

Integration of Environmental Parameters in Multifont Images

Renato S. Albuquerque^{*}, João R. Tavares Junior^{**}, Ana Lúcia B. Candeias^{***}

^{*}Mestrando em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação pela Universidade Federal de Pernambuco, Avenida da Arquitetura, s/n - Cidade Universitária, Recife - PE, Brasil. Email: renatoengufcg@gmail.com

^{**}Professor do Departamento de Engenharia Cartográfica e Agrimensura, Universidade Federal de Pernambuco.

^{***}Professora do Departamento de Engenharia Cartográfica e Agrimensura, Universidade Federal de Pernambuco.

Received 1 March 2021; accepted 24 May 2021

Abstract

Remote Sensing has been widely used over the last decades by the rapid technological development of multispectral imaging sensors, in addition to innovative technological concepts for the development of models and methods that can explore and evaluate new forms of spatial data acquisition. In this context, this work aims to investigate LiDAR data integrated with CBERS-4 multispectral orbital images for the evaluation of a new index based on environmental parameters. To this end, the integrated use of LiDAR data on CBERS-4 images using altitude slicing with the physical indices NDVI, NDWI and NDBI and the development of a new index for better enforcement of environmental legislation were analyzed. As a result, the accuracy of the supervised land use and land cover classification by Kappa coefficient pointed (Good Quality), and the Global Accuracy index indicated 100% separability of targets for the images of the periods August 29th, 2019 and January 22th, 2015. In the development of the new environmental index, the mathematical formula based on the physical indices NDVI and NDBI, by the trial and error criterion of interval between -1 to +1 that met the needs of integration was the value zero (0), in logarithmic scale log₁₀. As a conclusion, the results confirm that it is possible, using altitude slicing with the physical indices NDVI and NDBI to analyze the integrated use of 3D LiDAR data on CBERS-4 orbital multispectral images to create a new physical environmental index.

Keywords: new environmental index, LiDAR data (ALS) PE 3D, NDVIAM, NDBIAM.

Integração de Parâmetros Ambientais em Imagens Multifontes

Resumo

O Sensoriamento Remoto passou a ser largamente utilizado ao longo das últimas décadas pelo rápido desenvolvimento tecnológico de sensores imageadores multifontes, além de inovadores conceitos tecnológicos para o desenvolvimento de modelos e métodos que possa explorar e avaliar novas formas de aquisição de dados espaciais. Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo investigar dados LiDAR integrados a imagens orbitais multiespectrais do CBERS-4 para avaliação de um novo índice com base em parâmetros ambientais. Para isso, foram analisadas o uso integrado de dados LiDAR em imagens do CBERS-4 usando fatiamento por altitudes com os índices físicos NDVI, NDWI e NDBI e o desenvolvimento de um novo índice para melhor aplicação da legislação ambiental. Como resultado, a acurácia da classificação supervisionada do uso e ocupação do solo pelo coeficiente Kappa apontou Boa Qualidade, e o índice de Exatidão Global indicou 100% de separabilidade dos alvos para as imagens dos períodos (29-08-2019 e 22-01-2015). No desenvolvimento do novo índice ambiental, a fórmula matemática baseada nos índices físicos NDVI e NDBI, pelo critério tentativa e erro de intervalo entre -1 a +1 que atendeu às necessidades de integração foi o valor zero (0), em escala logarítmica log₁₀. Como conclusão, os resultados confirmam que é possível, usando fatiamento por altitudes com os índices físicos NDVI e NDBI para analisar o uso integrado de dados LiDAR 3D em imagens multiespectrais orbitais CBERS-4 a criação de um novo índice físico ambiental.

Palavras-chave: novo índice ambiental, dados LiDAR (ALS) PE 3D, NDVIAM, NDBIAM.

1. Introdução

O Sensoriamento Remoto (SR) passou a ser largamente utilizado ao longo das últimas décadas pelo rápido desenvolvimento tecnológico de sensores imageadores multifontes embarcadas em plataformas aéreas e terrestres, além de inovadores conceitos tecnológicos para o desenvolvimento de modelos e métodos que possa explorar e avaliar novas formas de aquisição de dados espaciais.

Segundo Chen et al. (2018), mapeando a cobertura urbana de uma grande área usando múltiplos sensores vários recursos, corrobora que uma imagem de satélite multiespectral, com diferentes sensores, pode coletar e fornecer informações espectrais da superfície terrestre e discriminar as diferentes classes de uso e ocupação do solo em espaços urbanos. Uma das classificações utilizam assinatura espectral do alvo para ambientes urbanos, que de forma geral pode apresentar uma menor precisão usando desse tipo de classificação, em comparação, por exemplo, com outros ambientes florestais. Isso se deve ao fato de o ambiente urbano possuir maior heterogeneidade espectral e espacial dos mais variados materiais de superfície encontrado no espaço urbano.

Coutinho Filho (2015), os espaços urbanos com alta densidade de construção e intensidade verticalizada contribuem para o aumento dos efeitos microclimáticos negativos, como a modificação do relevo, redução da umidade relativa do ar, maior lançamento de partículas e gases na atmosfera, aumento do escoamento superficial, redução das áreas de infiltração, intensificação das ilhas de calor e acréscimo no consumo de energia, justificado pela diminuição de áreas verdes. Esses fatores, contribuem diretamente para diminuição da quantidade de serviços ecológicos, sua compensação e restabelecimento ao equilíbrio natural, afetando diretamente a qualidade ambiental.

A preocupação com as alterações produzidas pelo processo de urbanização na qualidade de vida das cidades, constituiu-se uma alerta para os gestores públicos na necessidade de planejamento, gerenciamento e organização do espaço urbano. Os problemas ambientais de grandes cidades são consequências da exploração predatória do homem com a natureza, intensificado em áreas com maior adensamento de ocupação urbana, deficiência no desenvolvimento de parâmetros e acompanhamento de indicadores para monitoramento ambiental.

Os parâmetros ambientais são desenvolvidos para homogeneizar, dentro da diversidade ambiental, os indicadores a serem monitorados. Nessa pesquisa, os parâmetros ambientais servem para definir os critérios que identifique e quantifique fatores ambientais. Os indicadores servem de orientação para monitorar a qualidade de vida, acompanhar impactos

espaciais e temporais a partir de alterações nos parâmetros ambientais, durante um período e sobre uma área em particular. Com o monitoramento dos parâmetros ambientais é possível avaliar valores de intensidades resultantes de alguma ação antrópica e comparar com valores ideais considerando ausência de intervenções humanas (Gonçalves, 2017).

No monitoramento ambiental, é importante observar a escala em que as informações das imagens da área de estudo estão disponíveis. A escala é uma relação de proporções entre uma representação gráfica e a superfície terrestre na realidade. Segundo Egels e Kasser (2002) é impossível, em uma imagem digital, distinguir detalhes menores que o tamanho do pixel. Assim, a resolução espacial é a mínima separação entre dois objetos representados, distintos e separados (Sabins, 1997). Considerando o erro gráfico correspondente a cerca de 0.2mm, a escala máxima de uma imagem é dada pela resolução do pixel da imagem dividido por 0,0002m.

A utilização de diferentes sensores ou sensores acoplados ao mesmo sistema pode obter variedades de dados e informações com diferentes resoluções espaciais, espectrais e radiométricas.

A combinação de dados LiDAR em imagens multiespectrais foram identificados em estudos que se dedicam a classificação de uso e ocupação do solo, para melhorar o desempenho e compensar as deficiências um do outro (Rapinel et al., 2015; Morsy et al., 2017; Luo et al., 2018; Wu et al., 2018; Chen et al., 2018).

Para esta pesquisa, foram realizados levantamentos em plataforma editoriais de periódicos científicos, tais como, MDPI, Elsevier, Google Scholar, Bibliotecas Digital de Tese e Dissertação da UFPE, UFCG, UEPB e USP para identificar obras científicas que utilizam da integração de informações espaciais de dados LiDAR em imagens orbitais multiespectrais CBERS-4, em especial no Brasil, o que indicou ausência de trabalhos dedicadas à extração destas informações para exploração de parâmetros e índices ambientais e os efeitos na precisão da classificação, principalmente na área urbana.

A combinação destes resultados pode, em tese, auxiliar e definir novos parâmetros ambientais estabelecidos no novo código florestal e no plano de uso e ocupação do solo para áreas urbanas do Recife-PE, de forma a orientar gestores públicos para compor futuros planos diretores municipais, desenvolvimento de políticas públicas mais eficazes, planejamento do uso e ocupação do solo urbano e monitoramento da qualidade ambiental.

Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo investigar dados LiDAR integrados a imagens orbitais multiespectrais em uma região da cidade do Recife no Estado do Pernambuco para

avaliação de um novo índice com base em parâmetros ambientais. Para isso, foram analisadas o uso integrado de dados LiDAR em imagens do CBERS-4 usando fatiamento por altitudes com os índices físicos NDVI, NDWI e NDBI e o desenvolvimento de um novo índice para melhor aplicação da legislação ambiental.

2. Materiais e métodos

Caracterização da área de estudo

A área de estudo está inserida na RMR no Estado de Pernambuco, entre os municípios de Jaboatão dos Guararapes e Recife, tendo o Oceano Atlântico ao leste. No Sistema Geodésico de Referência (SGR), SIRGAS 2000, zone 25 S,

localizada entre as coordenadas de latitude Sul 08°04'13,40" e 08°10'33,27" e entre as coordenadas de longitude Oeste 34°57'43,50" e 34°52'56,10" destacam-se, além da área urbanizada, o Aeroporto Internacional do Recife/Guararapes - Gilberto Freyre, Parque dos Manguezais, Parque Histórico Nacional dos Guararapes, Corpos hídricos, regiões de planícies, encostas, topos de morros e escarpas.

A escolha pela área de estudo levou em consideração espaços totalmente urbanizados com diferentes tipos de construções, áreas de vegetações densas, regiões de maiores declividades, corpos hídricos, zonas úmidas de mangues e todas as cenas do satélite CBERS-4 verificadas para obter aquela com menor interferência de nuvens sobre o objeto de estudo (Figura 1).

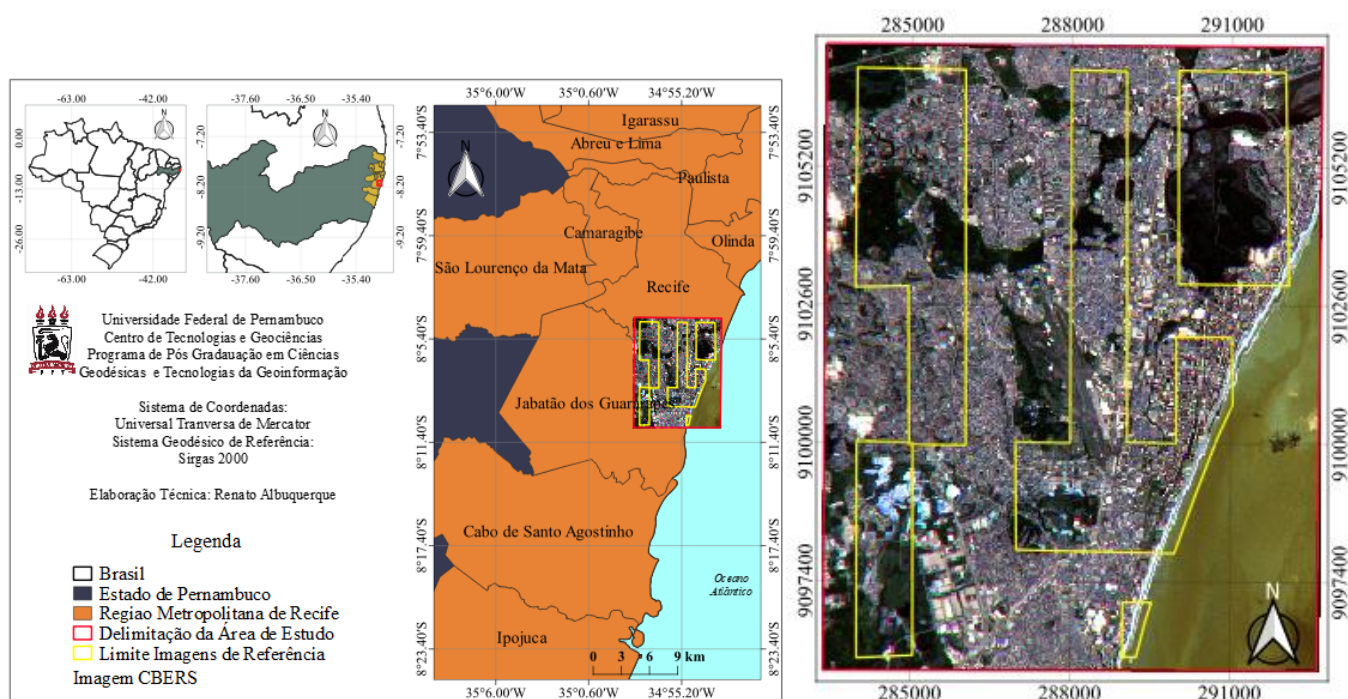


Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo abrangendo os municípios de Jaboatão dos Guararapes e Recife, Pernambuco.

