

REVISTA DE GEOGRAFIA

ANÁLISE ESPAÇO-TEMPORAL DA EVOLUÇÃO DO IBI E NDVI NA ZONA OESTE DA CIDADE DO RIO DE JANEIRO/RJ ENTRE 2001 E 2020.

SPACE-TEMPORAL ANALYSIS OF THE EVOLUTION OF THE IBI AND NDVI IN THE WEST
AREA OF THE CITY OF RIO DE JANEIRO/RJ BETWEEN 2001 AND 2020

Isabela de Almeida Herbst

Engenheira de Agrimensura e Cartografia pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ)
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Instituto de Tecnologia, BR 456
Seropédica (RJ) - 23890-000
isadealmeidah@gmail.com

Andrews José de Lucena

Doutor em Ciências Atmosféricas pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)
Professor Associado do Departamento de Geografia e do Programa de pós-graduação em Geografia da Universidade
Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ)
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Departamento de Geografia, BR 456
Seropédica (RJ) - 23890-000
lucenageo@yahoo.com.br

RESUMO

A Zona Oeste (ZO) da cidade do Rio de Janeiro compõe um cenário heterogêneo, contendo áreas urbanizadas, vegetadas e de transição. O sensoriamento remoto fornece dados que viabilizam o cálculo de índices temáticos, que são aplicados como ferramentas de mensuração e análise dessas contrastantes realidades. Este trabalho tem como objetivo analisar a variação espacial dos índices temáticos Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e do Índice de Área Construída (IBI) na entre os anos de 2021 e 2020 com base nas imagens de satélite Landsat 5, 7 e 8. Por meio de código em linguagem computacional C foram corrigidas as imagens, calculados os índices e gerados quatro mapas para cada um dos índices a cada cinco anos a partir da Composição de Máximo Valor (CMV). O IBI descreve as áreas com maior densidade urbana, enquanto o NDVI destaca áreas vegetadas. Como resultado das análises nas Regiões Administrativas (RAs), há uma nítida expansão urbana nas regiões da Barra da Tijuca e Jacarepaguá com a presença de novos empreendimentos. As RAs Bangu e Realengo mantiveram seus padrões altamente urbanos nas áreas centrais, concentrando os espaços de vegetação nos limites administrativos com as cidades adjacentes e nos maciços costeiros como Pedra Branca e Mendanha. A RA de Campo Grande, Santa Cruz e Guaratiba apresentaram alterações pontuais destacadas por manchas nos mapas de IBI e NDVI como aumento da área urbana, sendo principalmente devido à implantação de áreas industriais. A RA Cidade de Deus mostrou altos valores de IBI e baixo NDVI, indicando um padrão mais urbano em toda sua extensão. Conclui-se que o estudo dos índices IBI e NDVI se complementam nas análises e destacam de forma oposta os fenômenos de evolução urbana nas áreas observadas. As análises podem ser aplicadas para estudos ambientais, direcionamento de recursos, manutenção de áreas de conservação/preservação contribuindo para políticas públicas.

Palavras-chave: NDVI; Zona Oeste; Índice de Área Construída; Composição de Máximo Valor; Landsat.

ABSTRACT

The West Zone of the city of Rio de Janeiro composes a heterogeneous scenario, containing urbanized, vegetated and transitional land uses. The remote sensing provides data that enable the calculation of thematic indices, which are applied as tools for measuring and analyzing these contrasting realities. This work aims to analyze the spatial variation of the thematic indices of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and the Index-based Builtup Index (IBI) in the West Zone between 2021 and 2020 based on images of satellite Landsat 5, 7 and 8. Using code in computer language C, the images were corrected, the indices were calculated and four maps were generated for each indexes, using data of from the Maximum Value Composition (MVC), that composes the indexes every five years. The IBI describes the areas with the highest urban density, while the NDVI highlights vegetated areas. As a result of the analyzes in the Administrative Regions (ARs) shows a clear urban expansion in the regions of Barra da Tijuca and Jacarepaguá with the presence of new residencial and comercial areas. Bangu and Realengo ARs maintained their highly urban patterns in the central areas, concentrating the spaces of vegetation in the administrative limits with the adjacent cities and with the coastal massifs such as Pedra Branca and Mendanha. The AR of Campo Grande, Santa Cruz and Guaratiba showed specific changes highlighted by spots on the IBI and NDVI maps as an increase in the urban area, mainly due to the implementation of industrial areas. The AR Cidade de Deus showed high values of IBI and low NDVI, indicating a more urban pattern throughout its extension. It is concluded that the study of the IBI and NDVI indexes

complement each other in the analyzes, allowing the perception of the phenomena of urban evolution in the observed areas. The analyzes can be applied to environmental studies, resource allocation, maintenance of conservation/preservation areas, contributing to public policies.

Keywords: NDVI; Index-based Builtup Index; Maximum Value Composition; Landsat.

1. Introdução

A ação antrópica alterou a paisagem das cidades, suprimindo a cobertura vegetal original com a finalidade de ampliar as áreas urbanas. Nas metrópoles, como a cidade do Rio de Janeiro, essa ação se intensificou com a necessidade de maiores espaços e infraestrutura para comportar sua crescente população.

Na cidade do Rio de Janeiro, a Zona Oeste¹ (ZO) se destaca por deter a maior taxa de crescimento populacional, de maneira a compor um cenário heterogêneo em relação às suas estruturas sociais. Possui um histórico semelhante no que se refere às suas regiões administrativas bem como ao seu desenvolvimento na transição de rural a urbano, resultando em consideráveis transformações ao decorrer do século XX na busca de intensificar a urbanização (OLIVEIRA, 2017).

¹ Composta pelas seguintes regiões administrativas: Jacarepaguá, Cidade de Deus, Barra da Tijuca, Bangu, Realengo, Campo Grande, Santa Cruz, Guaratiba.

O emprego dos produtos derivados das imagens de satélite na manutenção da qualidade ambiental se difundiu a partir dos anos 1980 com os avanços científicos por ser uma prática menos custosa e de grande relevância, permitindo maior agilidade nos estudos ambientais (JENSEN, 2009).

O Sensoriamento Remoto (SR) é uma ciência que visa a observação de alvos por meio de imagens tomadas à distância (MENESES e NETTO, 2001). Sua área de abrangência é muito ampla podendo ser aplicada a inúmeras finalidades, entretanto o foco aplicado a este trabalho é o emprego de imagens espectrais da cobertura terrestre, que estuda por meio da radiação eletromagnética refletida, os alvos e suas características (CAMPBELL e HALL-BEYER, 1997).

