, 2016), além da observação das porcentagens referentes aos erros de omissão e comissão como em SILVA (2020) e FALKOWSKI (2005).

A etapa foi executada no próprio Qgis através do plugin Acatama, como em SILVA *et al.* (2022) e TENÓRIO e CANDEIAS (2022b) onde foram coletadas amostras comparativas entre a imagem binária gerada de cada índice e a imagem óptica de alta resolução original. Mas para tal operação, fez-se necessário converter o tipo de dado das imagens binárias geradas de variáveis do tipo *float* de 32 *bits* para variáveis do tipo *int* de 8 bits positivas, conforme as exigências do plugin.

A etapa de validação considerou apenas duas classes, a saber, as áreas vegetadas e as áreas não vegetadas, e a quantidade de amostras foi estipulada automaticamente, em relação às áreas das duas classes, obtendo um total de 396 amostras, contudo, essa quantidade foi distribuída igualmente para cada uma das duas classes, de modo que foram validados 198 pontos de cada uma. Quanto à distribuição dos pontos de amostragem, esta foi determinada automaticamente, de

modo que, iniciado o processo, o plugin solicita ao operador enquadrar, de acordo com sua interpretação, as amostras de pontos da imagem original em uma das classes, permitindo, desse modo, a geração, ao final de todo o processo, da matriz de confusão para mensurar a qualidade da classificação.

4.5 Cálculo da dimensão da área

Sabendo que o produto extraído da classificação de cada índice consiste numa imagem binária, e que os pixels de valor 1 (um) correspondem às áreas de vegetação, pode-se obter, aproximadamente, a magnitude da extensão total dessas áreas presentes no espaço da ortoimagem, a partir do produto entre a quantidade total de pixels com valor 1 (um), que equivale a soma total dos pixels (N), parâmetro que pode ser obtido pela ferramenta Estatísticas da Camada Raster, e a área do pixel ao quadrado (l^2), onde l é a resolução espacial da imagem, conforme expressado pelas equações seguintes.

Sendo:

$$N = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_{ij} \rightarrow x_{ij} \neq 0 \quad (8)$$

Temos:

$$A_v = N \cdot l^2 \quad (9)$$

Onde,

N = Quantidade total de pixels com valor 1 (um)

l = Dimensão do pixel em metros (m)

x_{ij} = Elemento da imagem de entrada (pixel)

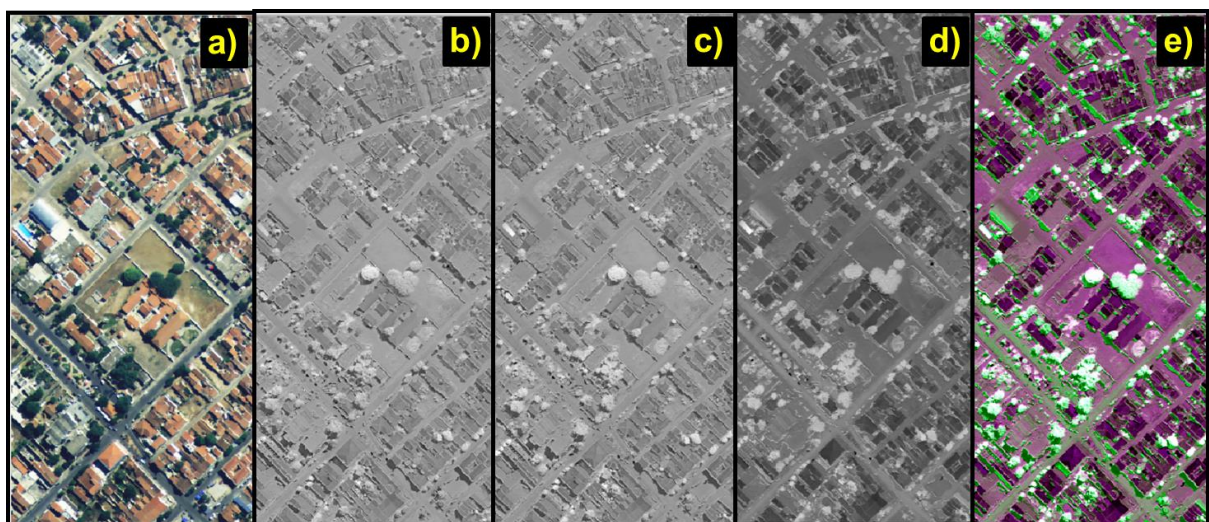
A_v = Área de vegetação

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Análise estatística dos índices GLI, RGBVI e GRVI

A Figura 11 sintetiza os três índices gerados, conforme a aplicação das equações (1), (3) e (5), consistindo em imagens monocromáticas cujas variáveis são do tipo *float* de 32 *bits*. No Gráfico 7 estão representados os histogramas das cenas de cada índice e na Tabela 1, estatísticas das imagens, de modo que nos permite descrever e comparar os índices por parâmetros estatísticos. O GLI apresentou um histograma com uma estrutura bimodal e pouco aberta, com média deslocada para valores de maior brilho, variância e desvio inferior aos demais índices, caracterizando menor contraste e textura. Já o GRVI, apresenta histograma com uma estrutura bimodal e pouco aberta também, com média deslocada para níveis de cinza mais baixos, e o RGBVI apresenta histograma com uma estrutura assimétrica e pouco aberta, e média deslocada para níveis de cinza mais altos. Estes dois últimos índices e possuem variância e desvio semelhantes e superiores ao GLI, implicando em maior contraste e textura. Apesar disso, o RGBVI e o GLI possuem alto grau de correlação, fato claramente perceptível na Figura 11 e nos resultados gerados nas seções seguintes.

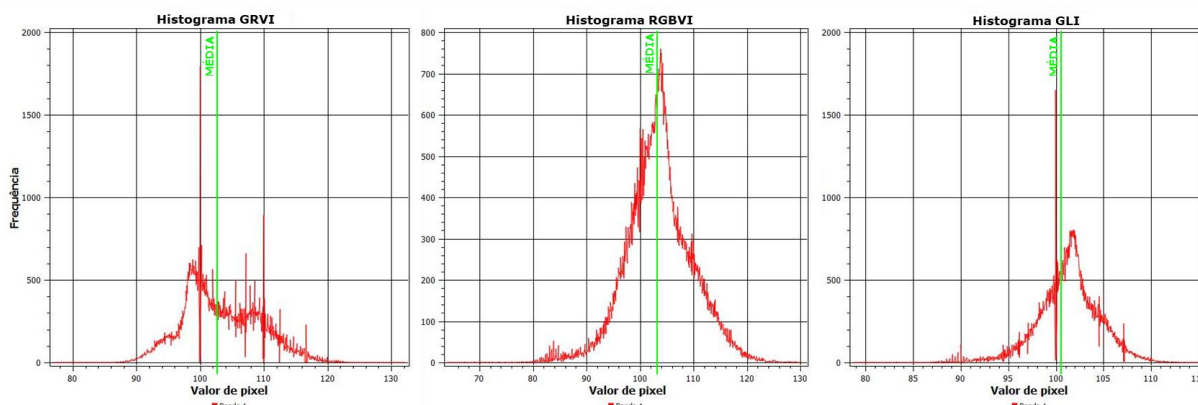
Figura 11 – Ortoimagem original, as imagens dos índices e a composição colorida



a) Imagem original, b) GLI, c) RGBVI, d) GRVI, e) Composição R(GLI), G(GRVI), B(RGBVI)

Fonte: Autor (2023).

Gráfico 7 – Histogramas das imagens dos índices GRVI, RGBVI e GLI



Fonte: Autor (2023).

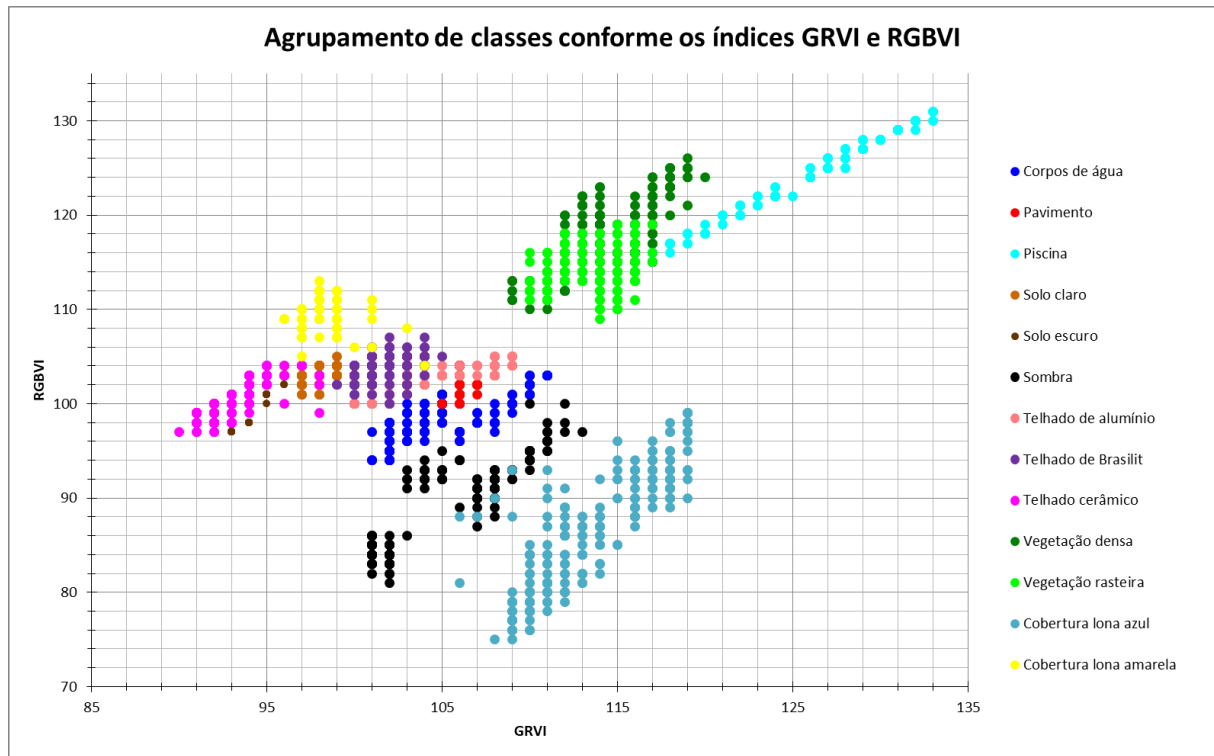
Tabela 1 – Matriz dos coeficientes de correlação dos índices e estatísticas gerais