Procedimento Metodológicos

Para realização desta pesquisa, foram utilizados recursos tecnológicos de hardware: Notebook Acer, processador Intel® Core™ i3-7021U CPU@ 2.30GHz, 4,00 GB RAM, DDR4 + HDD 1T, Sistema Operacional 64 bits Windows 10. Quanto ao conjunto de softwares utilizados: QGIS Desktop 3.4.15 e Microsoft Office 365 Word, Excel;

Os procedimentos metodológicos estão divididos em duas partes. A primeira parte (Figura 2) é dedicada a aquisição, tratamento, processamento e geração de índices físicos, que está dividido em oito etapas. A segunda parte (Figura 3) é dedicado ao tratamento, processamento e geração do novo índice ambiental, sendo dividido em dez etapas.

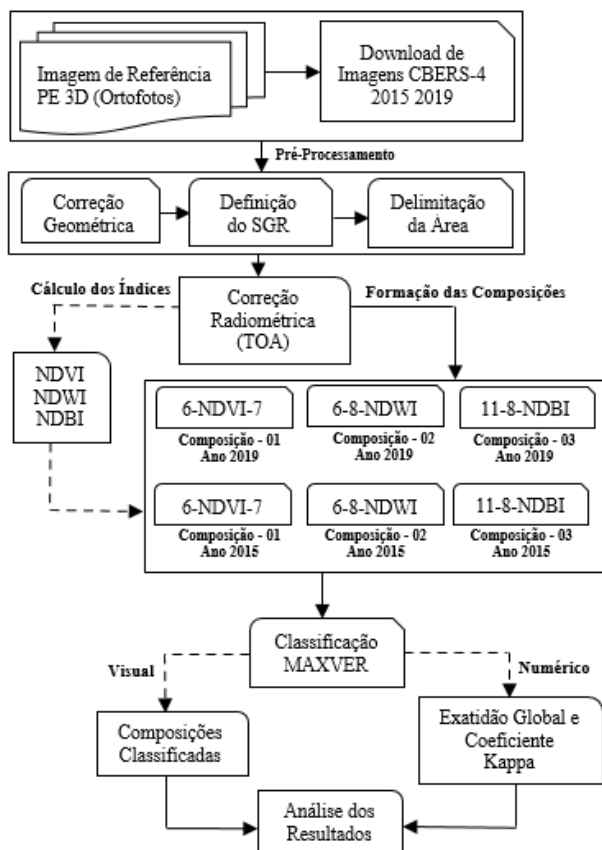


Figura 2 – Fluxograma metodológico da primeira parte do trabalho.

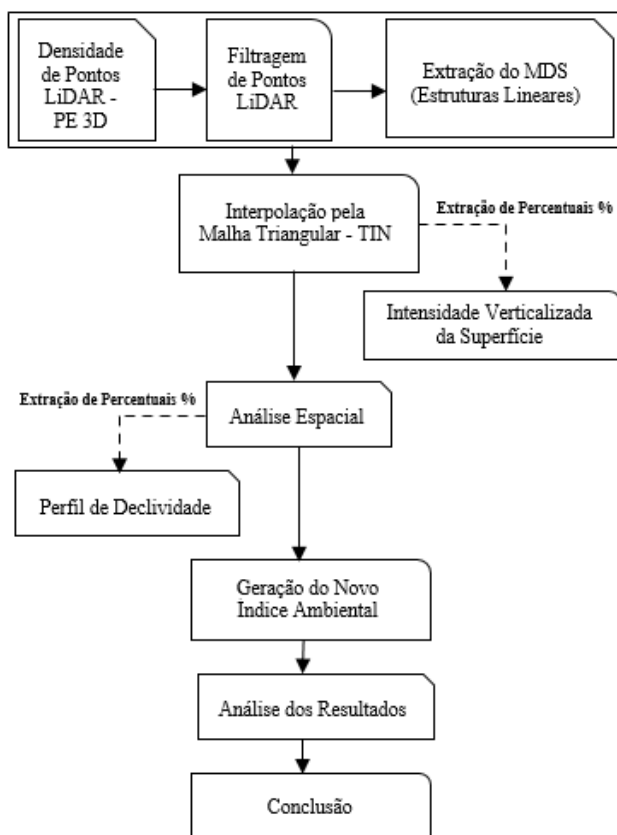


Figura 3 – Fluxograma metodológico da segunda parte do trabalho.

Aquisição, Tratamento, Processamento das Imagens e geração de índices Físicos

A primeira fonte de dados da pesquisa foram as ortofotos digitais com escala 1:400, ano 2015, que integram o Programa Pernambuco Tridimensional (PE 3D), obtido junto à Secretaria de Desenvolvimento Econômico do Estado de Pernambuco (SDEC-PE). As ortofotos estão no Sistema de Coordenadas Projetadas UTM SIRGAS 2000 zone 25 S, formato ECW, nas composições RGB (8 bits) e resolução espacial de 8 centímetros ou 0,08 metros. A área de estudo conta com 41 imagens de referência que serviram como orientação para obtenção e tratamento das imagens CBERS-4.

O segundo grupo de imagens, trata-se de imagens multiespectrais do satélite CBERS-4, sensor Regular *Multispectral Camera* (MUX) e *Multispectral and Thermal Imager Camera* (IRS), órbita 146, ponto 109. O período de aquisição das cenas do CBERS-4 foram 22/01/2015 e 29/08/2019, possuindo as mínimas interferências de nuvens. No formato Geotiff e composição RGB (8 bits), as imagens possuem resolução espectral de 4 bandas para o sensor (MUX e IRS) e, resolução espacial de 20 m. No caso do sensor IRS as bandas Pancromática (PAN) e Infravermelho de Ondas Curtas (SWIR) tem resolução espacial de 40 m.

A partir das ortoimagens do PE 3D com correção geométrica e coordenadas projetadas no Sistema de Referência de Coordenadas, SIRGAS 2000, UTM zone 25 S, as imagens CBERS-4 foram selecionadas, corrigidas geometricamente (georreferenciadas) por meio da interpretação visual com o auxílio do *Google Earth*, reprojetadas, antes no Datum: SRC WGS 1984 para o SRC UTM SIRGAS 2000 zone 25 Sul (sistema oficial do Brasil) e processadas. Para realização de download das imagens gratuitas do CBERS-4 é necessário possuir cadastro no site do INPE (INPE, 2021).

O limite da área de estudo foi redefinido (recorte do limite das áreas de interesse) para áreas específicas, tais como: espaços urbanizados, vegetação com maiores densidades, solos expostos, áreas úmidas (manguezais), encostas (declividade), topos de morros e escarpas, com objetivo de atender os parâmetros ambientais definidos no Quadro 3.

Os índices espectrais físicos NDVI, NDWI e NDBI em refletância espectral, pela calibração radiométrica, foram gerados e em seguida definidas as composições coloridas, permitindo, localizar, identificar e qualificar de forma visual e numérica os alvos de interesse presentes na superfície terrestre.

As imagens orbitais geralmente representam apenas números digitais adimensionais em formato matricial, assim, a calibração radiométrica tem como objetivo principal converter os números digitais das

imagens em radiância, reflectância ou temperatura (Ponzoni et al., 2015).

Nessa pesquisa os índices espectrais foram calculados pela reflectância no topo da atmosfera (do inglês, *Top of Atmosphere Reflectance* - ToA Reflectance).

$$L_{\lambda} = \frac{L_{max} - L_{min}}{ND_{max}} * (DN) + L_{min} \quad (1)$$

$$\rho_{\lambda} = \frac{\pi \left(\frac{L_{max} - L_{min}}{ND_{max}} \right) (ND) + L_{min}}{E_{\lambda} \cdot \cos(z) \cdot d} \quad (2)$$

As equações 1 e 2 representam o cálculo da Reflectância (ρ_{λ}) [$W / (m^2 * sr * \mu m)$] para cada banda espectral. A expressão, π representa a constante matemática, L_{λ} a radiância espectral [$W / (m^2 * sr * \mu m)$], " d " representa a distância sequencial do ano Sol-Terra em unidades astronômicas [UA], $\cos(z)$ corresponde ao ângulo zenital solar [rad] e DN o nível digital do pixel de cada imagem. E_{λ} , representa a irradiância solar exoatmosférica média no topo da atmosfera [$W / (m^2 * \mu m)$].

O dia " d ", equação 3, é o quadrado da razão entre a distância média Terra-Sol e a distância Terra-Sol em um dia sequencial do ano (DSA) que, de

acordo com (Iqbal, 1983 *apud* Galvêncio et al., 2010), é dada por:

$$d = 1 + 0,033 * \cos(DSA * 2 * \frac{\pi}{365}) \quad (3)$$

Para as imagens do CBERS-4, os parâmetros radiométricos estão ilustrados no Quadro 1. Tais parâmetros foram utilizadas de acordo com a calibração radiométrica encontrada no documento de (Chandler, 2007; Ponzoni e Epiphanyo, 2012). A distância sequencial do ano Sol-Terra e o ângulo zenital solar são variáveis em função do tempo, que mudam de acordo com a data de obtenção de cada imagem. O ângulo de elevação solar, podem ser identificados nos metadados ao fazer o download das imagens.

A *Top of Atmosphere Reflectance* (TOA) da banda onze (B11), foram obtidas através do *Solar Radiation and Climate Experiment* (SORCE), no conjunto de dados *Total Solar Irradiance* SORCE - *Daily average* (LISIRD, 2020). A banda (B11) do CBERS-4, refere ao intervalo espectral (2,08 - 2,35 μm) do *Short Wave Infrared* (SWIR), necessário para o cálculo do NDBI. A média do ângulo de elevação solar $\cos(z)$, das bandas espectrais devem ser utilizadas para o cálculo da reflectância.

Quadro 1 – Principais características dos sensores imageadores da imagem CBERS-4.

Câmera Multiespectral Regular (MUX) CBERS-4. Data da aquisição das imagens: 29/08/2019						
Bandas	$\Delta\lambda$: Intervalo espectral (μm)	<i>LMIN</i> : Rad. Mín. (W/m2.sr. μm)	<i>LMAX</i> : Rad. Máx. W/m2.sr. μm	<i>E</i> : Irradiância solar estratosférica média (TOA) (W/m ² . Mm)	<i>Z</i> : Ângulo de elevação solar	Órbita-ponto:
B05	0,45 a 0,52	35,3	344,4	1958	56.6327	146/109
B06	0,52 a 0,59	25,7	361,8	1852	56.6392	
B07	0,63 a 0,69	12,9	352,3	1559	56.6456	
B08	0,77 a 0,89	8,9	275,0	1091	56.6521	
B11	2,08 a 2,35	1,8	18,5	1360,6505	56.6388	
Câmera Multiespectral Regular (MUX) CBERS-4. Data da aquisição das imagens: 22/10/2015						
Bandas	$\Delta\lambda$ Intervalo espectral (μm)	<i>LMIN</i> Rad. Mín. (W/m2.sr. μm)	<i>LMAX</i> : Rad. Máx. W/m2.sr. μm	<i>E</i> : Irradiância solar estratosférica média (TOA) (W/m ² . Mm)	<i>Z</i> : Ângulo de elevação solar	Órbita-ponto:
B06	0,52 a 0,59	25,7	361,8	1852	71.7891	146/109
B07	0,63 a 0,69	12,9	352,3	1559	71.7887	
B08	0,77 a 0,89	8,9	275,0	1091	71.7884	
B11	2,08 a 2,35	1,8	18,5	1361,461	71.7905	

Fonte: Adaptado de Ponzoni e Epiphanyo (2012) e Pinto (2016).