A obtenção dos dados no SR depende de quatro fatores intrínsecos aos procedimentos, são eles: o tipo de energia que incide o alvo, as propriedades físicas do meio em que a energia se propaga, as características do alvo e as particularidades do sensor utilizado (LORENZZETTI, 2015). As imagens provenientes dos sensores contêm alguns tipos de erros que devem ser corrigidos, essas correções visam aprimorar a visualização da imagem sem transformá-la (MENESES e ALMEIDA, 2012), tais como a correção geométrica, correção radiométrica e mascaramento de nuvens.

Devido ao alto número de imagens encontradas nas séries de sensores, para algumas finalidades tal qual a análise temporal, é recorrente a geração de uma imagem periódica única que represente os dados de todas àquelas a um mesmo período, determinado pelo usuário. Com este intuito, são aplicadas técnicas que unem as várias imagens num processo conhecido como composição de imagens.

Os autores Holben, Kimes e Fraser (1986) e Eklundh (1995) indicam que tal processo pode ser exitosamente efetuado a partir da Composição de Máximo Valor (CMV), que consiste em selecionar os pixels de maiores valores para compor a cena da imagem final. A CMV se diferencia de técnicas como a média simples entre imagens, pois minimiza os efeitos de influências externas como dispersão de aerossóis, presença de nuvens, reflectância direcional e ângulo de incidência solar na composição da imagem final (HOLBEN; KIMES; FRASER, 1986).

Para a geração da composição, o usuário deve definir um intervalo de tempo que melhor represente o fenômeno a ser visualizado. Este método elimina os pixels contaminados, selecionando apenas os que possuem maior valor da série escolhida, obtendo a composição final apenas com dados de maior valor de pixel (LUCENA et al., 2013).

A composição de imagens é aplicada principalmente em análises temporais com um grande número de imagens de valores semelhantes. Peres et al. (2018) aplicaram a CMV para analisar 30 anos de dados da Temperatura de Superfície Continental (TSC) na Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ), reunindo dados das oitenta e duas imagens obtidas em duas composições, sendo uma de 1984 a 1999 e a segunda de 2000 a 2015.

Em relação à disponibilidade de imagens, existem diversas plataformas que disponibilizam seus dados para distintas finalidades, foi escolhida neste trabalho as imagens da plataforma *Landsat*. A série *Landsat* lançou seu primeiro satélite em 1972, sendo pioneira em coletar continuamente imagens para monitoramento continental e costeiro, obtendo dados para diversas aplicações sobre os recursos terrestres (SHORT, 1976).

O conjunto *Landsat* é uma iniciativa conjunta da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) com o serviço geológico dos Estados Unidos (USGS). A série é composta atualmente por nove satélites, o mais recente, *Landsat 9*, foi lançado em setembro de 2021, contando no total com oito sensores que se diferenciam em relação às suas resoluções, propiciando distintas finalidades.

A plataforma *Landsat* fornece subsídio para embasar milhares de pesquisas pelo mundo e nos Estados Unidos se tornou o pilar central dos estudos em sensoriamento remoto e fornecimento de insumos para compreensão e manejo dos recursos naturais (GOWARD et al., 2006). Há uma ampla gama de estudos desenvolvidos com os dados *Landsat*, principalmente valendo-se de sua vantagem em ter uma série de dados com quase 50 anos, ideal para as análises de evolução temporal e estudos ambientais.

Dentre a gama de aplicações viabilizadas com os dados *Landsat* foram escolhidos dois índices espectrais temáticos para representar a variação na composição urbana da ZO do Rio de Janeiro. A geração dos índices espectrais é parte do processo conhecido como transformações multiespectrais (BOUZEKRI; LASBET; LACHEHAB, 2015), como é possível manipular faixas de radiação eletromagnética além das faixas visíveis, fica viável a identificação e análise da variação da composição da vegetação (MCCOY, 2005).

Para este trabalho, os índices selecionados para a análise foram o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (do inglês *Normalized Difference Vegetation Index* - NDVI) e o *index-based builtup index* (IBI), traduzido como Índice de Área Construída. A utilização desses índices combinados tem a finalidade de ampliar as análises, possibilitando perceber as nuances da alteração do uso do solo frente à dois valores divergentes, pois cada índice tem enfoque para um tipo de alvo (vegetal para NDVI e urbano para IBI).

Nesse contexto, o presente artigo tem o objetivo de analisar o uso do solo, mais especificamente a partir da vegetação e do uso urbano, na Zona Oeste da cidade do Rio de Janeiro, entre os anos de 2001 e 2020, empregando os índices temáticos NDVI e IBI, numa composição de máximo valor quinquenal, oriundos de equações com as bandas multiespectrais da série de satélites *Landsat*.

2. Materiais e métodos

A área escolhida como objeto de estudo é a região da Zona Oeste (ZO) da cidade Rio de Janeiro, que se define pelas Áreas de Planejamento (APs) 4 e 5, conceituadas pela Lei

Complementar nº111. Segundo dados do IBGE, ocupa 72,4% do território da cidade em seus 886,24 km² de extensão.

Os bairros que compõem a AP-5 estão contidos em cinco Regiões Administrativas (RA), sendo elas: Bangu, Realengo, Campo Grande, Santa Cruz e Guaratiba, enquanto a AP-4 possui três RAs, Jacarepaguá, Cidade de Deus e Barra da Tijuca. A Zona oeste concentra 41 bairros delimitados pelas RAs citadas, como ilustram o mapa da Figura 01.



Figura 1. Mapa de abrangência da Zona Oeste do Rio de Janeiro. | **Fonte:** Autor, 2019.

A ZO foi escolhida por destacar-se frente às outras áreas da cidade devido ao seu particular contraste de realidades. Ainda que delimite bairros muito distintos entre si, estes possuem características semelhantes intrínsecas aos seus processos de urbanização, tornando-a um objeto de estudo singular.

Conforme Oliveira (2017), essa área da cidade do Rio de Janeiro tem seu histórico econômico embasado na produção agrícola, transitando entre diferentes cultivos principais, até a década de 1960 na qual o processo de urbanização se iniciou efetivamente. Nesse momento, a

região foi vista como eixo de expansão da cidade, com alocação de recursos estatais para atingir tal finalidade.

O resultado dessa empreitada na região da AP-5, foi um abrupto crescimento populacional e ganho de proeminência política e econômica, entretanto insuficiente para suprir as necessidades populacionais o que implica até hoje num déficit de serviços públicos e oportunidades, sendo considerada por alguns autores como região periférica (GOMES, 2020). Contrapondo essa realidade, a região da Barra da Tijuca e adjacências (AP-4), é percebida como o futuro da cidade e abriga grandes investimentos, sendo inclusive descrita por Mamede-Neves, Vidal e Wilmer (2003) como uma “sociedade emergente”.