Índices	GRVI	RGBVI	GLI
GRVI	1	0,612	0,501
RGBVI	0,612	1	0,977
GLI	0,501	0,977	1
Resultado da Média, Variância e Desvio			
Média	102,66	103,07	100,84
Variância	35,08	37,05	10,57
Desvio	5,923	6,087	3,251

Fonte: Autor (2023).

A partir das amostras dos pontos coletados (Figura 7) foi possível a geração do Gráfico 8 e Gráfico 9 no software Excel e o Gráfico 10 no software Geogebra, que descrevem, de modo conjunto e individual, a disposição dos *clusters* das principais feições observadas (telhado cerâmico, telhado brasilit, telhado alumínio, cobertura de lona azul, cobertura de lona amarela, pavimento, solo claro, solo escuro, corpos d'água, piscina, vegetação densa, vegetação rasteira e sombra) nos índices GLI, RGBVI e GRVI. Logo, conforme pode-se observar no Gráfico 8, é possível prever de antemão que ao submeter o GRVI a uma classificação, os pixels referentes às feições sombra, cobertura de lona azul, corpos d'água e áreas de piscina podem ser confundidos com os pixels referentes às áreas de vegetação densa e rasteira. Já quanto ao uso do RGBVI, é possível prever que os pixels referentes às feições cobertura de lona amarela e áreas de piscina podem ser equivocadamente classificados como áreas de vegetação.

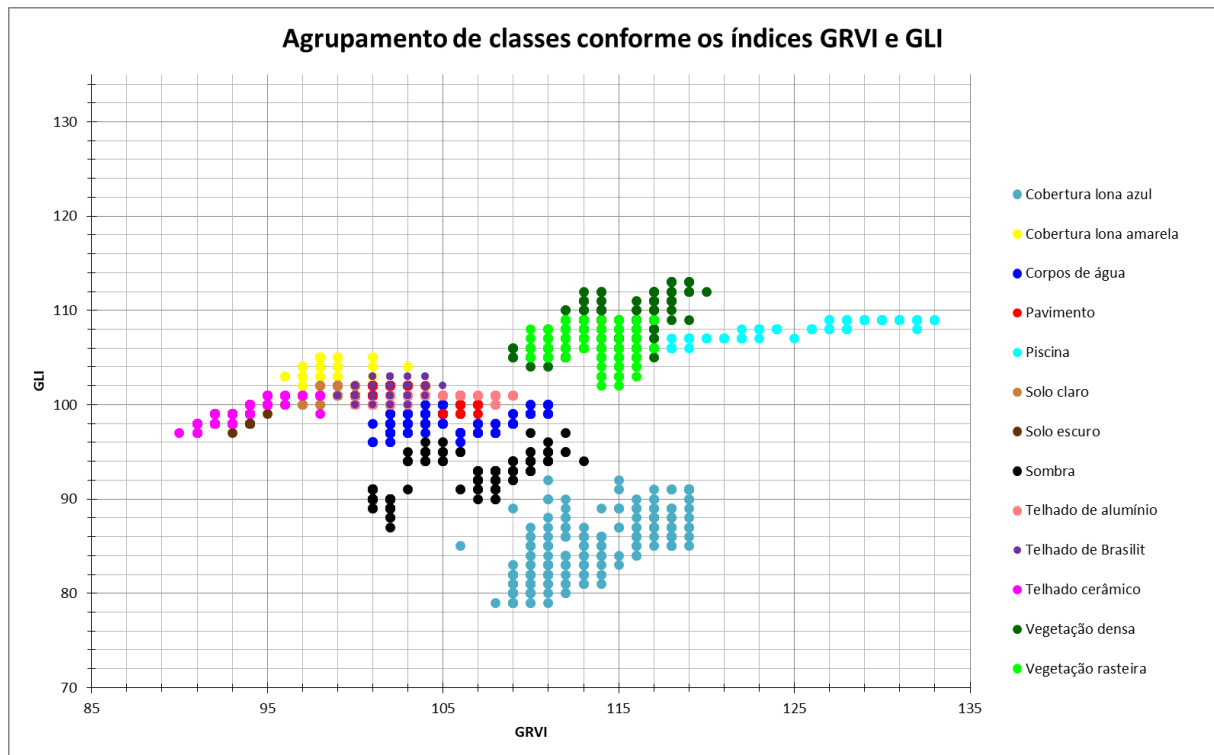
Gráfico 8 – Espaço bidimensional de atributos GRVI x RGBVI



Fonte: Autor (2023).

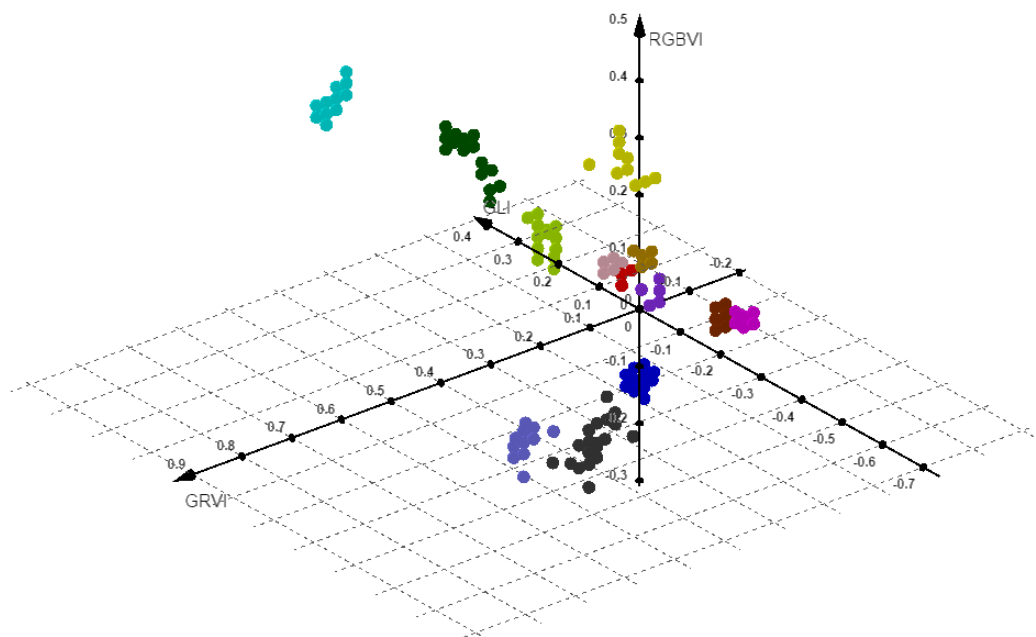
Conforme as observações anteriores, também podemos prever ambiguidades no processo de discriminação das áreas de vegetação utilizando o índice GLI, de acordo com a análise do Gráfico 9, de modo que podemos inferir que pixels referentes às feições cobertura de lona amarela, telhado de brasilit, telhado de alumínio, telhado cerâmico, pavimento, solo claro e áreas de piscina podem ser enquadrados na classe das áreas de vegetação. Contudo, pode-se perceber que o uso conjunto dos índices tende a gerar melhores resultados na discriminação das áreas vegetadas, como é constatado no espaço de atributos no Gráfico 10.