Conforme apresentado no Quadro 1, $\Delta\lambda$ refere-se ao intervalo espectral (μm) para cada banda. LMIN e LMAX é a radiância espectral máxima e mínima [$W / (m^2 * sr * \mu m)$]. A letra E, representa a irradiância solar estratosférica média no topo da atmosfera [$W /$

($m^2 * \mu m$)], e a letra Z corresponde ao ângulo zenital solar [rad].

Os índices espectrais do CBERS-4 foram calculados após a realização da calibração radiométrica para cada banda espectral, conforme observada no Quadro 2.

Quadro 2 – Cálculo dos Índices espectrais do CBERS-4.

CBERS-4	
MUX	$NDVI = \frac{\rho\text{Banda8} - \rho\text{Banda7}}{\rho\text{Banda8} + \rho\text{Banda7}}$
MUX	$NDWI = \frac{\rho\text{Banda6} - \rho\text{Banda8}}{\rho\text{Banda6} + \rho\text{Banda8}}$
MUX e IRS	$NDBI = \frac{\rho\text{Banda11} - \rho\text{Banda8}}{\rho\text{Banda11} + \rho\text{Banda8}}$

Fonte: Adaptado de Rouse et al. (1973), Gao (1996) e Jensen (2009).

Na classificação de uso e ocupação do solo para imagens CBERS-4 foram utilizados o método paramétrico de classificação supervisionada Máximo Verossimilhança (MAXVER). Essa técnica de classificação é realizada pelo *Semi-Automatic Classification Plugin* (SCP) do QGIS, no qual, se baseia na identificação de diferentes classes que apresente comportamentos espectrais diferenciados. É um treinamento de classificação que o analista determina com base em áreas de classes conhecida e a partir destes pixels são extraídas determinadas

características que serão usados para a classificação dos demais pixel (INPE, 2018). Em seguida, o coeficiente Kappa, recomendado por Rosenfield e Fitzpatrick-Lins (1986), esse parâmetro utiliza todas as células da matriz de erro, e não apenas os elementos da diagonal, possuindo intervalo (0 - 1) com concordância nula (0) e concordância perfeita (1). Por fim, a Exatidão Global (EG) Chuviecco (1995), por relacionar os elementos da diagonal principal da matriz de confusão pelo número total de pontos de validação em uma escala que varia de 0 a 100%. As equações 4 e 5, são aplicados para verificar a acurácia dos resultados.

$$K = \frac{P_o - P_e}{1 - P_e} \quad (4)$$

$$EG = \frac{\sum_{xii}}{\sum \sum_{xii}} * 100 \quad (5)$$

Os parâmetros ambientais foram adaptados das obras de Coutinho Filho (2015), Gonçalves (2017) e Albuquerque (2017). Sendo, definidos e estruturados no Quadro 3, para integração de dados LiDAR em imagens multifontes.

Quadro 3 - Estruturação dos parâmetros ambientais.

Dimensões	Temas	Parâmetros
Ambiental	Vegetação	Densidade da Vegetação
	Vegetação e Lâmina D'Água	Áreas Úmidas
	Corpos Hídricos	Áreas Ocupada por Espelho D'Água
	Uso e Ocupação do Solo	Proporção de Áreas Impermeáveis
		Solo Exposto
		Intensidade Verticalizada da Superfície (altimetria)
	Topografia do Terreno	Intensidades de Declividade

Fonte: Adaptado de Coutinho Filho (2015), Gonçalves (2017) e Albuquerque (2017).

Tratamento, Processamento dos Dados LiDAR e geração do Novo índice Ambiental

Os dados shapefile do (MDS) foram obtidos junto a Secretaria de Desenvolvimento Econômico do Estado de Pernambuco, por meio de ofício redigido pelo professor Dr. João Rodrigues Tavares do departamento de Engenharia Cartográfica e como coordenador do Laboratório de Sensoriamento Remoto - LASENSO da UFPE.

Uma nova área de estudo foi definida, levando em considerações as disponibilidades de dados do MDS pela SDEC-PE, elevações altimétricas do terreno, tempo de processamento e análise dos resultados.

Nessa fase, definiu-se a quantidade de 2794 estruturas lineares vetoriais para gerar a interpolação pela malha irregular triangular – TIN. No processo de interpolação pela caixa de ferramenta de

processamento -TIN do QGIS, a resolução espacial do pixel das ortoimagens do PE 3D que é de 0,08m x 0,08m foi definido para 20m x 20m, no qual corresponde a resolução espacial da imagem CBERS-4.

Na ferramenta do QGIS (análise, declive, declividade expressa em porcentagem ao invés de graus) foram extraídas as declividades expressas em porcentagem da imagem interpolada pela Malha Irregular Triangular 20m x 20m do MDS para analisar as Intensidades Verticalizadas da Superfície. Em seguida, pela ferramenta (raster, extrair, contornos) foram geradas curvas de níveis (CN) de 10 metros para analisar as elevações. Criou-se o perfil A-B e C-D (camada, criar nova camada, nova camada shapefile, geometria, linha) e a extração dos pontos de intersecção entre a (CN) e a linha do perfil (vetor, intersecções de linha). As distâncias de um

ponto e outro foram obtidas pela ferramenta (medir), para a criação dos perfis de declividade.

Para avaliar regiões de maior ou menor declividade, realizou-se uma análise espacial, pelo método da distância, exemplificado na Figura 4. A partir de dois pontos (A-B), cria-se uma linha ligando um ponto a outro, a interseção entre a linha e as curvas de níveis com suas coordenadas, distâncias e elevações conhecidas é possível obter as taxas de declividades de uma seção.

A fórmula matemática é dada pela equação 6:

$$\delta = \left[\frac{\Delta h}{\Delta H} \right] * 100 \quad (6)$$

Onde: δ é a declividade, Δh é a diferença de elevação A-B (equidistância vertical), ΔH distancia horizontal entre o ponto A-B. Para cada seção, entre as curvas de níveis, a declividade é conhecida pelo cálculo entre a distância e a elevação de um ponto e outro. Por exemplo, se a seção analisada for de 100 metros e a declividade apresentar percentual de 20%, significa que a cada 100 metros percorrido a taxa de declividade é de 20 metros.

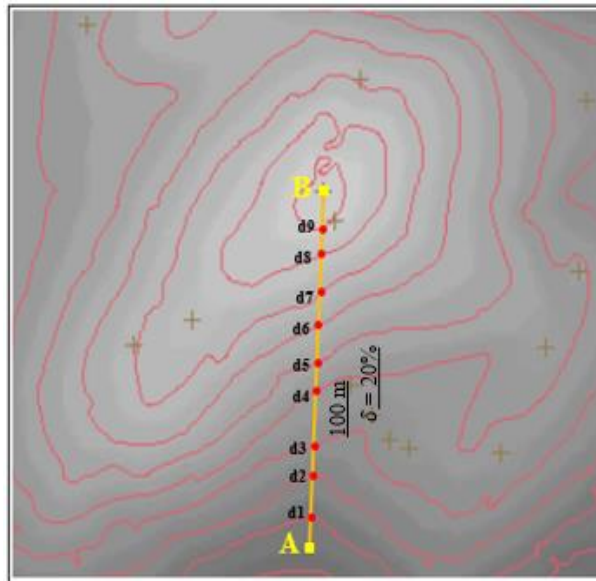


Figura 4 – Análise espacial pelo método da distância. Fonte: Adaptado do INPE (2018).

Para a criação do Novo Índice Ambiental, utilizamos os índices NDVI e NDBI ano 2015 e 2019. A banda onze (B11) do CBERS-4 que corresponde ao comprimento de ondas (infravermelho de ondas curtas – SWIR) possui resolução espacial de 40 metros e as demais bandas 20 metros de resolução. Nesse sentido, foi necessário fazer a reamostragem dos pixels das imagens de 40 metros para 20 metros, padronizando a resolução espacial do índice NDBI com o índice NDVI.

A fórmula matemática para geração do novo índice ambiental é baseada nos índices físicos NDVI, NDWI e NDBI, pelo critério tentativa e erro de intervalo entre -1 a +1. Por exemplo, no NDVI (equação 7), qualquer valor (n) dentro do intervalo e que atenda às necessidades de integração em escala linear, logarítmica ou exponencial pode ser reescrita da seguinte forma:

$$NDVIAM = (n) \pm \left[\frac{\rho_{Banda8} - \rho_{Banda7}}{\rho_{Banda8} + \rho_{Banda7}} \right] \quad (7)$$

Onde: NDVIAM, novo índice ambiental.

Supondo que um pixel do índice físico NDVI (Gráfico 1), possua 50% de reflectância, com coordenadas planimétricas (N1; E1) e elevação (h) de 10 metros. Nesse caso associa o gpixel, a reflectância, a altitude. Portanto, 50% de reflectância é observado para aquele pixel que possui 10 metros de altitude. Nesse sentido, compreende-se quanto maior for a altitude e suas declividades, menos acessível será a região do processo de ocupação urbana, assim, o pixel ganha cor escura (valor do índice alto), afirmando que os pixels com aquela tonalidade indicam um índice ambiental ruim.

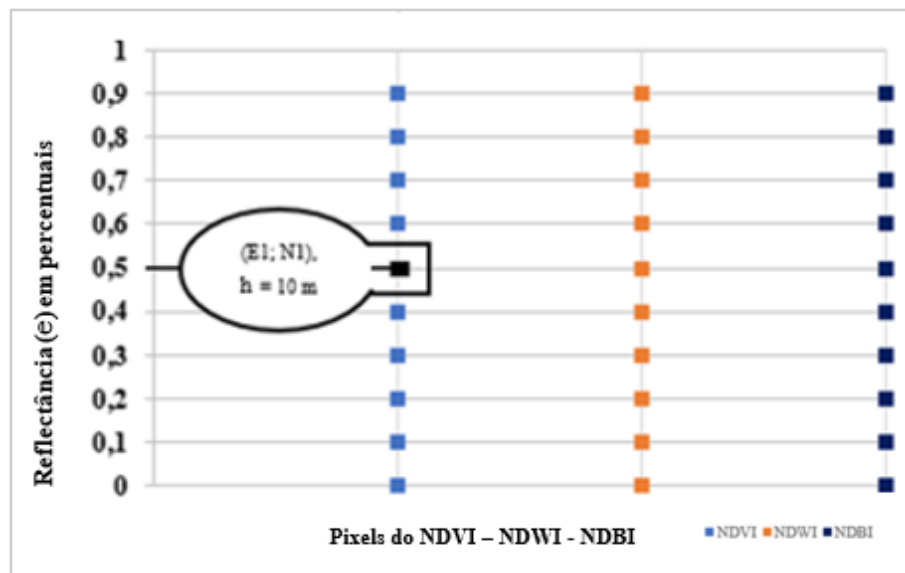


Gráfico 1 – Integração de dados LiDAR com Índices Físicos de Imagens Multiespectrais do CBERS-4.

3. Resultados e discussão

A Figura 5 para o período (29-08-2019) mostra a imagem em composição colorida RGB para os índices NDVI, NDWI e NDBI. As composições foram obtidas após a calibração radiométrica de todas as bandas, calculados pela *Top of Atmosphere Reflectance* (TOA). Na mistura espectral linear das bandas, são analisadas todas as possíveis combinações RGB e definidas pelo operador as composições que melhor destacam a separação entre os alvos de interesse.

Na observação do NDVI para separabilidade dos alvos, a imagem 6-NDVI-7 destacou-se as áreas de vegetações, isso se deve ao fato de que os valores mais altos de pixels são observados em regiões que tenham algum tipo de cobertura vegetal. Conforme Rouse et al. (1973), os valores de NDVI são praticamente altos com valores de substratos mais escuros variando no intervalo de -1 a +1. Identificou-se nessa composição, destaque para o solo exposto (solo sem cobertura vegetal, escarpas, bancos de areia, linha de costa), apesar de se confundir com os alvos de coberturas de ginásios de esportes, de shoppings e aeroporto. No índice NDWI, a imagem 6-8-NDWI destacou a vegetação e corpos hídricos, que possuem os dois valores mais altos de pixels. Estabelecido por GAO (1996), o NDWI tem a finalidade de detectar águas superficiais em ambientes de zonas úmidas e permitir a medição da extensão da água superficial. Para o NDBI, a imagem

11-8-NDBI separou com melhor destaque, áreas urbanas e a vegetação dos demais alvos. O resultado do NDBI, é uma imagem que contém pixels de áreas construídas e estêreis que apresentem valores mais elevados variando no intervalo -1 e +1, as demais classes de cobertura da superfície terrestre apresenta valores menores (Jensen, 2009; Feng et al., 2019; Yang et al., 2020).