Em relação às características geomorfológicas, a ZO abriga o maciço da Pedra Branca, uma cadeia de serras com topografia acidentada, e o maciço Gericinó-Mendanha que se localiza quase na divisa da cidade, ambos possuem focos de vegetação original degradada principalmente nas suas bases, em detrimento da ocupação antrópica (LUCENA, 2010).

Os dados utilizados para a geração dos índices são provenientes da plataforma *Landsat*, composta por uma vasta gama de imagens. As cenas são disponibilizadas gratuitamente em diferentes plataformas. No caso desse projeto, as imagens foram baixadas pelo site da USGS. Para obter imagens da região de interesse e contemplando as datas desejadas, foi utilizado o filtro indicando a área da órbita-ponto 217-76 (que corresponde à cena da imagem que abrange a ZO), cobertura de nuvens de no máximo 25% e o período de 01/01/2001 à 31/12/2020. As imagens foram baixadas e visualmente filtradas, a fim de evitar imagens com excesso de nuvem na área de interesse, totalizando 125 imagens para o período.

Ressaltamos que apesar de fazer parte do período, o ano de 2012 foi inteiramente desconsiderado na obtenção de imagens pois este intermedia o término do programa *Landsat 5 TM* (novembro de 2011) e o lançamento do *Landsat 8* (em março de 2013), no qual as imagens obtidas pelo *Landsat 7* possuem interferências e tiveram de ser inutilizadas.

Para garantir a qualidade dos dados obtidos, as imagens selecionadas passaram pelo processo de georreferenciamento, no qual é atribuído à imagem propriedades de escala e correlacionar suas coordenadas a um sistema de projeção cartográfica (MATHER e KOCH, 2011). Para tal, as bandas foram individualmente georreferenciadas no software livre Spring.

Em seguida, foi efetuada a correção radiométrica em software matemático de linguagem de programação C. Esse é o processo pelo qual é calculada a reflectância, conceituada por Meneses e Almeida (2012) como “a razão entre a quantidade de energia radiante que deixa uma unidade de área no terreno (Radiância) pela quantidade de energia incidente naquela área (Irradiância), medida no mesmo instante de tempo”.

A reflectância é a base da curva espectral dos alvos, Ponzoni, Shimabukuro e Kuplich (2015) descrevem a assinatura espectral como o fenômeno de interação da radiação eletromagnética com um alvo, em relação à reflexão. A reflectância das bandas é essencial para a obtenção dos índices espectrais elegidos, sendo a principal variável das equações.

Devido à altitude dos sensores e ao clima predominantemente tropical brasileiro, o imageamento pode evidenciar a ocorrência de nuvens. Para fins quantitativos, como o caso de análise de índices temáticos a partir do sensoriamento remoto, é indicado fazer o tratamento dos pixels cobertos por nuvens, conhecido como mascaramento de nuvens (FRANÇA e CRACKNELL, 1995).

A metodologia de mascaramento de nuvens aplicada nas imagens deste trabalho é uma adaptação da produção de Franya e Cracknell (1995). Foram empregadas simultaneamente três técnicas para o mascaramento de nuvens, que consistem na definição de três limiares, o primeiro para reflectância na banda do vermelho visível, o segundo para a temperatura de brilho da banda do infravermelho termal e finalmente, um terceiro limiar definido pela razão entre as bandas do infravermelho próximo e vermelho, seguindo os procedimentos descritos por Lucena et al. (2013).

Em posse das imagens corrigidas e com mascaramento de nuvens, foram obtidos os índices espectrais temáticos, o primeiro deles, NDVI, foi proposto por Rouse et al. (1974). Seu cálculo se baseia na reflectância das bandas do sensor, focando na diferença entre a máxima absorção de radiação na região do vermelho visível (Vm), e a máxima reflexão de radiação na região do infravermelho-próximo (IVP), conforme a equação 1.1, sendo ρ a reflectância dessas bandas.

(1.1)

$$NDVI = \frac{\rho IVP - \rho Vm}{\rho IVP + \rho Vm}$$

Segundo Mather (2005), o uso do NDVI para análises temporais é mais adequado que a simples razão entre bandas. Devido à construção de sua equação, o NDVI tende a sofrer menos influência das variações atmosféricas. Autores como Deering (1975) e Huete (1988) analisaram com mais profundidade a conceituação e possibilidades de alterações no NDVI, além de sua aplicabilidade.

O segundo índice calculado é o IBI, proposto por Xu (2008). Consiste num cálculo embasado em três diferentes índices temáticos que representam os três componentes mais significativos urbanos (água, vegetação e área construída), sendo eles o NDVI, MNDWI índice de água por diferença normalizada modificado e o NDBI, que é índice de área construída por diferença normalizada.

A equação 1.2 demonstra o cálculo do IBI considerando a mesma nomenclatura de bandas empregadas no índice supracitado, descrito com a mesma simbologia da equação anterior, adicionado da abreviação Vd que representa a faixa de radiação do verde visível.

(1.2)

$$IBI = \frac{\frac{2\rho_{IVM}}{(\rho_{IVM} + \rho_{IVP})} - \left[\frac{\rho_{IVP}}{(\rho_{IVP} + \rho_{Vm})} + \frac{\rho_{Vd}}{(\rho_{Vd} + \rho_{IVM})} \right]}{\frac{2\rho_{IVM}}{(\rho_{IVM} + \rho_{IVP})} + \left[\frac{\rho_{IVP}}{(\rho_{IVP} + \rho_{Vm})} + \frac{\rho_{Vd}}{(\rho_{Vd} + \rho_{IVM})} \right]}$$

A função do IBI é identificar automaticamente áreas construídas em imagens de satélite e se distingue dos índices convencionais por se embasar em outros índices temáticos derivados, suas aplicações podem ser correlacionadas a diferentes fatores, como explorado por Lucena et al. (2021) e Liu et al. (2015).

Ambos índices têm seus valores normalizados, variando de -1 a 1, sendo que no NDVI valores positivos indicam presença de vegetação e negativos sua ausência, quanto mais próximo de 1, mais abundante é o dossel vegetal, enquanto valores mais próximos de -1 indicam a ausência de vegetação. E no IBI os valores mínimos indicam áreas de baixa presença urbana, enquanto valores positivos se relacionam às áreas mais urbanas.