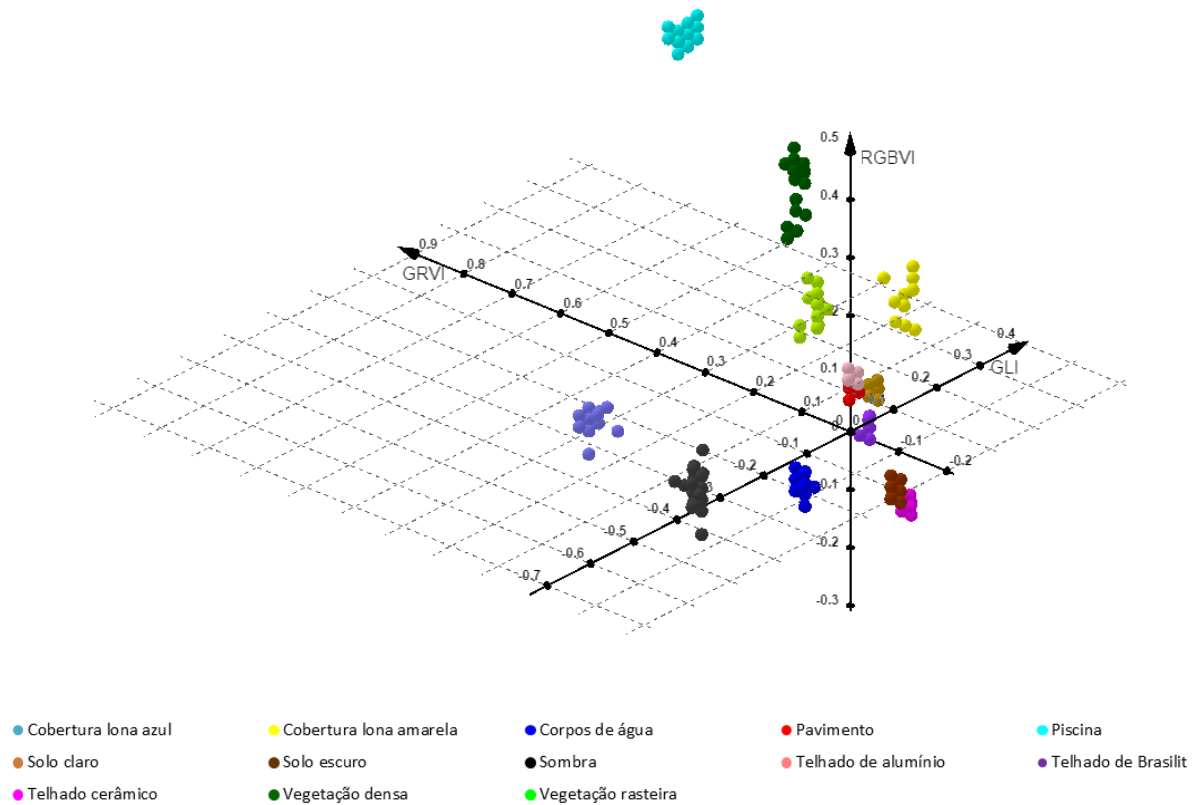
Gráfico 9 – Espaço bidimensional de atributos GRVI x GLI



Fonte: Autor (2023).

Gráfico 10 - Espaço tridimensional de atributos das imagens dos três índices





Fonte: Autor (2023).

5.2 Classificação das imagens e extração das áreas de vegetação

De acordo com os processos descritos na Seção 4.2 (Estratificação dos dados), foram geradas, com os mesmos critérios, classificações para os três índices, de modo que, segundo à pelata de cores adotada, percebe-se que, de um modo geral, para ambos os índices as áreas de vegetação, identificadas na imagem óptica utilizada, apresentam pixels com valores mais altos, enquanto que as áreas ocupadas por edificações apresentam pixels com valores mais baixos. Contudo, conforme foi antecipado pela análise do espaço de atributos, os índices apresentam particularidades na representação de algumas feições.

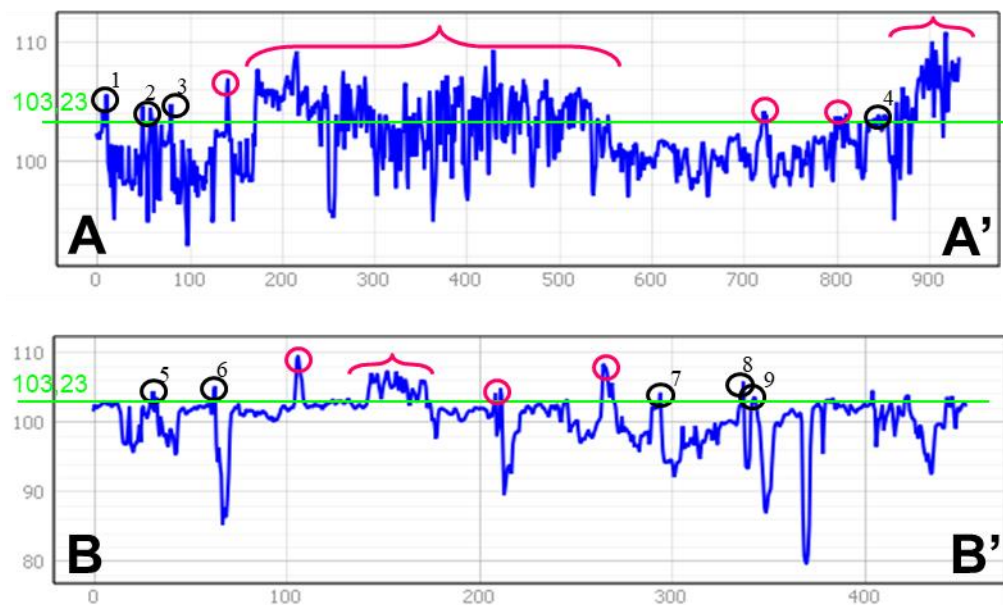
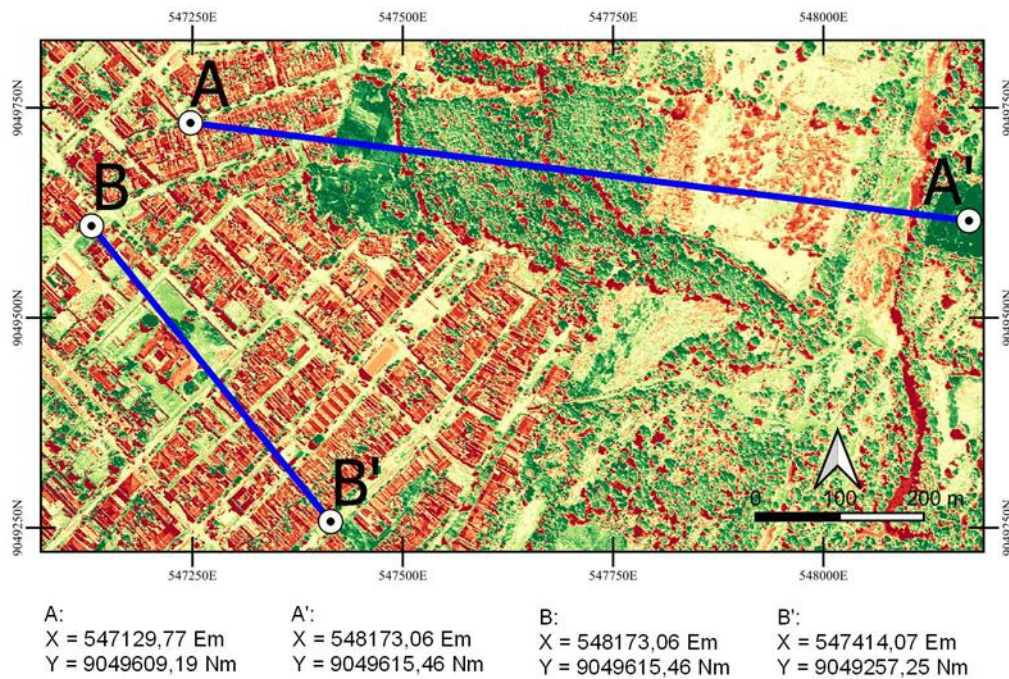
A partir disso, através do uso plugin *Profile tool* no Qgis, foram gerados os gráficos descritos no Mapa 5, Mapa 6 e Mapa 7, permitindo analisar os pixels classificados como áreas de vegetação e como foram enquadrados os demais em cada índice mediante as seções AA', que vai de uma porção urbana até uma porção de área de preservação permanente, e BB', que abrange apenas a área urbana, de modo que os traçados foram antecipadamente delimitados por dois arquivos

vetoriais distintos, tendo-se conhecimento de seu comprimento e das coordenadas dos pontos iniciais e finais. Logo, é possível a visualização do valor dos índices nos pixels no eixo vertical y em relação ao percurso da seção, no eixo x.

Nos gráficos das seções AA' e BB' do índice GLI do Mapa 5, a linha verde refere-se ao limiar adotado para definir a classe das áreas de vegetação, sendo estas descritas pelos pixels iguais ou maiores que o limiar. Os destaques em preto referem-se à pixels que, apesar de estarem dentro do limiar, não representam áreas vegetadas, e os destaques em magenta representam os que foram corretamente classificados. Na seção AA', os pontos 1 e 2 indicam pixels que pertencem à trechos concretados de residências, o ponto 3 refere-se a classe dos telhados brasileiros e o ponto 4, à 850 m da origem da seção, refere-se à vegetação aquática da superfície do Rio Pajeú.

Já na seção BB', os pontos 5 e 6 são concernentes à estruturas concretadas de residências, e os pontos 7, 8 e 9 referam-se à áreas pavimentadas. Logo, podemos observar que, nestes trechos, a acurácia temática das áreas de vegetação extraídas a partir do GLI foi afetada pelos pixels que descrevem áreas concretadas. E, além das análises executadas, um comentário deve ser adicionado, o fato de que a classe das sombras nas áreas estritamente urbanas são bem características e não interferem na detecção das áreas vegetadas, porém em trechos onde a vegetação é densa e as copas das árvores mais altas sombreiam outras, a vegetação sombreada é excluída da classe das áreas de vegetação.