Na Figura 6, período (22-01-2015), a imagem 6-NDVI-7 destacou as áreas de vegetações. O solo exposto se confundiu com nuvens, coberturas de ginásios de esportes, de shoppings e aeroporto. Esses alvos são semelhantes em intensidade de energia. Os níveis de energia refletida, emitida ou retro espalhada que deixa a superfície do alvo apresenta diferenças de intensidade que são detectadas e registradas pelo sensor (Novo, 2008). No índice NDWI, a imagem 6-8-NDWI destacou áreas de corpos hídricos e vegetação. No NDBI, a imagem 11-8-NDBI separou com melhor destaque as áreas urbanas.

Nessa pesquisa para classificação do uso e cobertura do solo foram definidas seis classes “Vegetação”, “Corpos Hídricos”, “Áreas Úmidas (mangues)”, “Solo Exposto”, “Urbano (áreas construídas)” e “Outros (são pixels *unclassified*)”, ou seja, o software não reconhecer e não insere esses pixels em uma das classes, pelo método MAXVER. Os mapas de uso e ocupação do solo estão apresentados nas Figuras 7 e 8.

As imagens CBERS-4 das Figuras 5, 6, 7 e 8 estão na escala máxima de 1:1000000.

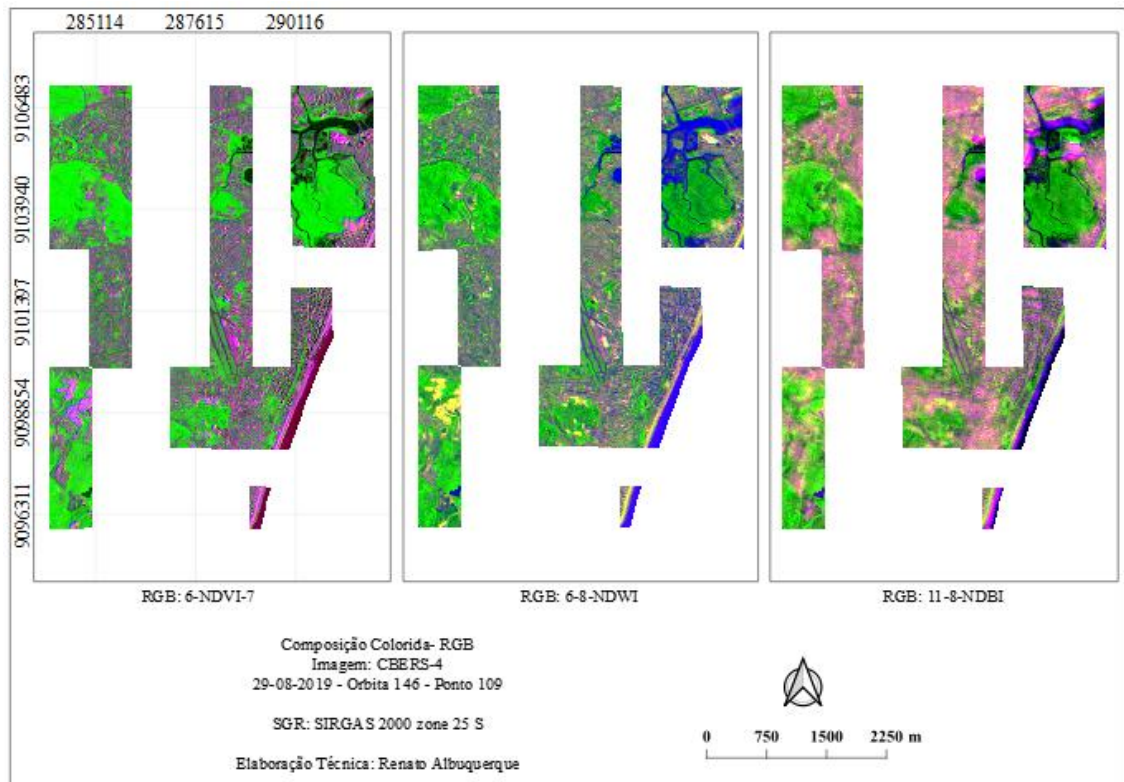


Figura 5 – Composição RGB para os índices NDVI, NDWI e NDBI em 28 de agosto de 2019.

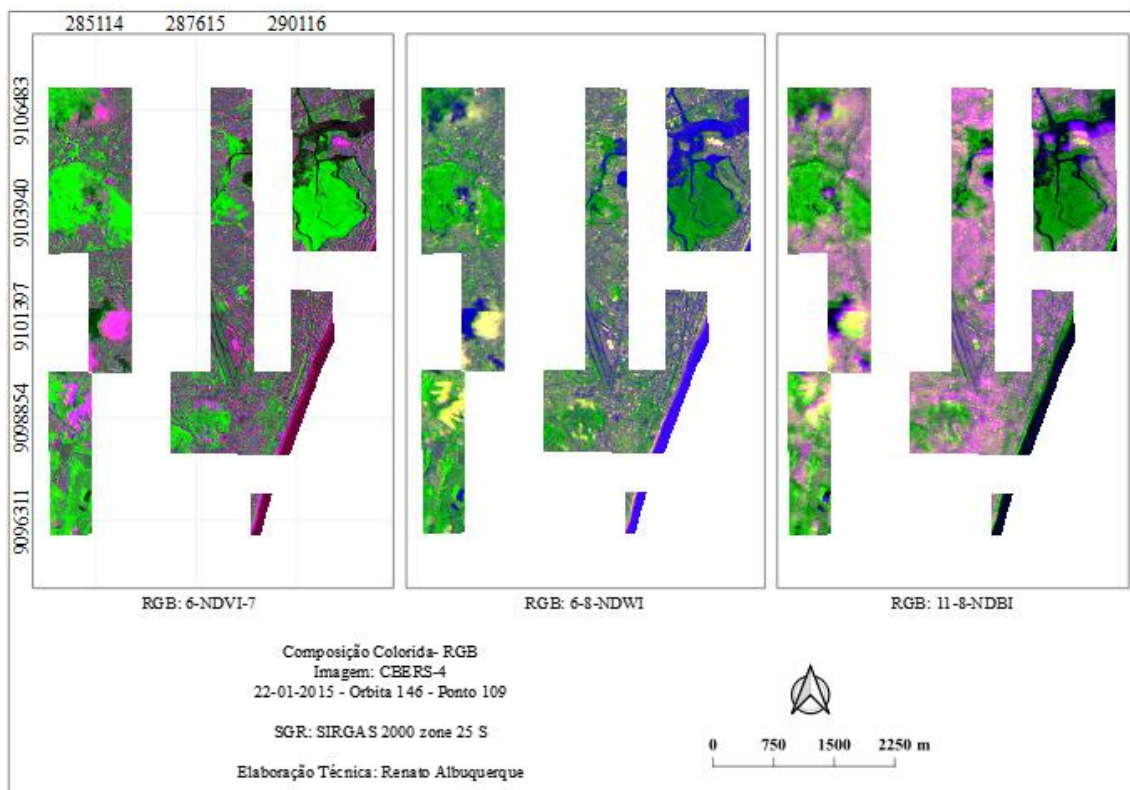


Figura 6 – Composição RGB para os índices NDVI, NDWI e NDBI em 22 de janeiro de 2015.

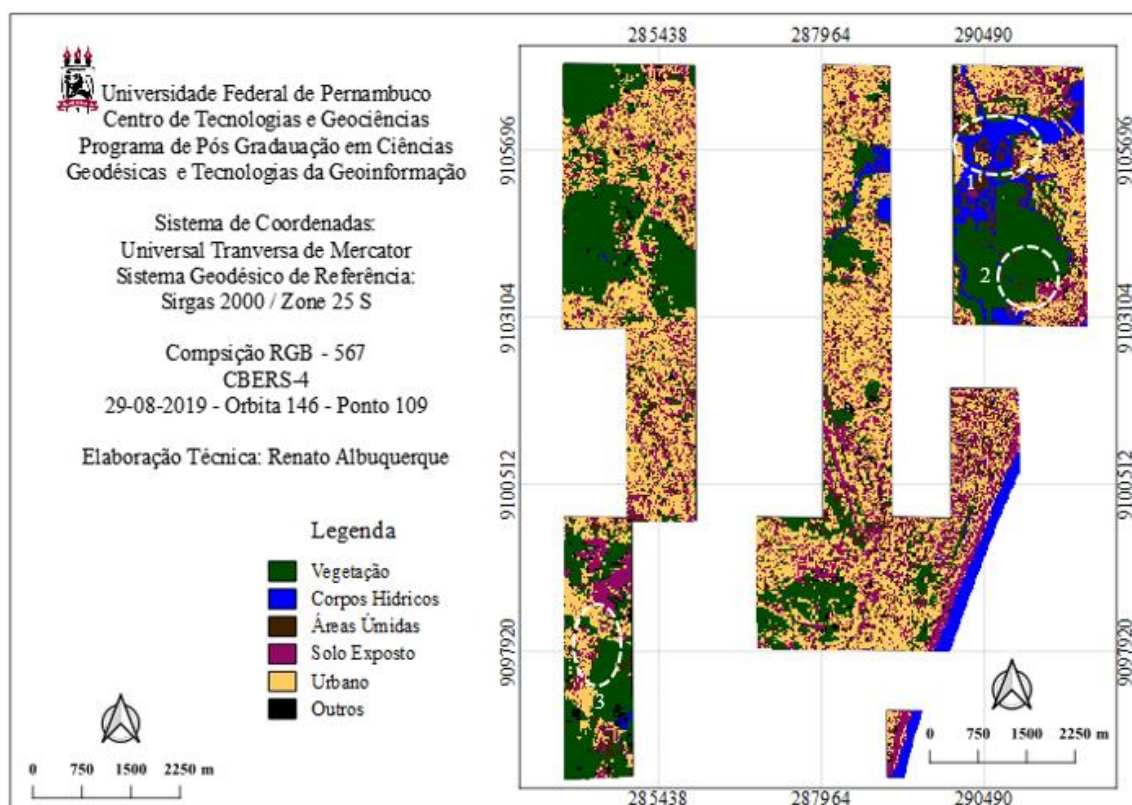


Figura 7 – Mapa de Uso e Ocupação do Solo em 28 de agosto de 2019.

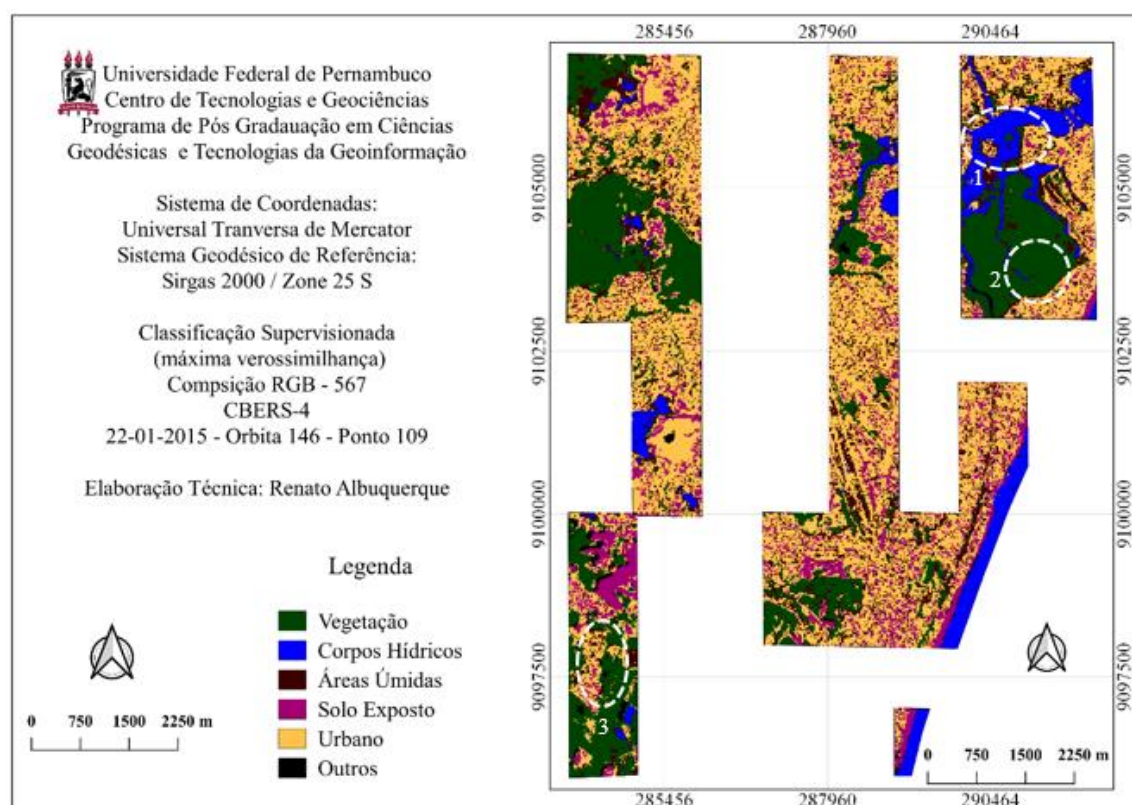


Figura 8 – Mapa de Uso e Ocupação do Solo em 22 de janeiro de 2015.