Após a obtenção dos índices, as imagens foram compostas pela técnica da Composição de Máximo Valor (CMV), que seleciona o pixel de maior valor, que indica a condição do pixel menos contaminado e de maior valor na série temporal selecionada, conforme descrito à priori.

Com base na CMV de ambos os índices, foram gerados quatro imagens para NDVI e igualmente para o IBI, contendo dados da composição dos anos de 2001 a 2005; 2006 a 2010; 2011 a 2015 e 2016 a 2020.

As oito imagens finais foram manipuladas no software Qgis versão 3.14 e acrescidas dos dados vetoriais foram gerados os mapas com escala única para cada um dos índices, sendo essa de intervalos iguais, abrangendo os valores de máximo e mínimo apresentados para a série temporal.

Além dos dados raster, foi necessário na composição de mapas uma base de dados vetoriais contendo a divisão do município do Rio de Janeiro com dados do Data Rio (2019) e a divisão estadual do Rio de Janeiro com dados providos do IBGE (2010).

Foram selecionadas para a legenda tons divergentes e semelhantes para representar cada um dos índices, a fim de facilitar a comparação das individualidades destacadas por esses. Apesar dos índices terem variação normalizada de -1 a 1, na amostra obtida, a escala indicou que os dados

se mantiveram majoritariamente em valores entre -0,4 e 0,4 para IBI e entre 0,1 e 0,8 para NDVI. Essa diferença se dá devido à composição heterogênea das cidades e à metodologia da CMV.

Para as análises das alterações na área de estudo destacadas pelos índices IBI e NDVI foram utilizados os mapas gerados, auxílio da ferramenta Google Earth para identificar as áreas de destaque e foram extraídos dos bairros da área de interesse os valores máximo, mínimo e médio dos índices.

3. Resultados e discussões

Iniciando as análises pelo IBI, na Figura 02 há a composição dos anos 2001 a 2005, no qual destacam-se os tons avermelhados, sendo que os tons de vermelho mais saturado se predominam com maior densidade nas áreas centrais das regiões administrativas de Santa Cruz, Campo Grande, Bangu, Realengo e Cidade de Deus. Nas demais RAs, os locais que mais destacam alto IBI são nos centros comerciais e residenciais da Barra da Tijuca e em áreas de solo exposto presente na parte sudoeste de Guaratiba.

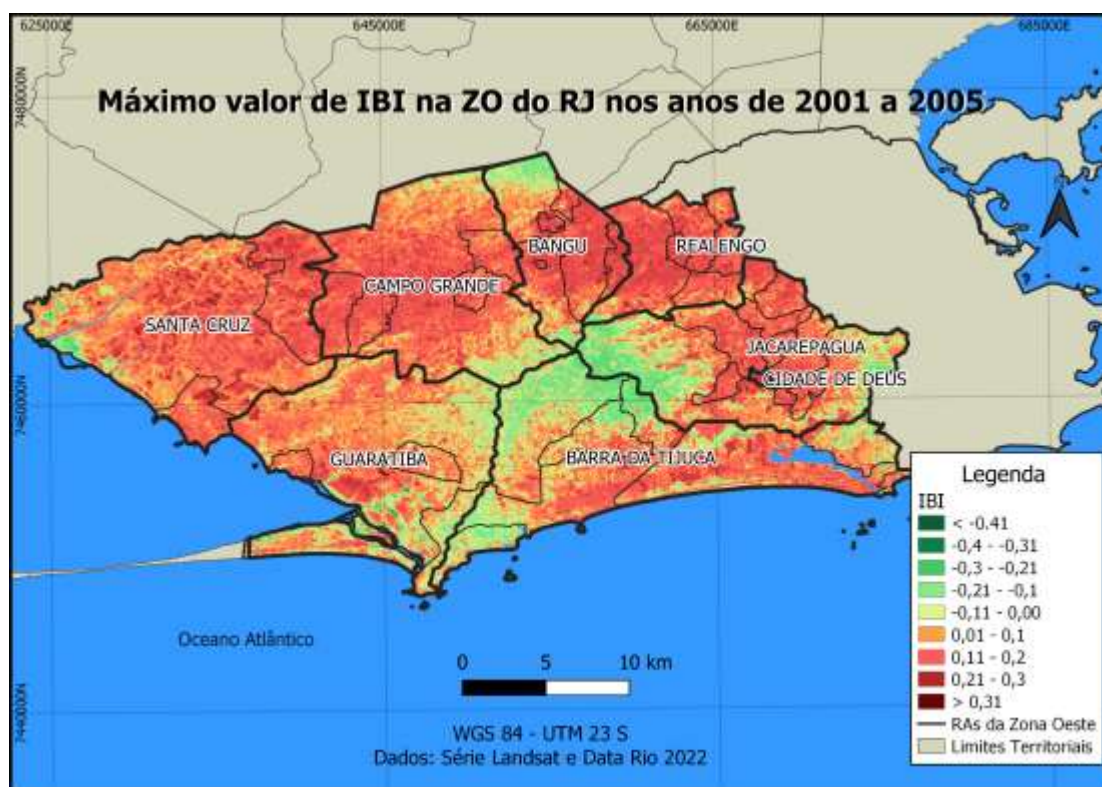


Figura 2. Mapa de máximo valor de IBI na ZO da cidade do Rio de Janeiro na composição de máximo valor entre os anos de 2001 a 2005. | Fonte: Autora, 2022.

É nítido o contraste de baixo IBI na porção central do mapa, representado nos tons verdes (IBI entre -0,1 e -0,4), que corresponde à presença do Maciço da Pedra Branca, área de relevo acidentado com vegetação protegida, que se manteve com baixo IBI durante todo o período de 2001 a 2005.

Outras áreas em que se destacam baixos valores de IBI nos tons esverdeados é o Maciço do Gericinó-Mendanha na divisa norte de Bangu. Assim como a região costeira limítrofe das RAs Barra da Tijuca e Guaratiba, que contém o bairro de Grumari, que apresentou a menor média de IBI do período, sendo igual à -0,005.

A maior média do período foi de IBI 0,237 no bairro Jabour, na RA Bangu, sendo esse um bairro contido nos limites do bairro Senador Camará, no qual é predominante a presença de construções, sem áreas de vegetação com apenas algumas árvores, justificando seu alto valor médio de índice de área urbana, apresenta também um baixo desvio padrão de 0,028, corroborando a análise de possuir predomínio de área urbana.