Mapa 5 – Análise das seções AA' e BB' do GLI

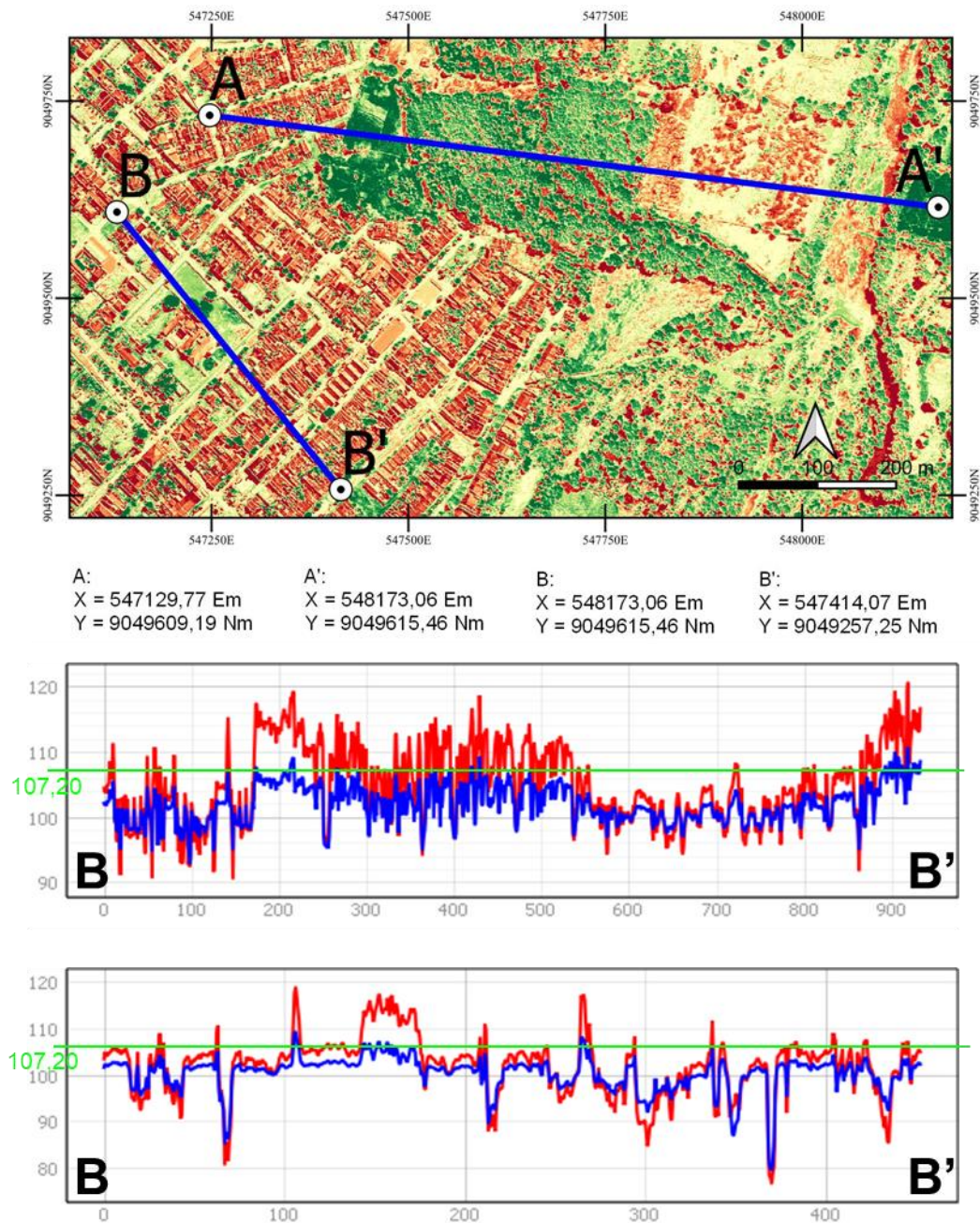


Fonte: Autor (2023).

No que diz respeito ao RGBVI, os resultados estão expressados no Mapa 6, e apresentam-se, em muitos aspectos, similares aos que foram obtidos no GLI, conforme previsto pela análise estatística, onde na matriz de correlação, descrita na Tabela 1, observou-se um alto coeficiente de correlação entre eles. Desse modo, será feita uma abordagem comparativa entre os resultados obtidos a partir da sobreposição dos gráficos das seções AA' e BB' dos dois índices, em que o RGBVI está expresso na cor vermelha e o GLI, na cor azul. Logo, conclui-se que, de fato, os

dois incídes apresentam comportamentos semelhantes, conforme expressado nos dois gráficos das duas seções, contudo, as áreas de vegetação são representadas com maior intensidade no RGBVI, exprimindo valores mais altos dos que foi observado no GLI.

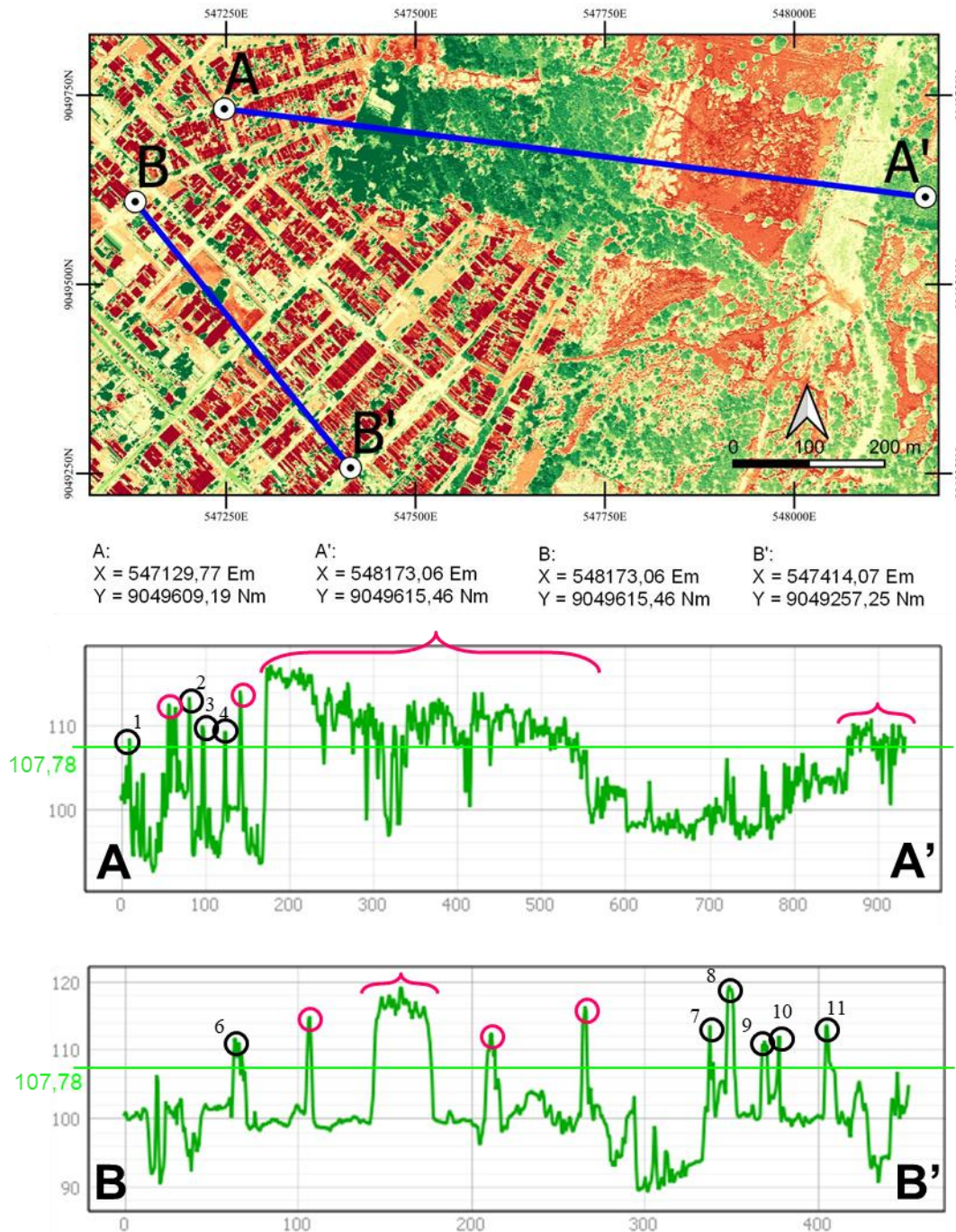
Mapa 6 – Análise das seções AA' e BB' do RGBVI



Fonte: Autor (2023).