A classe “Corpos Hídricos” abrange complexo estuarino dos rios Capibaribe, Jordão, Pina e Tejió, parte do oceano atlântico, além de alguns lagos e lagoas. Para as “Áreas Úmidas”, a classificação buscou por regiões que apresentassem

indícios de mangues. Na classe, “Solo Exposto”, são as regiões com ausência de cobertura vegetal, escarpas, pedreiras, estirâncios e bermas. No “Urbano”, buscou-se por todas as áreas impermeáveis, como calçamentos, aglomerados com

a presença de concreto e processo de construção urbana dos mais variados seguimentos.

Para garantir o fiel resultado e a consistência dos dados, foram realizados 8 testes, 50 amostras para cada classe e os coeficientes Kappa e EG analisados para o classificador MAXVER. A acurácia da classificação supervisionada pelo coeficiente Kappa apontou Boa Qualidade para as imagens no período (29-08-2019 e 22-01-2015) e o índice de Exatidão Global (EG) indicou 100% de separabilidade dos alvos na classificação.

Na Tabela 1, estão apresentadas as áreas de uso e ocupação do solo. A classe “Urbano” com 42,759% e “Vegetação” 26,761% detém as maiores áreas. Estes percentuais se justificam pôr a região de estudo apresentar forte presença de espaços urbanos e de áreas de proteção ambiental, como o Parque dos Manguezais. A menor área ficou com a classe “Solo Exposto” 14,630% e “Outros” 1,285%.

As áreas de uso e ocupação do solo apresentadas na Tabela 2, indica as maiores áreas para a classe “Urbano” 41,359% e “Vegetação” 24,497%. A menor área é observada para a “Corpos Hídricos” 7,336% e “Outros” 2,444%. O classificador MAXVER associou as sombras, provocadas por nuvens e pelas intensidades verticalizadas das construções na classe “Corpos Hídricos”, devido a diferença de intensidade de energia e às características espectrais desses alvos se assemelharem ente se, o que aumenta o percentual total de sua área.

Tabela 1 – Áreas e percentuais das classes de Uso e Ocupação do Solo, CBERS-4, em 29.08.2019.

Classes	Área (Km²)	%
Vegetação	10,873	26,761
Corpos Hídricos	2,367	5,826
Áreas Úmidas	3,551	8,740
Solo Exposto	5,944	14,630
Urbano	17,373	42,759
Outros	0,522	1,285
Total	40,63	100

Tabela 2 – Áreas e percentuais das classes de Uso e Ocupação do Solo, CBERS-4, em 22.01.2015.

Classes	Área (Km²)	%
Vegetação	9,953	24,497
Corpos Hídricos	2,981	7,336
Áreas Úmidas	5,073	12,485
Solo Exposto	4,826	11,878
Urbano	16,804	41,359
Outros	0,993	2,444
Total	40,63	100

Análise dos Mapas de Uso e Ocupação do Solo

Considerando as Tabelas 1 e 2, o espaço urbano se expandiu 1,40%. Nesse mesmo período, observa-se aumento de área de cobertura vegetal em 2,224%. Os percentuais de área dos corpos hídricos para as imagens 29-08-2019 e 22-01-2015 foram 5,826% e 7,336% respectivamente, com algumas variações, porque deve-se levar em consideração os efeitos das marés, a época chuvosa do ano e a presença de nuvens.

Para a imagem 29-08-2019 é observada, fim do período chuvoso, possivelmente não está sobre efeito das marés e não tem interferência de nuvens. A imagem adquirida 22-01-2015, encontra-se fora do período chuvoso, possível influência das marés e interferência de algumas nuvens.

Os percentuais de áreas úmidas (mangues) apresentam redução em 3,745% para a imagem 29-08-2019. Essas áreas, mesmo protegidas por legislações ambientais e pertencentes a reservas ecológicas, como por exemplo, o Parque dos Manguezais, difícil acesso e sob fortes efeitos das marés, vem sofrendo intensificada ação do homem, em especial pelo acelerado processo de expansão urbana.

Por fim, os percentuais de solo exposto com 14,630% para imagem 29-08-2019 e 11,878% para imagem 22-01-2015, justificado pelo forte avanço de construções urbanas, com por exemplo, shoppings, loteamentos, ruas, casas, avenidas, estacionamentos, que acaba provocando nessas áreas, total impermeabilidade do solo.

Os destaques 1, 2 e 3 em comparação com as Figuras 7 e 8, são observados de forma visual e indica avanço de ocupação do espaço urbano em áreas que deveriam ser preservadas ambientalmente. Esses ecossistemas se destacam por apresentarem riquezas de diversidade de suas faunas e floras com a presença de mangues, florestas de mata atlântica, rios, lagos ou lagoas naturais, regiões de maior declividades e topos de morro que abriga inúmeras espécies de animais e plantas.

Análise da Área de Estudo e do Novo Índice Ambiental

A nova área de estudo (Figura 9), foi definida considerando a disponibilidade de dados do Modelo Digital de Superfície - MDS pela Secretaria de Desenvolvimento Econômico – SDEC/PE, elevações altimétricas do terreno, tempo de processamento e análise dos resultados para integração de parâmetros ambientais em imagens multifontes e o desenvolvimento do novo índice ambiental.

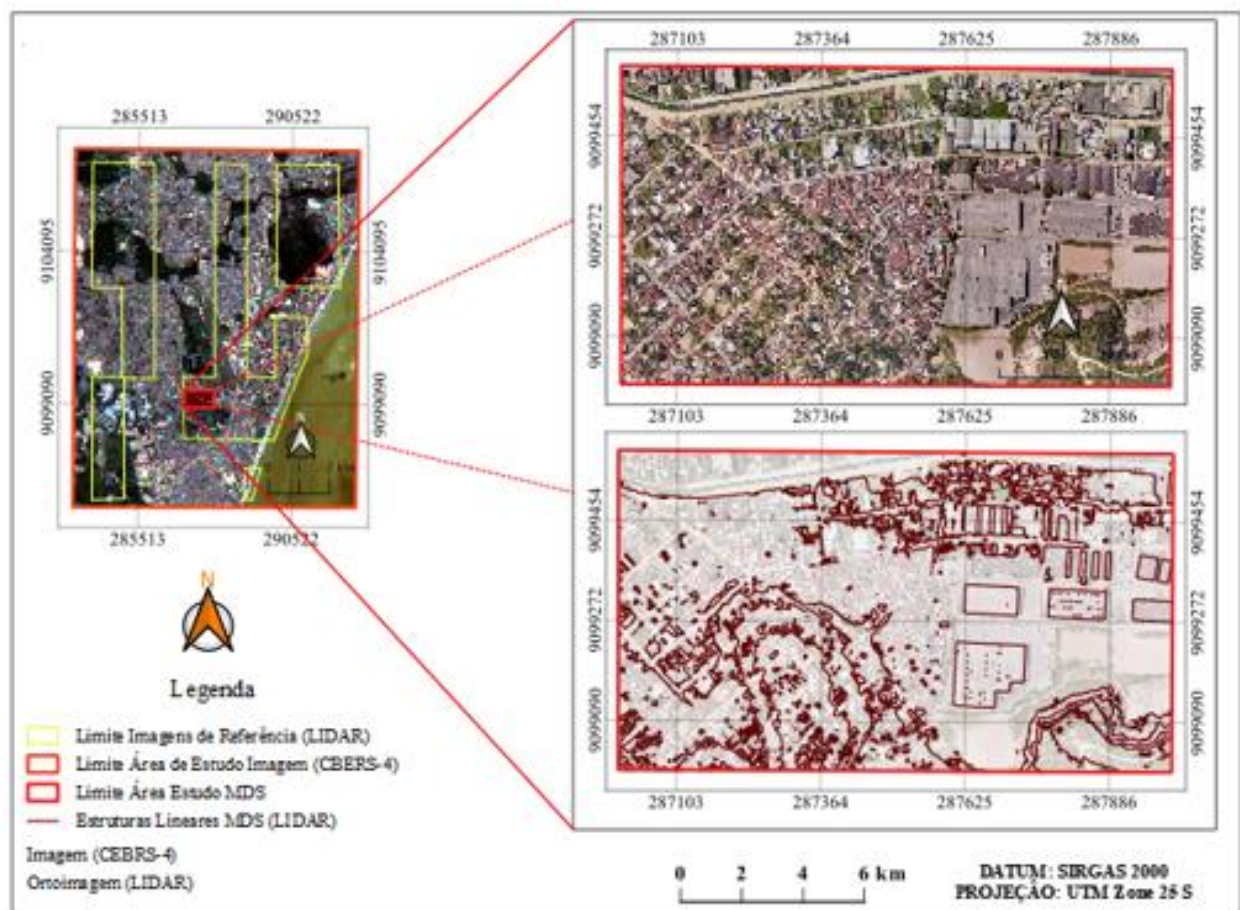


Figura 9 – Nova Área de Estudo com o MDS.

Na interpolação espacial, que consiste no processo de utilização de pontos com valores conhecidos para estimar os valores de outros desconhecidos, utilizamos a interpolação pelo método TIN. Esse algoritmo, também chamado de *Triangulação Delaunay*, conforme Mitas e Mitasova (1999) cria uma superfície formada por triângulos (rede de triângulos conectadas) a partir de pontos vizinhos mais próximos, não sobrepostos e mais compactos possíveis. Pelo método da interpolação TIN as superfícies não são suaves e podem apresentar uma aparência denteada. Isso é causado por inclinações ou declives descontínuos nas bordas do triângulo e pontos amostrais (QGIS, 2020).

Na extração das Curvas de Níveis – CN, foram analisadas CN de 1m, 5m e 10m. As CNs de 10m de elevação, melhor representaram os limites altimétricos de superfície na imagem interpolada do MDS. A elevação altimétrica das CNs, observado na Figura 10, apresenta valores de 10m, 20m, 30m, 40m, 50 e 60m por se tratar de uma região litorânea,

próximo a referência altimétrica de valor zero, que no caso, é o nível médio dos mares prolongados nos continentes.

A criação dos perfis (A-B e C-D) permite compreender o perfil de superfície da área de estudo dessa pesquisa e identificar a taxa de declividade de uma seção pela análise espacial (distância), observados nos Gráficos 2 e 3.

A intensidade verticalizada do modelo digital de superfície, na Figura 11, indica a intensidade percentual das edificações verticalizadas, altura da vegetação e a declividade altimétrica. Os pixels com 40% de intensidade são observados para regiões que contém grande porte de vegetação, cujo altura pode chegar a 30 m e edificações que possuem as maiores alturas. Conforme o percentual de intensidade das estruturas verticalizadas de construções e de vegetações se aproximam de pixels com 0%, são observados as menores alturas e baixa declividade. Os pixels com 0% de intensidade verticalizada é o Modelo Digital do Terreno – MDT.