O mapa apresentado na Figura 03 demonstra os valores encontrados na composição dos anos 2006 a 2010. Os tons avermelhados que indicam IBI maior que 0,01 tiveram diminuição quando comparados ao mapa anterior, dando espaço a mais áreas de menor IBI, indicando menores valores de área construída.

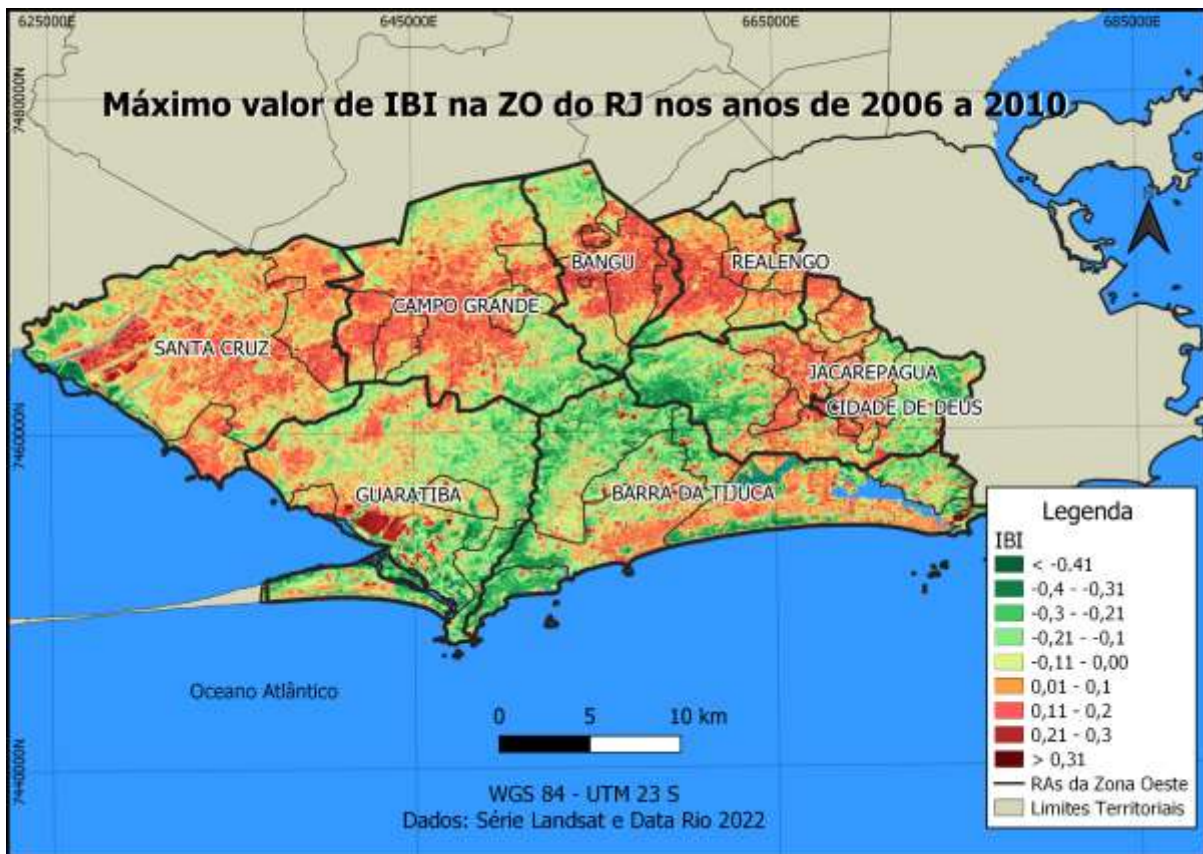


Figura 3. Mapa de máximo valor de IBI na ZO da cidade do Rio de Janeiro na composição de máximo valor entre os anos de 2006 a 2010. | **Fonte:** Autora, 2022.

Na Figura 3, os locais que mais se destacam com tom vermelho escuro, indicando IBI maior que 0,31, se localizam principalmente nas RAs Guaratiba, Santa Cruz, Campo Grande e Bangu. Numa análise mais detalhada, com o auxílio de *Google Earth*, foi possível identificar que houve no período de 2006 e 2010 a concretização de uma nova zona industrial no bairro Santa Cruz (de RA homônima), justificando a densificação de área urbanizada noroeste de seu território descrita pelo mapa, sendo que neste intervalo temporal, obteve a máxima de 0,642 de IBI.

Na RA Guaratiba a mancha de IBI com valores acima de 0,31 disposta na região litorânea compreende área de solo exposto, que não se destacou no mapa anterior referente a 2000 a 2005. A RA Guaratiba obteve para o período de 2006 a 2010 o valor médio de IBI de -0,017, com um alto desvio de 0,144, justificado por sua composição heterogênea de áreas muito vegetadas de baixo IBI, chegando a -0,468 (em tom verde escuro) e áreas de solo exposto com IBI de máxima 0,632 representado em vermelho escuro no mapa da Figura 03.

As RAs Campo Grande e Bangu apresentaram suas manchas de urbanização principalmente em áreas industriais e residenciais, sendo que a composição de imagens desse

período permite a melhor visualização das vias, se destacando a Avenida Brasil, que possui adensamento urbano em seus entornos.

A próxima composição analisada foi entre os anos de 2011 a 2015, disponível na Figura 04. Identifica-se a diminuição do IBI, que agora se apresenta majoritariamente por tons alaranjados (IBI entre 0,01 e 0,1) e concentração de baixo IBI (em verde escuro com valores menores de -0,3), principalmente na região dos maciços costeiros (Pedra Branca ao centro e Gericinó-Mendanha nos limites ao norte de Bangu e Campo Grande) assim como nas regiões limítrofes ao Parque Nacional da Tijuca na porção leste do mapa.