Para os gráficos do GRVI das seções AA' e BB', descritos no Mapa 7, também tem-se uma linha verde expressando o limiar adotado para classificar as áreas de vegetação, os destaques em preto, que referem-se à pixels que, apesar de estarem dentro do limiar, não representam áreas vegetadas, e os destaques em magenta que representam os que foram corretamente classificados. A partir disso, na seção AA', os pontos 1, 2, 3 e 4 descrevem, na verdade, áreas de sombreadas, que apresentam um padrão, voltando sempre para sudoeste. Já na seção BB', os pontos 6, 7, 10 e 11 também referam-se à área sombreadas, e os destaques 8 e 9 descrevem áreas cobertas por lona azul. Logo, observa-se que nestes trecho, as áreas de vegetação extraídas a partir do GRVI tiveram sua acurácia temática afetada pelos pixels referentes às áreas sombreadas e às coberturas de lona azul.

Mapa 7 – Análise das seções AA' e BB' do GRVI



Fonte: Autor (2023).

Mediante tudo que foi analisado em relação à classificação e extração das áreas de vegetação, a partir do uso individual dos índices GLI, RGBVI e GRVI, e dos erros de comissão e omissão que afetam a acurácia temática do processo, o Mapa 5, Mapa 6 e Mapa 7 expressam visualmente e graficamente, em locais específicos, os erros cometidos no processo de extração das áreas vegetadas com relação às

classes dos pixels, descritas na Seção (Análise estatística dos índices GLI, RGBVI e GRV), que foram enquadrados na classe das áreas de vegetação ou impediram que os pixels referentes a estas fossem agrupados corretamente.

5.3 Magnitude das áreas extraídas

Conforme a metodologia descrita na Seção 4.5 (Cálculo da dimensão da área), tomou-se as imagens binárias, geradas mediante o conhecimento do limiar de cada índice e do uso da ferramenta calculadora *raster*, e através da ferramenta estatísticas da camada *raster* obteve-se o somatório dos pixels da imagem de cada índice, que por sua vez foi multiplicado pela área unitária do pixel, que para este caso, conforme a ortoimagem utilizada, é 0,25 m², obtendo-se, por fim, a magnitude da área ocupada pela cobertura vegetal extraída de cada índice, conforme a Tabela 2 sintetiza.

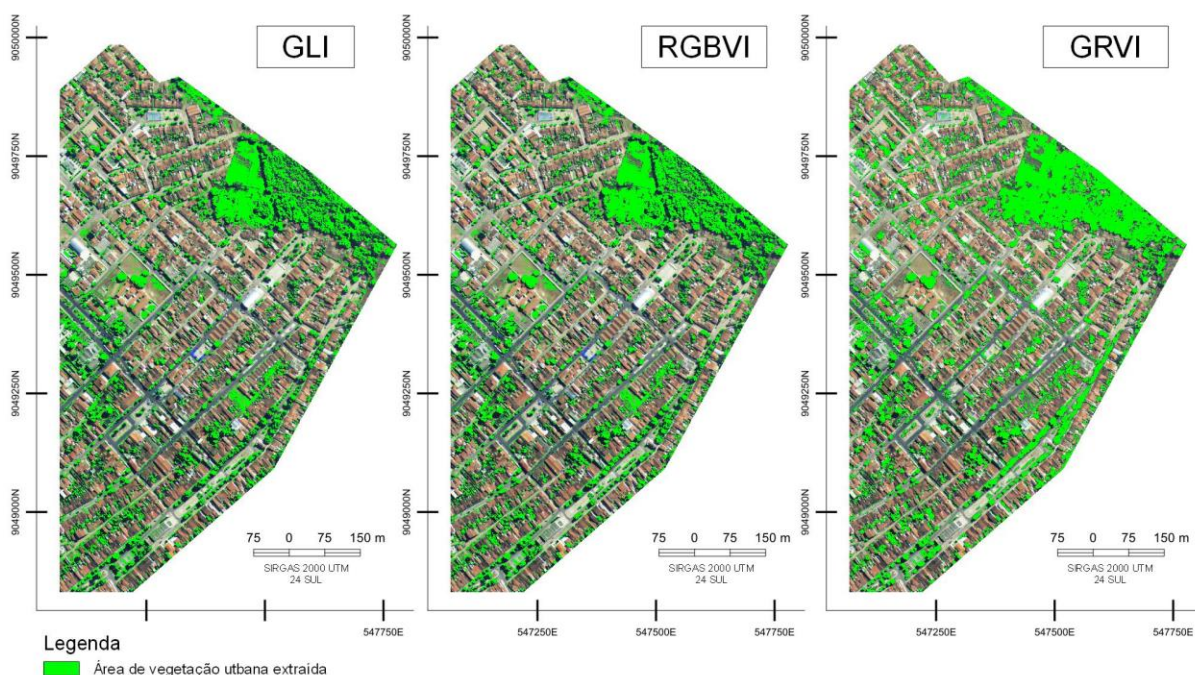
Tabela 2 – Magnitude das áreas de vegetação extraídas em cada índice

ÍNDICE	<i>N</i>	<i>l</i> ² (m ²)	<i>Av</i> (m ²)	<i>Av</i> (km ²)	Área vegetada (%)
GLI	1396847	0,25	349211,75	0,349	24,7%
RGBVI	1388586	0,25	347146,50	0,347	24,5%
GRVI	1384096	0,25	346024,00	0,346	24,5%

Fonte: Autor (2023).

A partir disso, utilizando a delimitação legal de área urbana, conforme a lei orgânica do município que constitui o plano diretor, extraiu-se das imagens binárias, conforme expresso no Mapa 8, contendo a vegetação extraída a partir dos índices, utilizando a ferramenta de recorte da camada *raster* por uma camada de máscara, apenas a vegetação urbana, para mensura a magnitude da extensão total das áreas verdes urbanas existentes no trecho do centro urbano de Floresta-PE (Tabela 3).

Mapa 8 – Resultados das áreas de vegetação extraídas e recortadas de cada índice



Fonte: Autor (2023).

Tabela 3 – Magnitude das áreas de vegetação extraídas da zona urbana de Floresta-PE em cada índice

ÍNDICE	N	l^2 (m ²)	A_v (m ²)	A_v (ha)	Área vegetada (%)
GLI	374715	0,25	93678,75	9,37	17,6%
RGBVI	382546	0,25	95636,50	9,56	18,0%
GRVI	455694	0,25	113923,50	11,39	21,5%

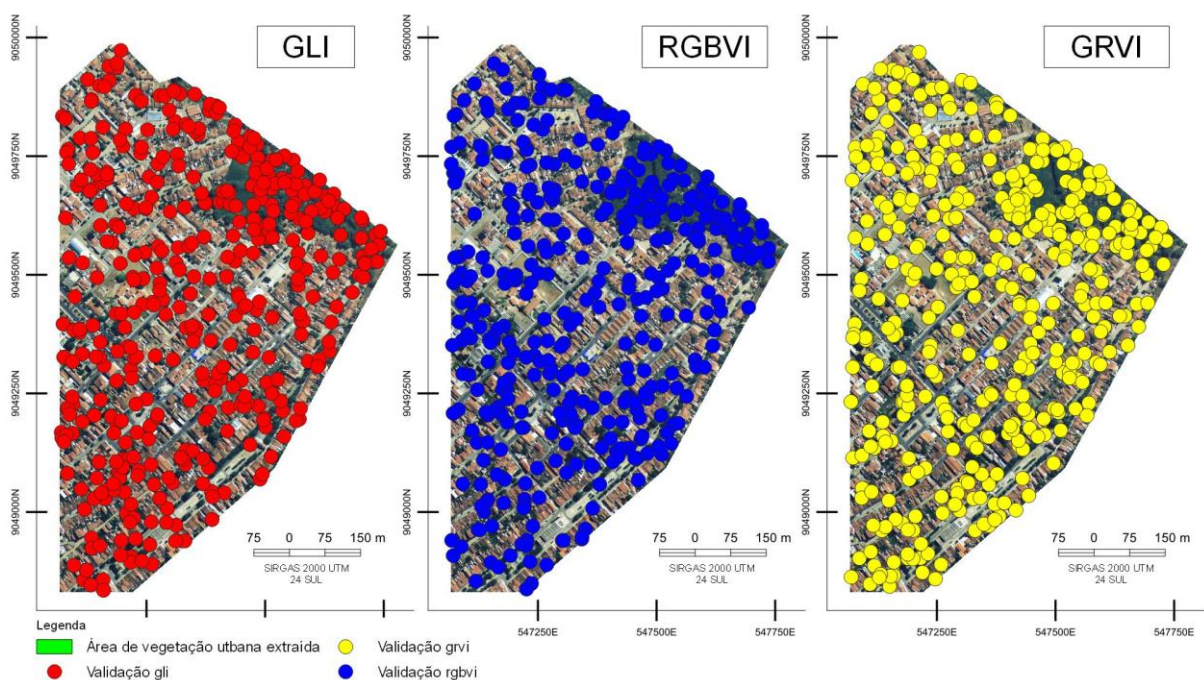
Fonte: Autor (2023).

5.4 Validação da classificação

O processo de validação foi executado conforme as especificações descritas na Seção 4.4 (Validação da classificação), sendo realizada duas vezes para cada uma das três imagens binárias de 8 *bits* geradas de cada índice, no intuito de utilizar a tentativa de melhor resultado e obter uma comparação justa, amenizando a interferência dos erros relacionados ao operador e à distribuição dos pontos de amostragem, cuja disposição referente aos resultados utilizados está descrita no

Mapa 9. Desse modo, foram geradas três matrizes de confusão, expressas nas tabelas 4, 6 e 8, das quais obteve-se indicadores de qualidade do processo de classificação, expressos nas tabelas 5, 7 e 9, a saber, o exatidão global, índice Kappa (κ) e o coeficiente Tau (τ), calculados, conforme descreve MUÑOZ (2016), na plataforma Excel.