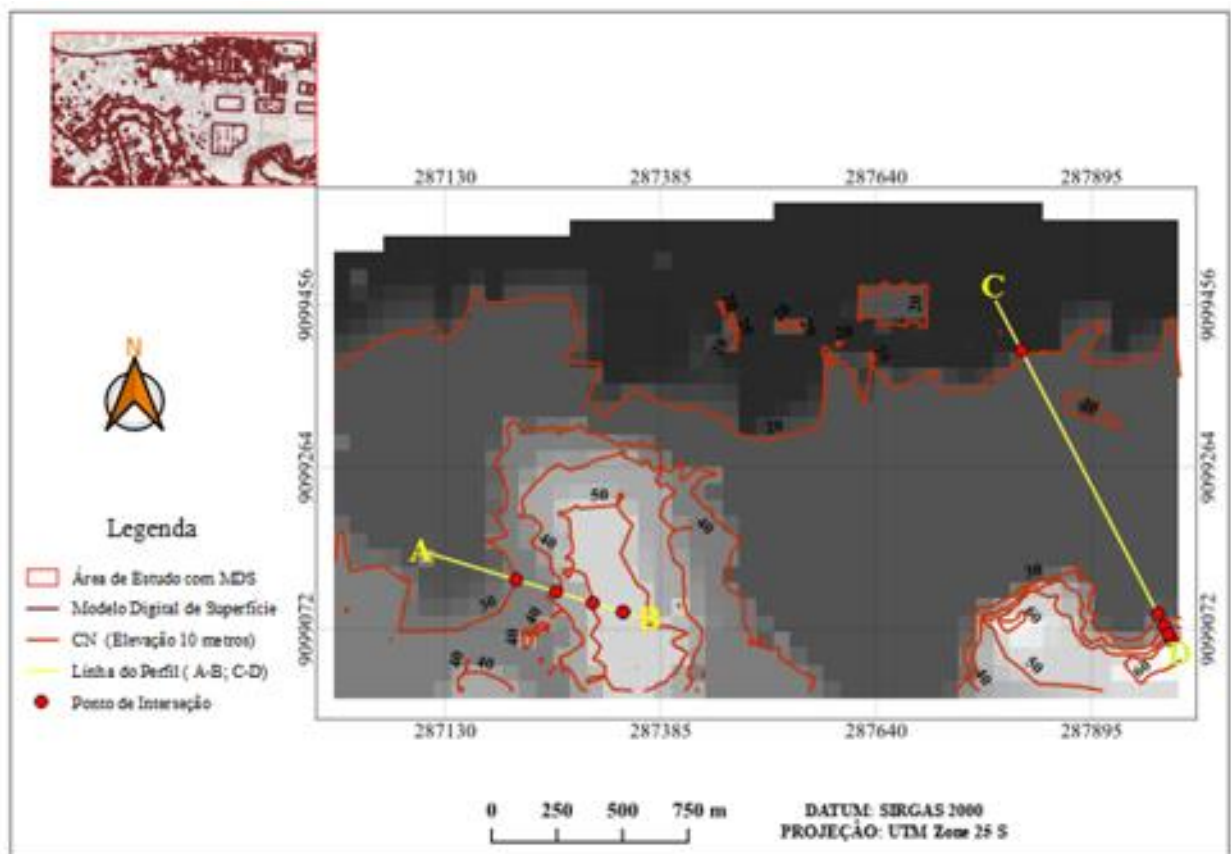


Figura 10 – Interpolação do MDS e Perfís de Declividade Percentual.

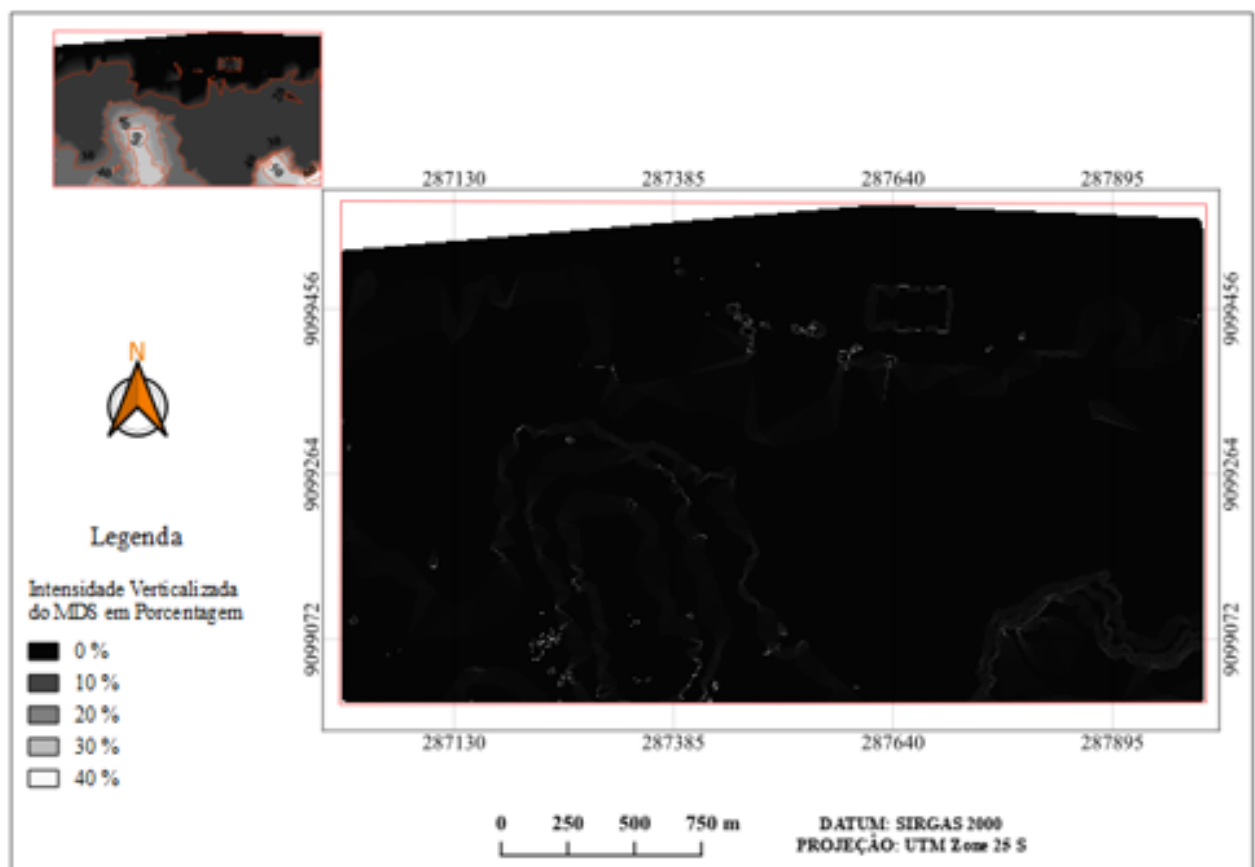


Figura 11 – Intensidade Verticalizada de Superfície do MDS.

O perfil de declividade (A-B), possuem 4 pontos de interseção entre as CNs de 30 m, 40 m, 50 m e 60 m com coordenadas planimétricas E e N conhecidas e a distância entre um ponto e outro calculados, Tabela 3. No Gráfico 2, para uma distância de 49,461 metros a taxa de declividade da seção é de 20,218%, ou seja, ao percorrer essa distância, obteve-se 20,218 metros de elevação. A declividade para os próximos pontos, 22,084% distância 45,282 metros e 26,596% distância 37,599 metros, indica aumento da declividade e redução das distâncias, ou seja, a declividade tende a aumentar quando as distâncias diminuem. Nessas regiões, é observado aglomerados de comunidades com difícil acesso para o uso ocupação do espaço urbano.

O perfil de declividade (C-D), Gráfico 3, possuem cinco pontos de interseção entre as CNs de 20 m, 30 m, 40 m, 50 m e 60 m. Para uma distância de 351,458 metros a taxa de declividade da seção é de apenas 2,845%, ou seja, ao percorrer essa distância, obteve-se 2,845 metros de elevação. As distâncias diminuem e a declividade aumenta consideravelmente, chegando a 130,531% para uma distância de 7,661 m. Nesse perfil, é observado proximidade das CNs, declividades acentuadas acima de 100%, difícil acesso para o uso e ocupação do espaço urbano e regiões passíveis de proteção ambiental, conforme o Novo Código Florestal Lei Federal Nº 12.651/2012, Art. 4º, inciso V.

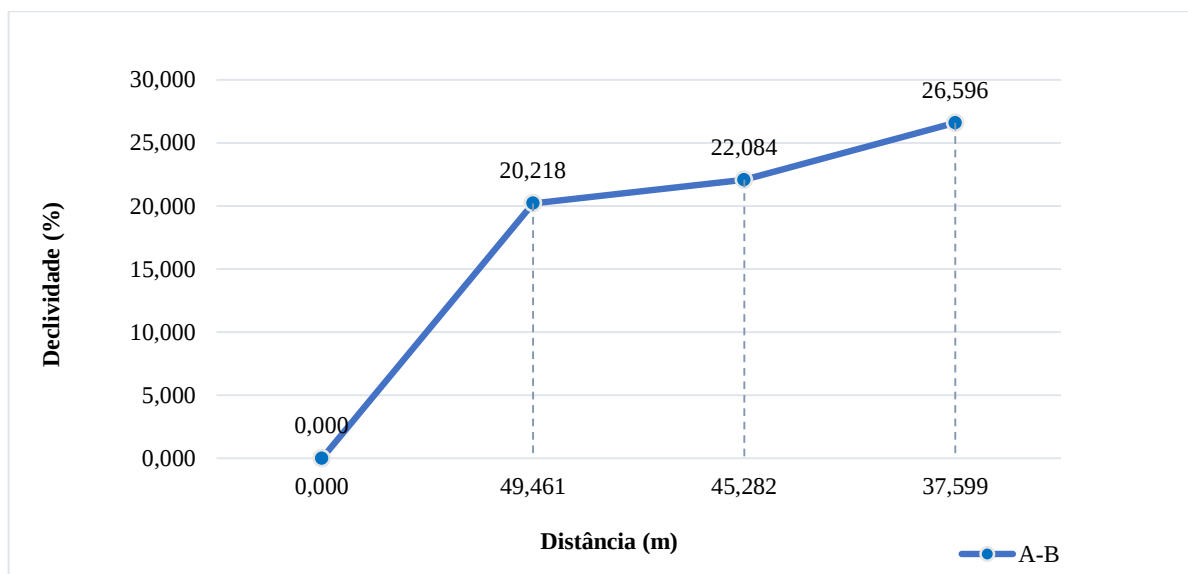


Gráfico 2 – Perfil de Declividade (A-B).

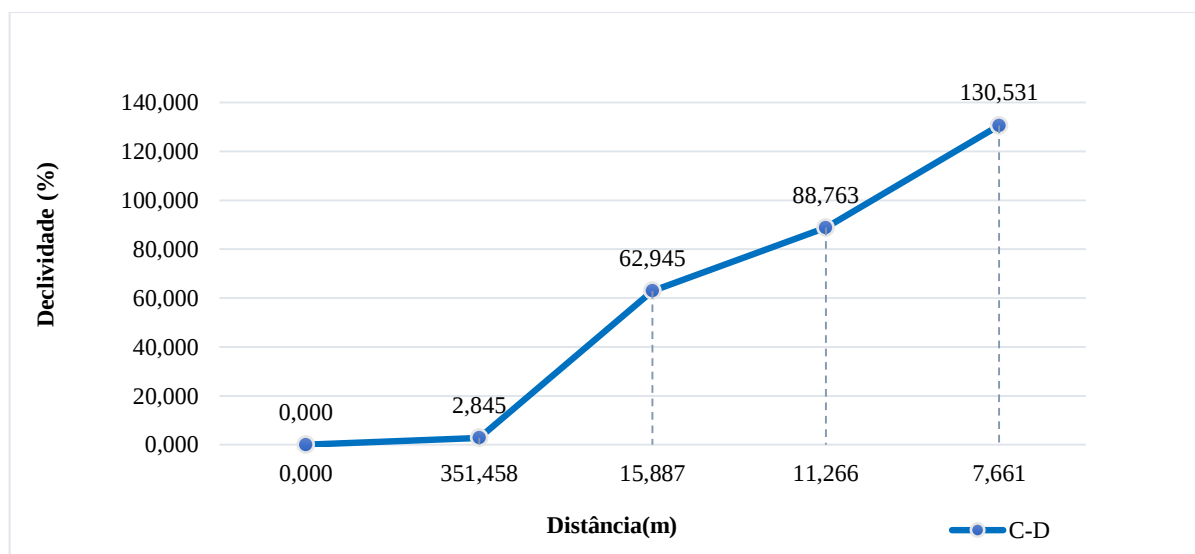


Gráfico 3 – Perfil de Declividade (C-D).

Tabela 3 - Estrutura dos perfis de declividade (A-B e C-D).