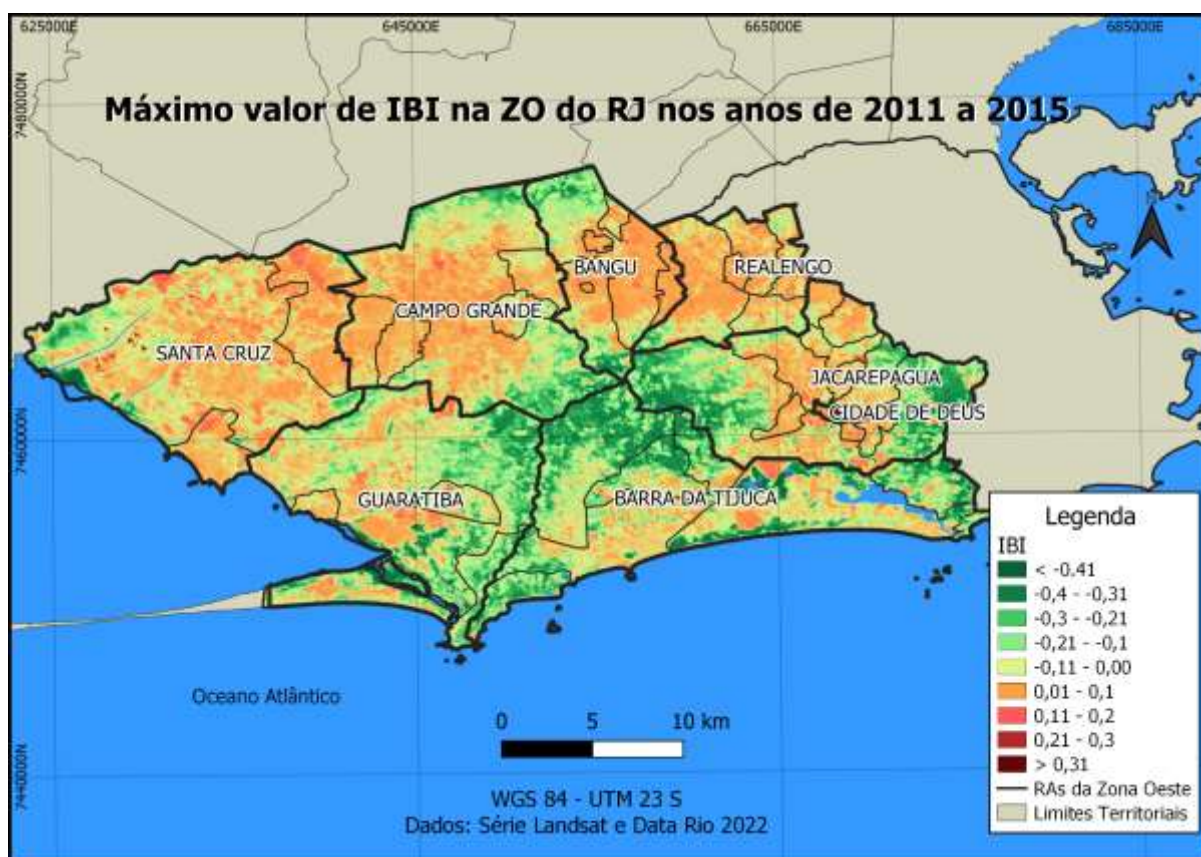


Figura 4. Mapa de máximo valor de IBI na ZO da cidade do Rio de Janeiro na composição de máximo valor entre os anos de 2011 a 2015. | **Fonte:** Autora, 2022.

Neste período de 2011 a 2015, quando diretamente comparado à composição anterior (2006 a 2010), ficam notáveis novos adensamentos urbanos na RA Barra da Tijuca, onde podemos observar na região mais a oeste, que corresponde ao bairro Recreio dos Bandeirantes e na porção central (bairro Vargem Grande) a expansão de áreas residenciais, que destaca-se em novas áreas de tons alaranjados e rosados (IBI entre 0,01 e 0,2).

Destacando que nesse intervalo temporal, a cidade do Rio de Janeiro, especialmente a Zona Oeste, se modificou para sediar os eventos mundiais da Copa do Mundo de 2014 e os Jogos Olímpicos de verão 2016. Para tais, foram construídos o Parque Olímpico, área de edificações dedicadas aos atletas e imprensa mundial (Vila Olímpica) e a via Transolímpica que liga o bairro Magalhães Bastos ao Recreio dos Bandeirantes.

As construções supracitadas se concentram principalmente nos limites das regiões administrativas de Jacarepaguá e Barra da Tijuca, comparando a resposta de IBI da composição 2011 a 2015 com as anteriores, fica nítida a maior densidade de áreas em tons avermelhados (IBI maior que -0,1) na região confrontante com a RA Jacarepaguá.

A RA Santa Cruz apresentou pontos de coloração vermelha escuro (IBI maior que 0,31), chegando à máxima de 0,597 que se localiza em área de zona industrial. Outras áreas em vermelho (IBI entre 0,21 e 0,3) foram observadas na mesma RA, localizadas em zonas de concentração residencial assim como solo exposto.

Os maiores valores de média de IBI para o período se encontram nas RAs Bangu e Cidade de Deus, sendo de 0,105 e 0,094 respectivamente. A RA Cidade de Deus abriga uma alta concentração urbana em uma área de aproximadamente 1,2km², quase majoritariamente composta por paisagem urbana, seus menores valores de IBI são observados nos entornos do curso d'água presente em seus limites.

A próxima composição de IBI, presente na Figura 05, abrange os anos de 2016 a 2020. A principal alteração observada na comparação com o mapa anterior é a tonalidade, onde os tons verdes já não são aparentes, sendo as regiões de mata e relevo representadas em coloração amarela com valores de IBI variando entre -0,11 e 0,0. Contudo, observa-se que o mapa atual manteve o padrão do período anterior. Para o período de 2016 a 2020, as médias se mantiveram em valores entre 0,1 e 0,02, representados pelas cores amarelo e laranja, como pode ser observado com predominância em toda a extensão da ZO.