Mapa 9 – Pontos de amostragem do processo de validação da classificação obtida para cada índice



a)GLI, b)RGBVI e c) GLI

Fonte: Autor (2023).

Logo, analisando e comparando as matrizes de confusão geradas e os indicadores, conclui-se que os índices apresentaram desempenho semelhante, mas o GRVI obteve melhor desempenho na classificação e extração da área vegetada com exatidão global de 86,62 %, índice Kappa de 0,73. Os demais índices, o GLI apresenta o menor desempenho com exatidão global de 78,79% e índice Kappa de 0,58. Quanto ao RGBVI, obteve exatidão global de 82,58% e índice Kappa de 0,65. A partir disso, levando em consideração o índice Kappa, de acordo com CONGALTON e GREEN (1998), a classificação obtida por todos os índices é considerada razoável ($0,4 < \kappa \leq 0,8$), já segundo LANDIS e KOCH (1977), a

classificação obtida pelo GLI é considerada boa ($0,4 < \kappa \leq 0,6$), e as obtidas pelo GRVI e RGBVI são consideradas como muito boa ($0,6 < \kappa \leq 0,8$).

Tabela 4 – Matriz de confusão da classificação da imagem do GLI

	1	2	Total	Acu. do usuário	EO	EC
1	178	20	198	0,90	26,45%	10,10%
2	64	134	198	0,68	12,99%	32,32%
Total	242	154	396			
Acu. do produtor	0,74	0,87				

1.Área não vegetada

2.Área vegetada

Fonte: Autor (2023).

Tabela 5 – Indicadores de qualidade da classificação da imagem do GLI

Indicadores	
Exatidão Global	78,79%
Kappa	57,58%
Tau	0,576

Fonte: Autor (2023).

Tabela 6 – Matriz de confusão da classificação da imagem do RGBVI

	1	2	Total	Acu. do usuário	EO	EC
1	183	15	198	0,92	22,78%	7,58%
2	54	144	198	0,73	9,43%	27,27%
Total	237	159	396			
Acu. do produtor	0,77215	0,91				

1.Área não vegetada

2.Área vegetada

Fonte: Autor (2023).

Tabela 7 – Indicadores de qualidade da classificação da imagem do RGBVI

Indicadores	
Exatidão Global	82,58%
Kappa	65,15%
Tau	0,652

Fonte: Autor (2023).

Tabela 8 – Matriz de confusão da classificação por GRVI

	1	2	Total	Acu. do usuário	EO	EC
1	190	8	198	0,96	19,15%	4,04%
2	45	153	198	0,77	4,97%	22,73%
Total	235	161	396			
Acu. do produtor	0,81	0,95				

1.Área não vegetada

2.Área vegetada

Fonte: Autor (2023).

Tabela 9 – Indicadores de qualidade da classificação da imagem do GRVI

Indicadores	
Exatidão Global	86,62%
Kappa	73,23%
Tau	0,7323

Fonte: Autor (2023).

5.5 Aplicação do método para os casos sem influência das áreas periurbanas altamente vegetadas

Conforme descrito na Seção 4 (Materiais e Métodos), a área de vegetação urbana obtida é oriunda de um processo de classificação aplicado a uma ortoimagem que abrange uma área mista, com uma predominante área urbana à esquerda, e na porção direita, uma área periurbana com registros de atividade rural e influenciada pela mata ciliar do Rio Pajeú, de modo que questiona-se se tal método possui o mesmo desempenho, expressado na Seção 5.2 (Classificação das

imagens e extração das áreas de vegetação) , se a ortoimagem abrangesse apenas o trecho referente à zona urbana definida pelo município (Figura 12).

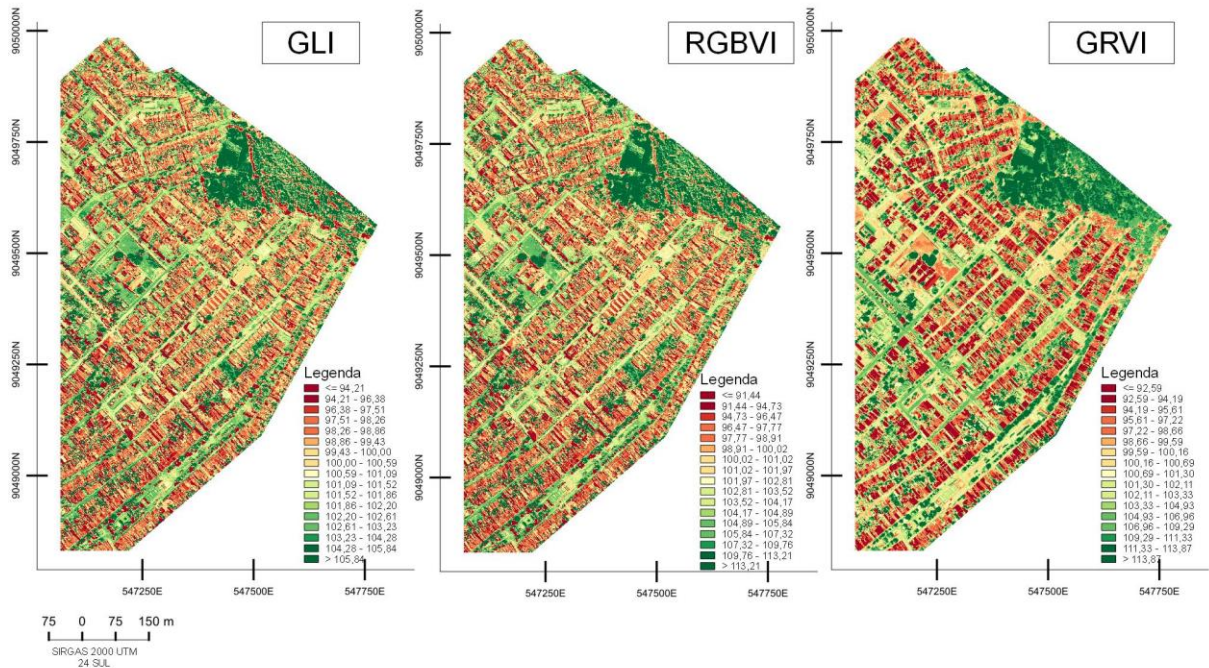
Figura 12 – Área recortada da ortoimagem correspondente à zona urbana prevista no plano diretor de Floresta-PE



Fonte: Autor (2023).

A partir disso, extraiu-se apenas a porção urbana dos índices (Mapa 10), e classificou-se, de acordo com a metodologia, as imagens em 17 classes, haja vista que as cenas recortadas possuíam um total de 2.123.963 de pixels, número múltiplo de 17. Determinou-se, em seguida, como área de vegetação, as três últimas classes dos índices GRVI, GLI e RGBVI, encontrando os respectivos limiares 109,29, 103,23 e 107,32, de modo que os pixels com valores iguais ou maiores a eles foram enquadrados como vegetação urbana, gerando-se, de acordo com esta condição as três imagens binárias.

Mapa 10 – Classificação das imagens dos índices recortadas conforme a zona urbana do município de Floresta-PE



Fonte: Autor (2023).

A magnitude das áreas de vegetação urbana extraídas de cada índice, obtidas segundo a metodologia que vem sendo aplicada no presente trabalho, foi comparada com as áreas obtidas anteriormente, cujos valores estão expressos na Tabela 3. Logo, constata-se que a área de vegetação extraída mediante uso do GRVI foi a que mais variou com relação ao recorte da ortoimagem, registrando-se uma redução de 17,87% conforme a tabela 10. Quanto aos outros casos, sofreram poucas variações de extensão. Observa-se, contudo, que para este caso a magnitude das áreas de vegetação extraídas dos índices são mais similares.

Tabela 10 – Magnitude das áreas de vegetação urbana obtidas em cada índice cujas imagens foram previamente recortadas conforme o limite da zona urbana do município

ÍNDICE	<i>N</i>	<i>I</i> ² (m ²)	<i>A_v</i> (m ²)	<i>A_v</i> (ha)	(%)
GLI_URB	374909	0,25	93727,25	9,37	17,65%
Diferença	194	-	48,50		
Variação (%)				0,05%	
RGBVI_URB	374963	0,25	93740,75	9,37	17,65%
Diferença	-7583		-1895,75		
Variação (%)				-1,98%	
GRVI_URB	374260	0,25	93565,00	9,36	17,62%
Diferença	-81434		-20358,50		
Variação (%)				-17,87%	

Fonte: Autor (2023).

6 CONCLUSÕES

Conforme exposto na Seção 5.2 (Classificação das imagens e extração das áreas de vegetação), a limiarização obtida pela classificação automática de imagens *raster* pelo método dos quartis gerou camadas *raster* (imagem binária) com as mesmas características técnicas da imagem original, cujo conjunto de pixels unitários extraído das imagens dos índices GLI, GRVI, RGBVI é coerente com a feição vegetal presente na ortoimagem no trecho de zona urbana trabalhado, naquela época específica. Logo, constata-se que a metodologia utilizada se aplica à detecção e mapeamento das áreas de vegetação urbana, podendo contribuir para o gerenciamento e planejamento municipal desses locais.