Perfil	ID_Ponto	E (m)	N (m)	Elevação	Distância	δ %
A-B	1	287214,170	9099131,237	30	0,000	0,000
	2	287261,505	9099116,892	40	49,461	20,218
	3	287304,841	9099103,760	50	45,282	22,084
	4	287340,824	9099092,855	60	37,599	26,596
C-D	6	287812,296	9099402,584	20	0,000	0,000
	7	287974,159	9099090,618	30	351,458	2,845
	8	287981,476	9099076,516	40	15,887	62,945
	9	287986,664	9099066,516	50	11,266	88,763
	10	287990,192	9099059,716	60	7,661	130,531

A integração de dados LiDAR 3D em imagens multiespectrais orbitais CBERS-4, escalas máximas 1:400 e 1:100000 respectivamente e usando fatiamento por altitudes com o índice físico NDVI são apresentados nas Figuras 12 e 13. As CNs que contém os dados altimétricos são sobrepostas na imagem CBERS-4 que contém dados planimétricos. A fórmula matemática para geração do novo índice ambiental, baseada nos índices físicos NDVI e NDBI, pelo critério tentativa e erro de intervalo entre -1 a +1 que atendeu às necessidades de integração foi o valor zero (0), em escala logarítmica na base 10, de acordo com a equação 8.

$$NDVIAM = (0) \pm \log_{10} \left[\frac{\rho_{Banda8} - \rho_{Banda7}}{\rho_{Banda8} + \rho_{Banda7}} \right] \quad (8)$$

Onde: NDVIAM, é o índice ambiental.

A criação do valor NDVIAM pela escala logarítmica $\log_{10}$, todos os pixels da imagem (NDVI 2015 e NDVI 2019) que contém os índices de vegetação, são transformados em pixels com valores de reflectância em percentual variando em intervalo de 9%. Os pixels com reflectância > 37%, > 28% < 37% e CNs de elevação 60m, 50m, 40m e 30m indicam um índice ambiental ruim, valor do índice alto. Nessas regiões, com base no NDVI, é observado as maiores declividades superficiais, forte presença de áreas arborizadas e menor acessibilidade ao processo de ocupação urbana. Os novos índices ambientais passam a ser definidos como, NDVIAM 2015 e NDVIAM 2019, referente as imagens adquiridas no período 29-08-2019 e 22-01-2015.

A desvantagem encontrada na criação do novo índice ambiental, pela escala logarítmica $\log_{10}$,

é devido aos pixels com valores negativos na origem do NDVI, NDWI e NDBI, ao ser transformados pela equação 7, não assumirem valores (sem valor ou sem informações) de dados. Nesse sentido, observado a ausência de corpos hídricos na área de estudo e que, todos os seus pixels assumiram valores negativos, não foi possível a criação do novo índice ambiental e análises para o índice físico NDWI nessa pesquisa.

Na criação do valor NDBIAM, todos os pixels do NDBI 2015 e NDBI 2019 apresentam informações e valores de dados completos. A ocorrência de pixels com valores negativos pode prejudicar a análise e criação do novo índice ambiental na área de estudo, devido a fórmula matemática na equação 7 não assumir valores negativos. No entanto, para essa pesquisa, não identificamos alterações significativas que pudesse comprometer a análise dos resultados para os novos índices ambientais.

No NDBIAM os pixels com valores de reflectância percentual, obteve variação em intervalo de 5%. Os pixels com reflectância > 30%, > 25% < 30% e CNs de elevação 40m, 30m e 20m indicam um índice ambiental ruim, valor do índice alto, sendo as regiões, com base no NDBI, menos acessíveis para deslocamento pessoal, possuem variadas intensidades verticalizadas de construções, aglomerados com intensidade de concretos armados, impermeabilidade do solo, áreas com instabilidade de encostas reforçado de polímero plástico para evitar deslizamentos, presença de fábricas com seus pátios pavimentados e declividades acentuadas de superfícies urbanas. Os novos índices ambientais passam a ser definidos como, NDBIAM 2015 e NDBIAM 2019, conforme Figuras 14 e 15.

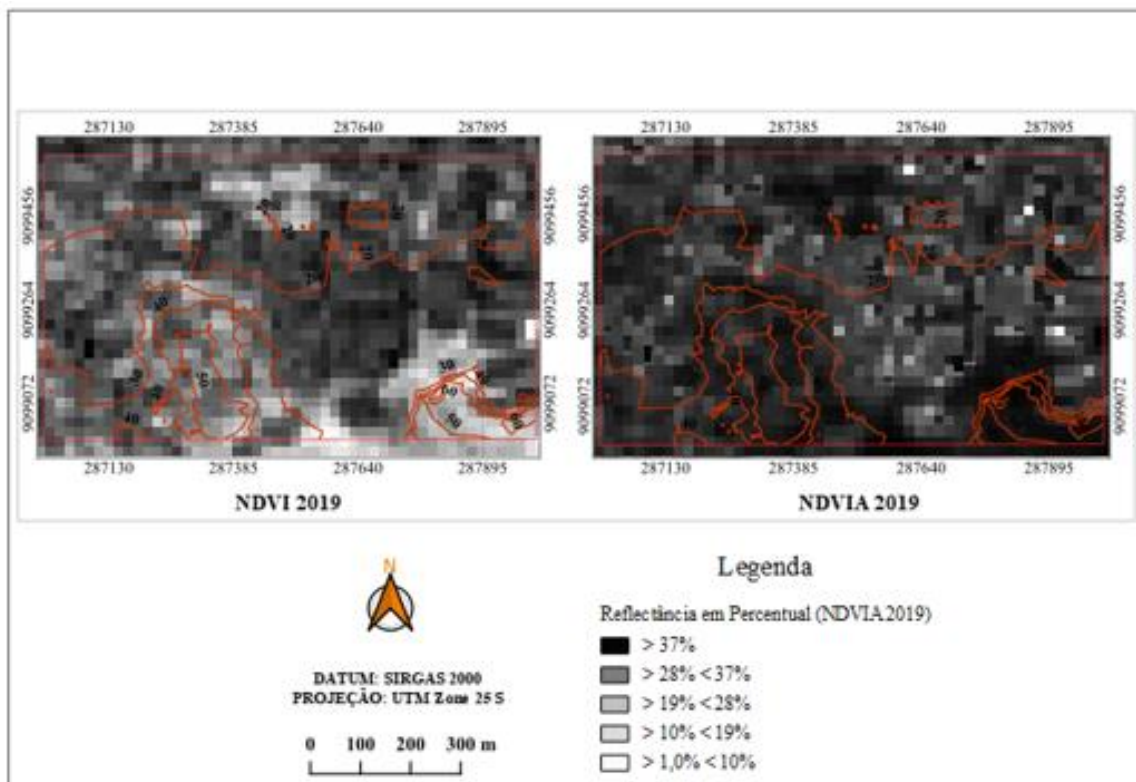


Figura 12 – Novo Índice Ambiental NDVIAM 2019.

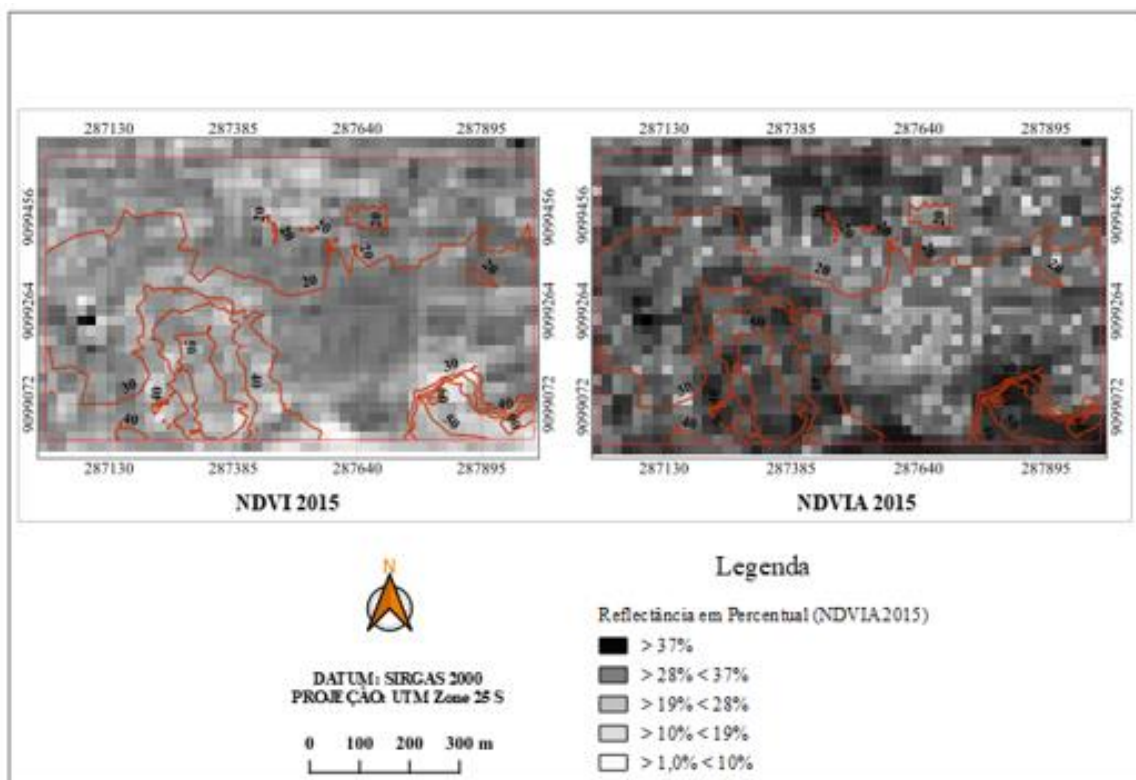


Figura 13 – Novo Índice Ambiental NDVIAM 2015.

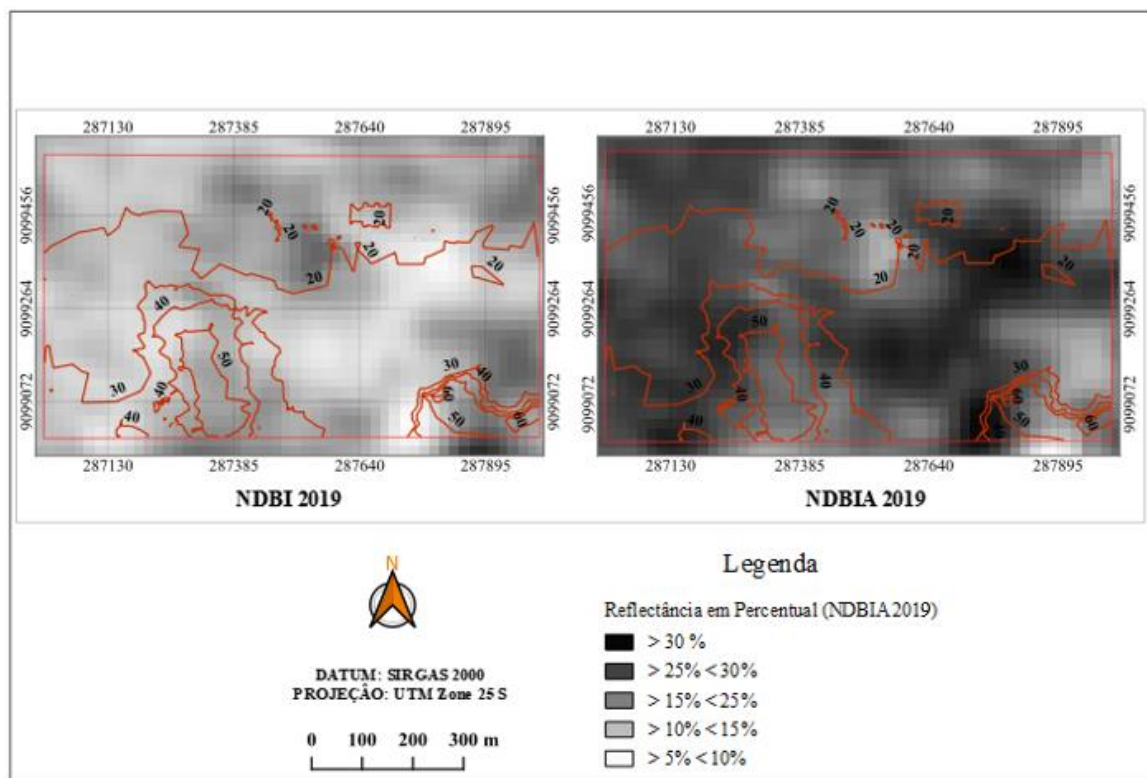


Figura 14 – Novo Índice Ambiental NDBIAM 2019.