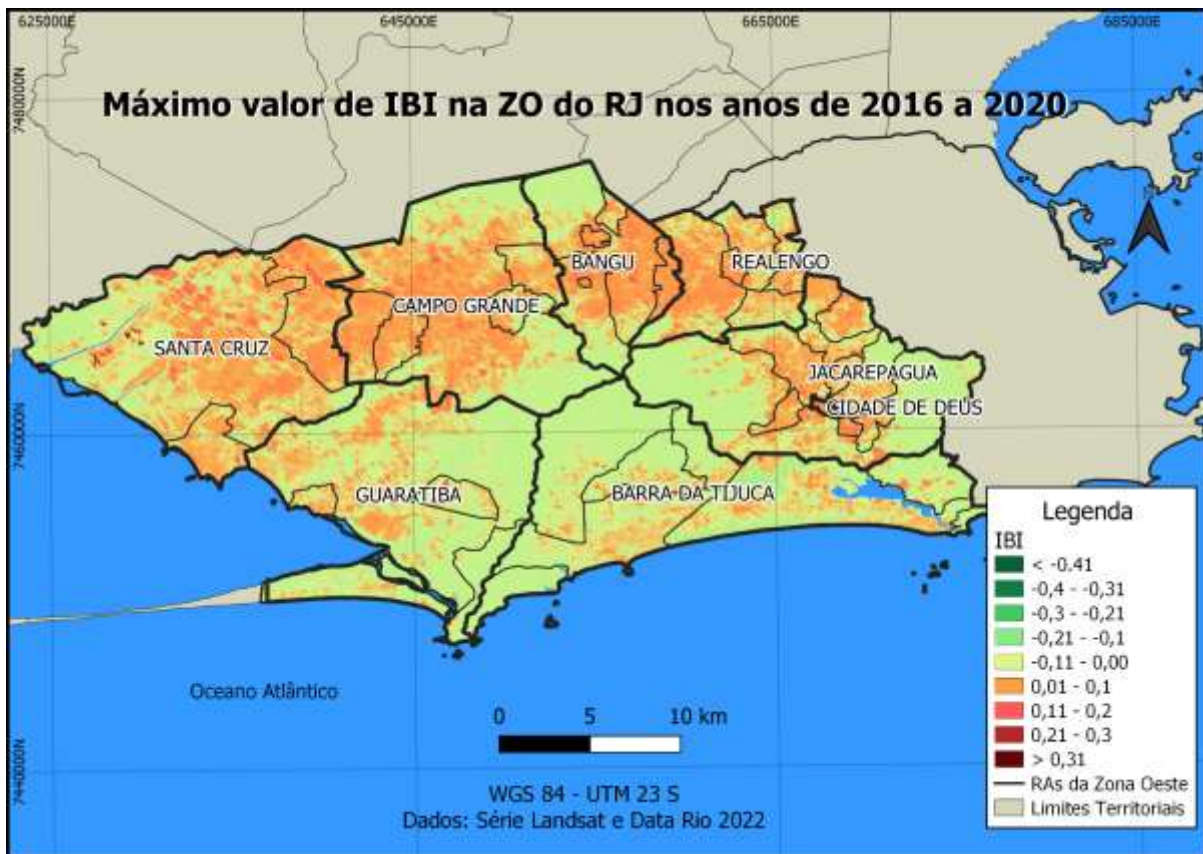


Figura 5. Mapa de máximo valor de IBI na ZO da cidade do Rio de Janeiro na composição de máximo valor entre os anos de 2016 a 2020. | **Fonte:** Autora, 2022.

Para essa composição, a máxima de IBI foi encontrada na RA Santa Cruz, com valor de 0,541 destacado na cor vermelho escuro, localizado na porção noroeste da RA, onde se encontra zona industrial composta de galpões e a presença de empresas metalúrgicas e siderúrgicas.

Comparando todas as composições de IBI analisadas, visualmente as áreas urbanas diminuíram sua expressão, porém, numericamente, é possível perceber que há novos pontos de área urbana, assim como as principais RAs de predomínio urbano, se mantiveram com alta de IBI durante todo o período.

A Figura 06, que contém os dados de CMV para os anos de 2001 a 2005, destaca as áreas de alto NDVI na cor verde escuro. Aqueles valores maiores que 0,8 se concentram na área dos maciços costeiros (Pedra Branca e Gericinó-Mendanha).

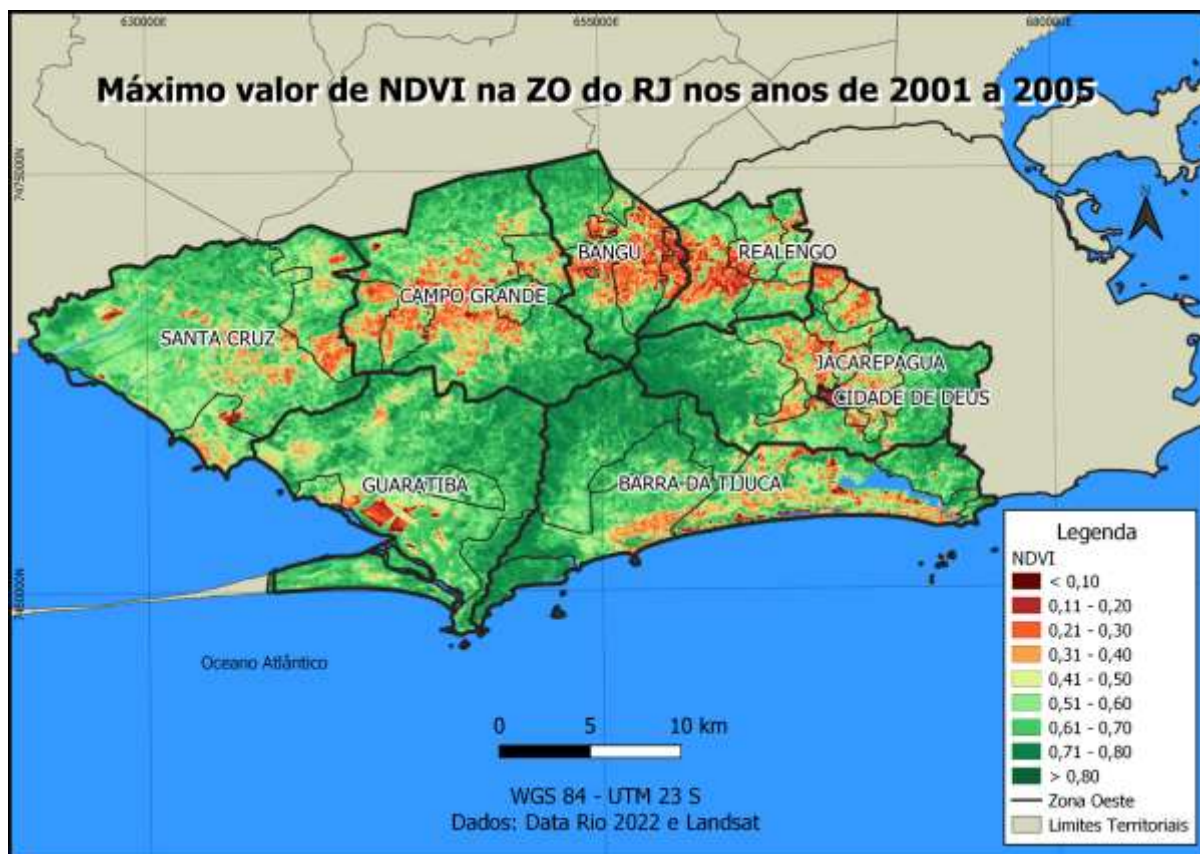


Figura 6. Mapa de máximo valor de NDVI na ZO da cidade do Rio de Janeiro na composição de máximo valor entre os anos de 2001 a 2005. | Fonte: Autora, 2022.