Os produtos gerados apresentam coerência numérica e deles obteve-se a magnitude das áreas de vegetadas extraídas em cada índice, sendo a média dos 6 (seis) resultados expressos, demonstrados nas Tabelas 3 e 10, 9,74 ha de área de vegetação urbana (18,34% da zona urbana analisada). E avaliando-se a acurácia temática do produto, mediante obtenção de indicadores de qualidade do processo discriminatório, a classificação obtida com base no GRVI apresentou os melhores resultados (ligeiramente superiores aos demais resultados), com exatidão global de 86,62%, e Kappa (κ) de 73,23%.

Conclui-se, pois, que os índices de vegetação GRVI, GLI e RGBVI, que têm como base o uso aritmético das bandas *Red*, *Green* e *Blue* do visível, desenvolvidos para monitoramento da biomassa vegetal e análise da fenologia de espécies vegetais, ante a sazonalidade do meio, podem ser utilizados para discriminar as áreas de vegetação urbana, mediante o uso de um limiar determinado de modo semiautomático através do método de estratificação de dados automático baseado nos quartis, e através disso obter a magnitude da área extraída sem a necessidade de converter o arquivo matricial em um arquivo vetorial (Ver Mapa 11), cujo processamento exigiria bastante da máquina utilizada, haja vista estar trabalhando-se com uma imagem de alta resolução espacial, que é imprescindível para o sensoriamento remoto da paisagem urbana, onde a complexidade, oriunda do alto nível de detalhamento.

Contudo, conforme demonstrado nas Seções 5.1, 5.2 e 5.4, destinadas para análise do espaço de atributos e observação gráfica dos resultados das imagens

temáticas geradas pelo método de estratificação escolhido, em comparação com o que foi previamente interpretado na ortoimagem utilizada, constatou-se erros de comissão e omissão nos resultados extraídos de cada índice, os quais ocorrem de modo semelhante nos índices RGBVI e GLI. Desse modo, na aplicação dos índices deve-se considerar a interferência desses erros nos resultados extraídos das áreas vegetadas. O maior erro registrado mediante processo de validação, enquadrando as feições não vegetais em uma só classe, ocorreu na classificação do GLI, onde 32,32% dos 198 pixels classificados como vegetação na validação não correspondem a essa feição.

REFERÊNCIAS

ANDERSON, P. S. **Fundamentos para fotointerpretação**. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Cartografia, 1982. p.136. v.1.(Série Fotointerpretação: Teoria e Métodos).

Agência Pernambucana de Águas e Clima - APAC. **Relatório de situação de recursos hídricos do Estado de Pernambuco 2011/2012**. Recife: Apac, 2013. p.116.

AGÊNCIA PERNAMBUCANA DE ÁGUAS E CLIMAS – APAC. Climatologia. *In*: APAC. **Precipitação média por município**. Disponível em: <
<https://www.apac.pe.gov.br/193-climatologia/521-climatologia-por-municipio>>
Acesso em: 15 mai. 2023.

ARAUJO, L. L. **Avaliação da dinâmica de áreas urbanas ocupadas por assentamentos irregulares utilizando visão estereoscópica por imagens anaglifo**. 2005. 120 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2005.

BENDIG, J. ; YU, K.; AASEN, H.; BOLTEN A.; BENNERTZ, S. BROSCHEIT, J.; GNYP M. L.; BARETH, G. Combining UAV-based plant height from crop surface models, visible, and near infrared vegetation indices for biomass monitoring in barley. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**. 39, p. 79–87, 2015

BRASIL. **Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012**. Novo Código Florestal. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa e dá outras providências. Disponível em:<
http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/L12651compilado.htm>
>Acesso em: 22 ago. 2022.

BRASIL. **Lei Federal nº 10.257, de 10 de julho de 2001**. Estatuto das Cidades. Regulamenta os arts. 182 e 183 da Constituição Federal, estabelece diretrizes gerais da política urbana e dá outras providências. Brasília, DF. Disponível em: <
http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/leis_2001/l10257.htm> Acesso em: 22 ago. 2022.

BRASIL. **Lei Federal Nº 6.766, de 19 de dezembro de 1979**. Dispõe sobre o Parcelamento do Solo Urbano e dá outras Providências. Brasília, DF.

BRASIL. **Portaria Nº 504, de 21 de setembro de 2020**. Institui o Programa Cidades+Verdes e o Cadastro Ambiental Urbano - CAU. Edição 182, Seção 1, p. 58. Brasília-DF: Ministério do meio ambiente, 2020.

BRASIL. **Decreto Nº 89.817 de 20 de Junho de 1984**. Normas Técnicas da Cartografia Nacional. Brazil. Brasília, Diário Oficial da União, 20 de junho de 1984.

BRASIL. **Lei nº 14.119, de 13 de janeiro de 2021.** Institui a Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais; e altera as Leis nos 8.212, de 24 de julho de 1991, 8.629, de 25 de fevereiro de 1993, e 6.015, de 31 de dezembro de 1973, para adequá-las à nova política.

BOWKER, D. E.; DAVIS, R. E.; MYRICK, D. L.; STACY, K.; JONES, W. T. **Spectral Reflectances of Natural Targets for Use in Remote Sensing Studies.** Hampton, 1985 (NASA REFERENCE PUBLICATION 1139).

BENDIG, J.; YU, K.; AASEN, H.; BOLTEN, A.; BENNERTZ, S.; BROSCHEIT, J.; GNYP, M.L.; BARETH, G. Combining UAV-based plant height from crop surface models, visible, and near infrared vegetation indices for biomass monitoring in barley. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation.** v. 39, p. 79-87, 2015.

CARVALHO FILHO, J. dos S. Regularização Fundiária: Direito Fundamental na Política Urbana. **Revista de Direito Administrativo**, [S. l.], v. 247, p. 139–155, 2008. Disponível em: <<https://bibliotecadigital.fgv.br/ojs/index.php/rda/article/view/41552>>. Acesso em: 25 abr. 2023.

CARMO, V. B. do.; REBOLLAR, P. B. M.; LOCH, C. Utilização de espaços verdes públicos no Planejamento municipal. *In*: Congresso Brasileiro De Cadastro Multifinalitário E Gestão Territorial, 12. 16-20 out de 2016, Florianópolis. **Anais Eletrônico** [...] Florianópolis: Cobrac, 2016. Disponível em: <<https://www.ocs.cobrac.ufsc.br/index.php/cobrac/cobrac2016/paper/view/295/63>>. Acesso em: 22 ago. 2022.

CIRILO, J. A.; ALVES, F. H. B.; SILVA, B. de M.; CAMPOS P. H. de A. Pernambuco Tridimensional: Base de dados espaciais para planejamento urbano e gestão territorial. *In*: Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Expressão Portuguesa, 12. 22-17 nov de 2015, Brasília. **Anais Eletrônico** [...] Brasília: SILUSBA, 2015. Disponível em: < <https://anais.abrhydro.org.br/job.php?Job=12751>> Acesso em: 18 mai. 2023.

CRÓSTA, A. P. **Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto.** ed. rev. Campinas: IG/UNICAMP, 2002. p.171.

DENT, B. D.; TORGUSON, J.; HODLER, T. **Cartography: Thematic Map Design.** 6 ed. New York: McGraw-Hill Company, 2009. p. 368.

DAMASCO, F. S. O Rural e o Urbano na delimitação e classificação dos setores censitários: a Base Territorial para o Censo 2020. *In*: Seminário: Rediscutindo o Rural e o urbano para Produção e Análise de Informações Estatísticas, 2018. Rio de Janeiro. **Resumos** [...]. Rio de Janeiro: IBGE, 2018. p.3. Disponível em: < <https://eventos.ibge.gov.br/sru2018/apresentacoes-e-resumos?id=457>>. Acesso em: 18 mai. 2023.

FALKOWSKI, M. J.; GESSLER, P. E.; MORGAN, P.; HUDAK, A. T.; SMITH, A. M. S. Characterizing and mapping forest fire fuels using ASTER imagery and gradient modeling. **Forest Ecol. Manage.**, v. 217, p. 129-146, 2005.

FITZ, Paulo Roberto. **Geoprocessamento sem complicação**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. p.160.

FILHO, O. M.; NETO, H. V. **Processamento digital de imagens**. Rio de Janeiro: Brasport, 1999. p.310.

FILHO, J. C. de A.; SILVA, A. B. da; SILVA, F. B. D. e; LEITE, A. P. Circular técnica, 10. Diagnóstico ambiental do município de Floresta, Pernambuco. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 2001. p.20. Disponível em: <
<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CNPS/11849/1/circulartecnica10diagambfloresta.pdf> > Acesso em: 15 mai. 2023.

FLORESTA (Município). **Lei nº 479/2012**. Institui o plano diretor do município de Floresta edá outras providências. Floresta, PE. Disponível em:
<<https://floresta.pe.gov.br/transparencia/legislacoes/item/lei?ementa=Institui+o+Plano+Diretor+do+Munic%C3%ADpio+de+Floresta> > Acesso em: 22 ago. 2022.