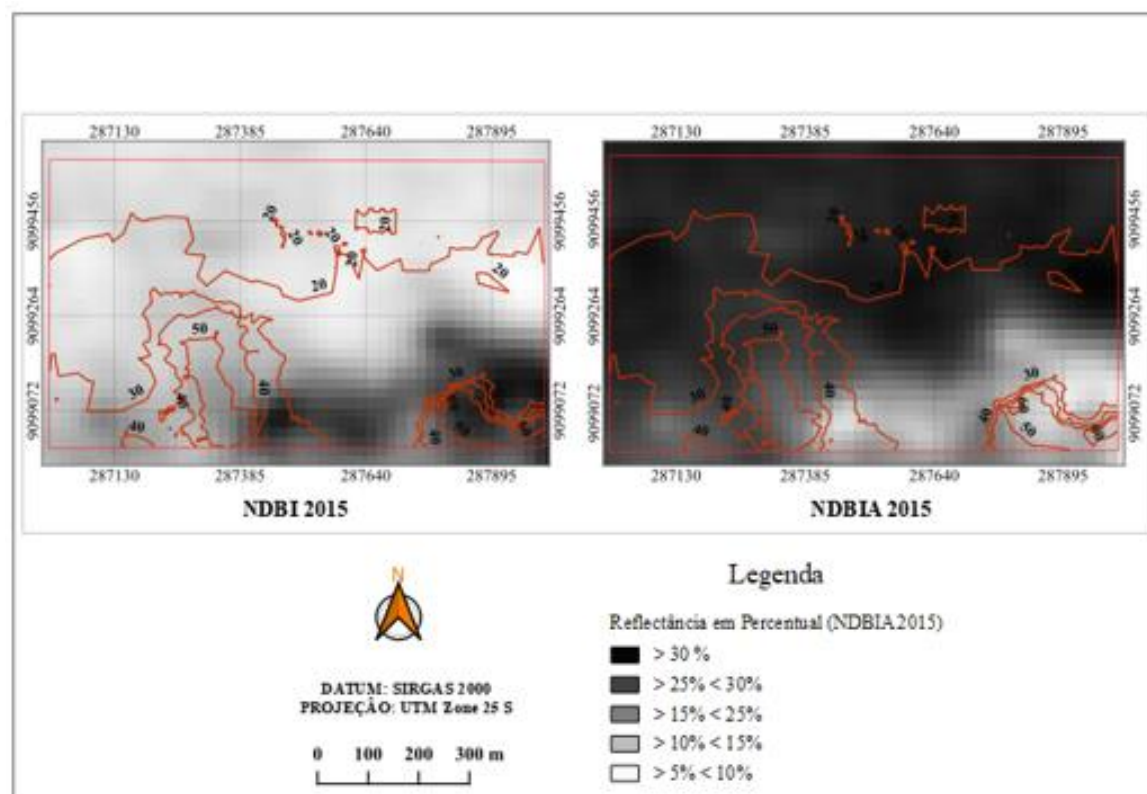


Figura 15 – Novo Índice Ambiental NDBIAM 2015.

Para análises do novo índice ambiental, deve sempre levar em consideração a época de aquisição das imagens, observar qual é o período de chuvas, a influência dos efeitos das marés sobre a área de estudo se for em regiões litorâneas e a presença de nuvens. Estes fenômenos influenciam diretamente na

proporção de áreas das classes de uso e ocupação do solo e nos valores de refletâncias dos índices físicos.

Estes resultados confirmam que é possível, usando fatiamento por altitudes com os índices físicos NDVI e NDBI para analisar o uso integrado de dados LiDAR 3D em imagens multiespectrais

orbitais CBERS-4 a criação de um novo índice físico ambiental.

1. Conclusões

A partir do presente trabalho foi possível realizar a calibração radiométrica, calculados pela reflectância no topo da atmosfera (TOA) para imagens CBERS-4. A acurácia da classificação supervisionada pelo coeficiente Kappa apontou Boa Qualidade, e o índice de Exatidão Global (EG) para as imagens dos períodos 29-08-2019 e 22-01-2015 indicou 100% de separabilidade dos alvos na classificação.

Na classificação do uso e ocupação do solo, a separabilidade dos alvos nas composições RGB para imagens do período 22-01-2019 com os melhores destaque formam, 6-NDVI-7, 6-8-NDWI e 11-8-NDBI. As composições RGB com melhor destaque para as imagens do período 22-01-2015 foram, 6-NDVI-7, 6-8-NDWI, 11-8-NDBI.

Em linhas gerais, neste estudo notou-se avanço de ocupação do espaço urbano em áreas que deveriam ser preservadas ambientalmente. Esses ecossistemas se destacam por apresentarem riquezas de diversidade de suas faunas e floras com a presença de mangues, florestas de mata atlântica, rios, lagos ou lagoas naturais, regiões de maior declividades e topos de morro que abriga inúmeras espécies de animais e plantas.

As CNs de 10m de elevação, melhor representaram os limites altimétricos de superfície na imagem interpolada do MDS. A criação dos perfis (A-B e C-D) permite compreender o perfil de superfície da área de estudo dessa pesquisa e identificar a taxa de declividade de uma seção pela análise espacial (distância).

A fórmula matemática para geração do novo índice ambiental, baseada nos índices físicos NDVI e NDBI, pelo critério tentativa e erro de intervalo entre -1 a +1 que atendeu às necessidades de integração foi o valor zero (0), em escala logarítmica log10.

A desvantagem encontrada na criação do novo índice ambiental, pela escala logarítmica log10, é devido aos pixels com valores negativos na origem do NDVI, NDWI e NDBI, ao ser transformados pela equação 7, não assumirem valores (sem valor ou sem informações) de dados. Nesse sentido, observado a ausência de corpos hídricos na área de estudo e que, todos os seus pixels assumiram valores negativos, não é possível a criação do novo índice ambiental para o índice físico NDWI nessa pesquisa.

Portando, usando fatiamento por altitudes com os índices físicos NDVI e NDBI para analisar o uso integrado de dados LiDAR 3D em imagens multiespectrais orbitais CBERS-4 permite a geração de um novo índice físico ambiental.

A combinação destes resultados pode, em tese, auxiliar e definir novos parâmetros ambientais estabelecidos no novo código florestal e no plano de uso e ocupação do solo para áreas urbanas do Recife-PE, considerando a realidade de diferentes grupos de pessoas e comunidades, respeitando a diversidade ambiental, social e econômica de forma a orientar gestores públicos para compor futuros planos diretores municipais, desenvolvimento de políticas públicas mais eficazes, planejamento do uso e ocupação do solo urbano e monitoramento da qualidade ambiental.

Sendo assim, devido à ausência de trabalhos que abordem esta linha de pesquisa, sugere-se para futuros trabalhos o uso integrado de dados LiDAR 3D em imagens orbitais multi sensores de outros satélites, aplicados em outras áreas urbanas de estudo para comparações com estes resultados. Na criação de um novo índice ambiental pela equação 7 deste trabalho, será pertinente testar outras fórmulas matemáticas que assumam valores negativos de pixels para evitar perdas de informações de dados, com aplicações e análises em outros índices físicos conhecidos.

Referências

- Albuquerque, R.S., 2017. Sistema de indicadores de vulnerabilidade socioambiental e políticas públicas para espaços urbanos: uma aplicação em São Bento-PB. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Campina Grande, Pombal.
- Chandler, G., 2007. An Overview of the CBERS-2 satellite and comparison of the CBERS-2 CCD data with the L5 TM Data. U.S. Department of the Interior U.S. Geological Survey. Disponível: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/v/20070038251.pdf>. Acesso: 29 abr. 2020.
- Chen, F., Lin, A., Zhu, H., Niu, J., 2018. Quantifying climate change and ecological responses within the Yangtze river basin, China. Sustainability 10, 3026.
- Chen, J., Du, P., Wu, C., Xia, J., Chanussot, J., 2018. Mapping urban land cover of a large area using multiple sensors multiple features. Remote Sensing 10, 872.
- Chuviecco, E., 1995. Fundamentos de Teledetección Espacial. 2. ed. Ediciones Rialp, Madri.
- Coutinho Filho, O.S., 2015. Análise do índice ponderado de áreas verdes baseado no Lidar (ALS) como parâmetro da qualidade ambiental urbana. Dissertação. Escola Politécnica. Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Egels, Y., Kasser, M., 2002. Digital Photogrammetry. Taylor & Francis, London.

- Feng, Y., Gao, C., Tong, X., Chen, S., Lei, Z., Wang, J., 2019. Spatial patterns of land surface temperature and their influencing factors: a case study in Suzhou, China. *Remote Sensing* 11, 182.
- Galvêncio, J.D., Pimentel, R., Fernandes, J.G., 2010. Relação da temperatura do ar e do solo com a quantidade de clorofila aeb em jurema preta (*Mimosa tenuiflora* (Willd) Poiret) no semi-árido do Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 3, 41-46.
- Gao, B.C., 1996. NDWI - A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment* 58, 257-266.
- Gonçalves, F. de S., 2017. Parâmetros ambientais para o ordenamento territorial municipal e proposta para o Estado do Rio Grande do Sul. Tese. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2018. Divisão de Processamento de Imagem. Manuais: tutorial de geoprocessamento *SPRING*. Disponível: <http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/tutorial/index.html>. Acesso: 20 ago. 2020.
- INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2021. Divisão de Geração de Imagens DGI. Disponível: <http://www.dgi.inpe.br/catalogo/>. Acesso: 2 maio 2021.
- Jensen, J.R., 2009. Sensoriamento Remoto do Ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres. Parêntese editor, São José dos Campos.
- Luo, H., Wang, L., Wu, C., Zhang, L., 2018. An improved method for impervious surface mapping incorporating LiDAR data and high-resolution imagery at different acquisition times. *Remote Sensing* 10, 1349.
- Mitas, L., Mitasova, H., 1999. Spatial Interpolation, in: Longley, P., Goodchild, M.F., Maguire, D.J., Rhind, D.W. *Geographical Information Systems: principles, techniques, management and applications*, Wiley, Nova Jersey.
- Morsy, S., Shaker, A., El-Rabbany, A., 2017. Multispectral LiDAR data for land cover classification of urban areas. *Sensors* 17, 958.
- Novo, E.M.L.M., 2008. Sensoriamento Remoto, Princípios e Aplicações. 3. ed., v. 3. Editora Blucher, São Paulo.
- Pinto, C.T., 2016. Uncertainty evaluation for in-flight radiometric calibration of Earth observation sensors. Tese. - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.
- Ponzoni, F.J., Epiphanyo, J.C.N., 2012. In-flight absolute calibration of Cbers sensors. *Revista Brasileira de Cartografia* 64, 813-820.
- Ponzoni, F.J., Pinto, C.T., Lamparelli, R.A.C., Zullo Junior, J., Antunes, M.A.H., 2015. Calibração de Sensores Orbitais, 2. ed. Oficina de Textos, São José dos Campos.
- QGIS, 2020. Disponível: https://www.QGIS.org/pt_BR/site/forusers/download.html. Acesso: 29 abr. 2020.
- Rapinel, S., Hubert-Moy, L., Clément, B., 2015. Combined use of LiDAR data and multispectral earth observation imagery for wetland habitat mapping. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 37, 56-64.
- Rosenfield, G.H., Fitzpatrick-Lins, K., 1986. A coefficient of agreement as a measure of thematic classification accuracy. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 52, 223-227.
- Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W., 1973. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation. *Prog. Rep. RSC 1978-1*. Remote Sensing Cent., Texas A&M Univ., College Station.
- Sabins, F.F.Jr., 1997. *Remote Sensing Principles and Interpretation*. Freeman, New York.
- LISIRD. Lasp Interactive Solar Irradiance Datacenter, 2020. University of Colorado. Disponível: <https://lasp.colorado.edu/lisird/>. Acesso: 20 nov. 2020.
- Wu, J., Yao, W., Polewski, P., 2018. Mapping individual tree species and vitality along urban road corridors with LiDAR and imaging sensors: Point density versus view perspective. *Remote Sensing* 10, 1403.
- Yang, H., Xi, C., Zhao, X., Mao, P., Shi, Z.W.Y., He, T., Li, Z., 2020. Measuring the urban land surface temperature variations under Zhengzhou city expansion using Landsat-Like data. *Remote Sensing* 12, 801.