GHILANI, C. D.; WOLF, P. R. **Geomática**. 13. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2013. p.698.

HOWARD, E. **Cidades-Jardins de amanhã**. Tradução: Marco Aurélio Lagonego, Introdução: Dácio Araújo Benedito Otoni. São Paulo: Estudos Urbanos, Série Arte e Vida Urbana, Hucitec, 1996. p. 211.

HUNT Jr, E. R.; DORAISWAMY, P. C.; MCMURTREY, J. E.; DAUGHTRY, C. S.T.; PERRY, E. M. A visible band index for remote sensing leaf chlorophyll content at the canopy scale. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**. v.21, p.103–112, 2013.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Classificação e caracterização dos espaços rurais e urbanos do Brasil: uma primeira aproximação**. Rio de Janeiro: IBGE, 2017. p.83.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Introdução ao processamento digital de imagens**. Rio de Janeiro: IBGE, 2001. p.94. (Manuais técnicos em geociências, nº 9).

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Arranjos Populacionais e Concentrações Urbanas do Brasil**. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2016. p. 167.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Avaliação da qualidade de dados geoespaciais**. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2019. p.117. (Manuais Técnicos em Geociências, nº13).

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Mapa de clima do Brasil. Rio de Janeiro: IBGE, 2002. 1 mapa, color, 109 x 90 cm. Escala 1:

5.000.000. Disponível em: <

http://geofpt.ibge.gov.br/informacoes_ambientais/climatologia/mapas/brasil/Map_BR_clima_2002.pdf> Acesso em: 18 mai. 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Áreas urbanizadas do Brasil 2019**. Informativo. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. p.16.

Disponível em: <

https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101973_informativo.pdf> Acesso em: 15 mai. 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Portal das cidades. *In*: IBGE. **Floresta-PE**. 2023. Disponível em:

<<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pe/floresta/panorama>> Acesso em: 21 abr. 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Portal das cidades. *In*: IBGE. **Recife-PE**. 2023. Disponível em: <

<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pe/recife/panorama> > Acesso em: 15 mai. 2023.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. 2. ed. São José dos Campos, SP: Parêntese, 2011. p.598. (Prentice Hall series geographic information science.)

KRAAK, M.; ORMELING, F. **Cartography: visualization of geospatial data**. 3 ed. England: Pearson Education Limited, 2010.p. 249.

LOUHAICHI, M. L.; BORMAN, M. M.; JOHNSON, D. E. Spatially Located Platform and Aerial Photography for Documentation of Grazing Impacts on Wheat. **Geocarto International**, Hong Kong, v. 16, n. 1, p. 65-70, 2001.

LOBODA, C. R.; ANGELIS, B. L. D. de. Áreas verdes públicas urbanas: conceitos, usos e funções. **Ambiência**, v. 1, n. 1, p. 125-139, 2005. Disponível em:

<<https://revistas.unicentro.br/index.php/ambiencia/article/viewFile/157/185>> Acesso em: 15 mai. 2023.

LUSSEM, U.; BOLTEN, A.; GNYP, M.; JASPER, J.; BARETH, G. Evaluation of RGBBASED vegetation indices from UAV imagery to estimate forage yield in grassland. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**. v. 42-3, p. 1215-1219, 2018.

MAPBIOMAS. Brasil. *In*: MAPBIOMAS. **Estatísticas**. 2023. Disponível em:

<<https://mapbiomas.org/estatisticas>> Acesso em 15 mai. 2023.

MASCARENHAS, J. de C.; BELTRÃO, B. A.; JUNIOR, L. C. de S.; GALVÃO, M. J. da T. G.; PEREIRA, S. N.; MIRANDA, J. L. F. de. **Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea. Diagnóstico do município de Floresta, estado de Pernambuco**. Recife: CPRM/PRODEEM, 2005. p.28.

MATOS, J. L. de. **Fundamentos de informação geográfica**. 6. ed. Lisboa: Lidel, 2008. p. 405.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Programa Cidades+Verdes**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente: Secretaria de Qualidade Ambiental, 2021. E-Book. ISBN 978-65-88265-06-2. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/ptbr/assuntos/agendaambientalurbana/cidadesmaisverdes/programacidadesmaisverdes_vdefeso.pdf> Acesso em: 22 ago. 2022.

MOTOHKA, T.; NASAHARA, K. N.; OGUMA, H.; TSUCHIDA, S. Applicability of Green-Red Vegetation Index for Remote Sensing of Vegetation Phenology. **Remote Sensing**. v. 2, p. 2369-2387, 2010.

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T.; ROSA, A. N. C. S.; SANO, E. E.; SOUZA, E. B.; BAPTISTA, G. M. M.; BRITES, R. S. **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. Brasília: CNPQ, 2012. p.276.

MUÑOZ, J. M. S. Análisis de calidad cartográfica mediante el estudio de la matriz de confusión. **Pensamiento matemático**. v. 6. n. 2. p. 9-26, 2016.

ORTIGOZA, S. A. G. **Paisagens do consumo: São Paulo, Lisboa, Dubai e Seul**. Editora UNESP. São Paulo: Cultura Acadêmica, 2010. p. 232.

PERNAMBUCO TRIDIMENSIONAL. *In*: GOVERNO DO ESTADO DE PERNAMBUCO. **PE3D**. 2016. Disponível em: <<http://www.pe3d.pe.gov.br/>> Acesso em: 15 mai. 2023.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação**. São José dos Campos-SP: Parêntese editora, 2009. p.136.

QUEIROZ, G. R.; FERREIRA, K. R. **Tutorial sobre bancos de dados geográficos**. Geobrasil 2006. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2006.

RAMOS, A.P. M.; JUNIOR, J. M.; DECANINI, M. M. S.; E. A. PUGLIESI ; R. F. de OLIVEIRA; A. C. P. FILHO. Avaliação qualitativa e quantitativa de métodos de classificação de dados para o mapeamento coroplético. **Revista Brasileira de Cartografia**. Rio de Janeiro, 2016. n. 68/3, p. 609-629.

ROSA, R. **Introdução ao sensoriamento remoto**. Edufu, 1990. 7. ed. Uberlândia : EDUFU, 2009. p.264.

SILVA, M. L. da. **Classificação da cobertura do solo urbano utilizando imagens aéreas, produtos lidar, índices de vegetação e razão de bandas**. Orientador: Ana Lúcia Bezerra Candeias. 2020. 91 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação – Universidade Federal de Pernambuco. Recife. 2020.

SILVA, C.F.A. da; ANDRADE, M.O. de; MAIA, M.L.A.; SANTOS, A.M. dos; PORTIS, G.T. Remote Sensing for Identification of Trip Generating Territories in Support of Urban Mobility Planning and Monitoring. **GeoJournal**, 2022. p.107-119. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s10708-022-10595-7>> Acesso em: 10 mai. 2023.

SILVA, E. A. **Mapeamento do uso e cobertura vegetal do município de Floresta – PE**. Dissertação em Ciências Florestais. Orientador: Rinaldo Luiz Caraciolo Ferreira. 2011. 56 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Ciências Florestais - Universidade Federal Rural de Pernambuco. Recife, p.56. 2011

SLOCUM, T. A. **Thematic cartography and visualization**. New Jersey: Prentice Hall Press, 1999. p.293. ISBN 0132097761

SPOSITO, M. E. B. **Capitalismo e urbanização**. 15.ed. São Paulo : Contexto, 2005.

TENÓRIO, J. M. S.; CANDEIAS, A. L. B. Utilização dos índices GRVI, GLI e RGBVI no planejamento municipal de áreas verdes urbanas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CADASTROMULTIFINALITÁRIO E GESTÃO TERRITORIAL, 15. 7 – 9 de nov. de 2022, Florianópolis. **Anais Eletrônico** [...] Florianópolis – SC: Cobrac, 2022. p.10. Disponível em: < www.ocs.cobrac.ufsc.br/index.php/cobrac/cobrac2022/paper/view/947/384 > Acesso em: 11 mai. 2023.

TENÓRIO, J. M. S.; CANDEIAS, A. L. B. Classificação de áreas de app a partir dos índices GLI, GRVI e RGBVI em um trecho do Riacho do Navio-PE com imagem de alta resolução. In: XII Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas, 12. 2022, Curitiba. **Anais Eletrônico** [...] Curitiba: CBCG, 2022. v. 1. p. 439-440. Disponível em: < https://cbcg.ufpr.br/wp-content/uploads/2023/02/Anais-CBCG_SBG-2022-Versao-Final-Compactada.pdf > Acesso em: 18 mai. 2023.

TERRA, L.; COELHO, M. de A. **Geografia geral**. O espaço natural e socioeconômico. 5. ed. reform. e atual. São Paulo: Moderna, 2005. p.544.

TUCKER, C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. **Remote sensing of Environment**, 1979. v. 8, n. 2, p. 127-150.

TURNER, M. G.; GARDNER, R. H. **Landscape ecology in theory and practice. Pattern and process**. 2. ed. New York: Springer, 2015. p.482.

UZUNIAN, A.; BIRNER, E. **Biologia. Volume único**. São Paulo: Editora Harbra Ltda, 2001. p.790