Os focos de baixa concentração ambiental estão localizados no centro de Bangu, limítrofe com Realengo, assim como nas divisas das RAs Campo Grande e Santa Cruz. Essas concentrações de coloração avermelhada indicam NDVI menor que 0,3, que correspondem a áreas urbanas residenciais e comerciais.

A área em vermelho na região sudoeste da RA Guaratiba com NDVI menor que 0,2 indica área de solo exposto, sem vegetação. O mesmo padrão de menor NDVI pela presença de solo é observado nos arredores do maciço da Pedra Branca, onde há exposição de rocha, com baixa densidade vegetal, representado no mapa com cores amarelas e alaranjadas indicando NDVI entre 0,21 e 0,5.

As maiores médias de NDVI na composição ficaram na região da Barra da Tijuca, nos bairros Vargem Grande e Grumari, com valores de 0,746 e 0,768, respectivamente. O bairro Grumari se localiza na região litorânea com áreas de preservação ambiental e praias de reserva natural ecológica. Já o bairro de Vargem Grande abriga o Parque Estadual da Pedra Branca, todos esses são indicativos das razões pelo qual o NDVI indicou uma média alta na presença de vegetação para tais locais.

A composição dos anos 2006 a 2010 é representada no mapa da Figura 07. Em relação à composição anterior, apresentou pouca variação nas áreas vegetadas, as maiores alterações visualmente são as novas áreas de baixo NDVI, principalmente nas RAs Jacarepaguá, Barra da Tijuca e Guaratiba, que é devido a recentes ocupações.

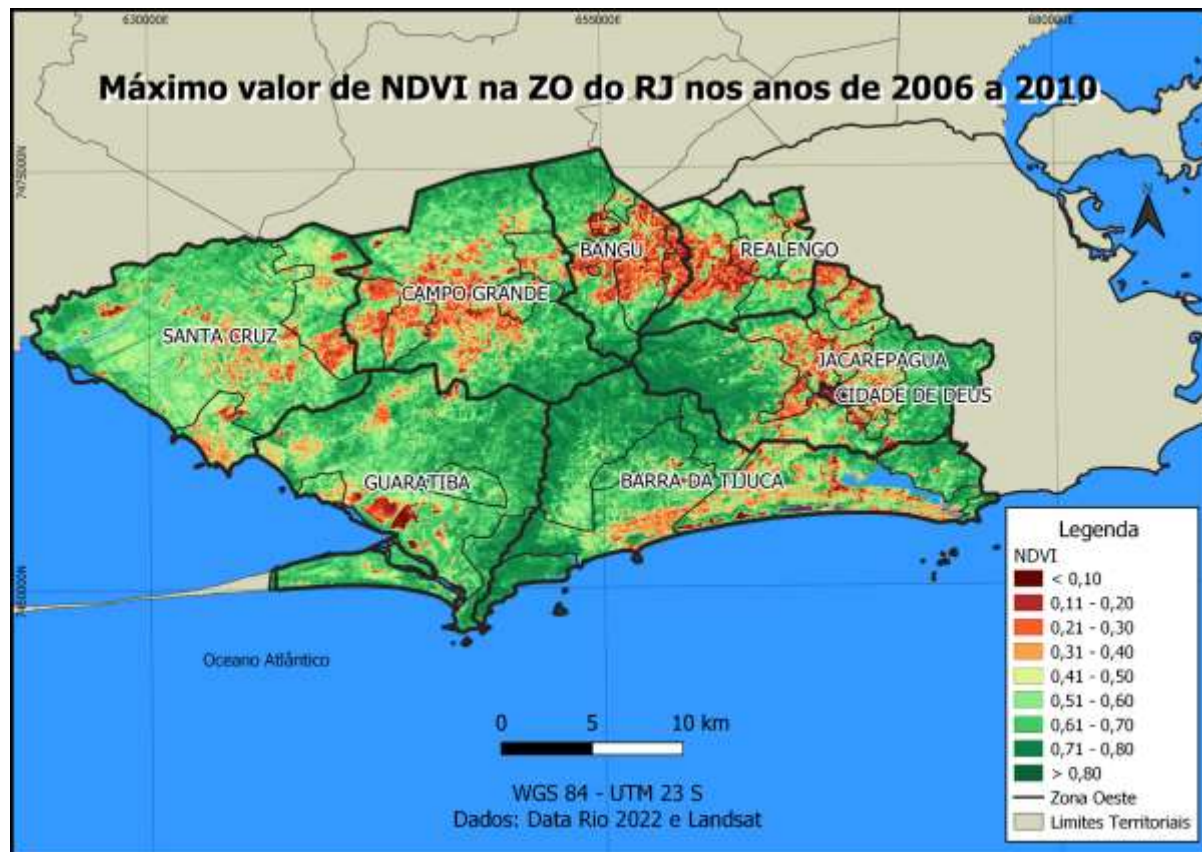


Figura 7. Mapa de máximo valor de NDVI na ZO da cidade do Rio de Janeiro na composição de máximo valor entre os anos de 2006 a 2010. | **Fonte:** Autora, 2022.

A nova área de baixo NDVI em Guaratiba no limite norte com Campo Grande é indicação de zona industrial que se densificou na composição dos anos 2006 a 2010. Na mesma RA, ainda é observado baixo NDVI, na cor vermelho escuro (NDVI menor que 0,1), em área de solo exposto.

Em Jacarepaguá, as áreas que na composição anterior (2001 a 2005) já se mostravam com baixo NDVI, agora são ainda mais destacadas com cores mais quentes e escuras, com NDVI abaixo de 0,3. Novos focos de baixa vegetação são identificados, principalmente nas proximidades das RAs Barra da Tijuca e Cidade de Deus, que se trata de áreas residenciais.

Na análise numérica, para essa composição os maiores valores de NDVI são dispostos nas RAs Jacarepaguá e Campo Grande, com valores de 0,96 e 0,94, respectivamente, e ambos na

região do Pico da Pedra Branca. Observa-se também que ambas as RAs descrevem mínimas de NDVI na cor vermelho escuro, com valores menores que 0,1, sendo ambas as áreas de composição heterogênea em relação à presença de vegetação, diferente de Cidade de Deus que se mantém com baixa resposta de NDVI.

A próxima composição de máximo valor de NDVI analisada corresponde aos anos de 2011 a 2015, apresentada na Figura 08. À primeira vista é nítida a concentração de áreas vegetadas com alto valor de NDVI, com valores ainda maiores dos que os vistos para os anos de 2006 a 2010, predominando a coloração verde escuro (com valor de NDVI maior que 0,8).

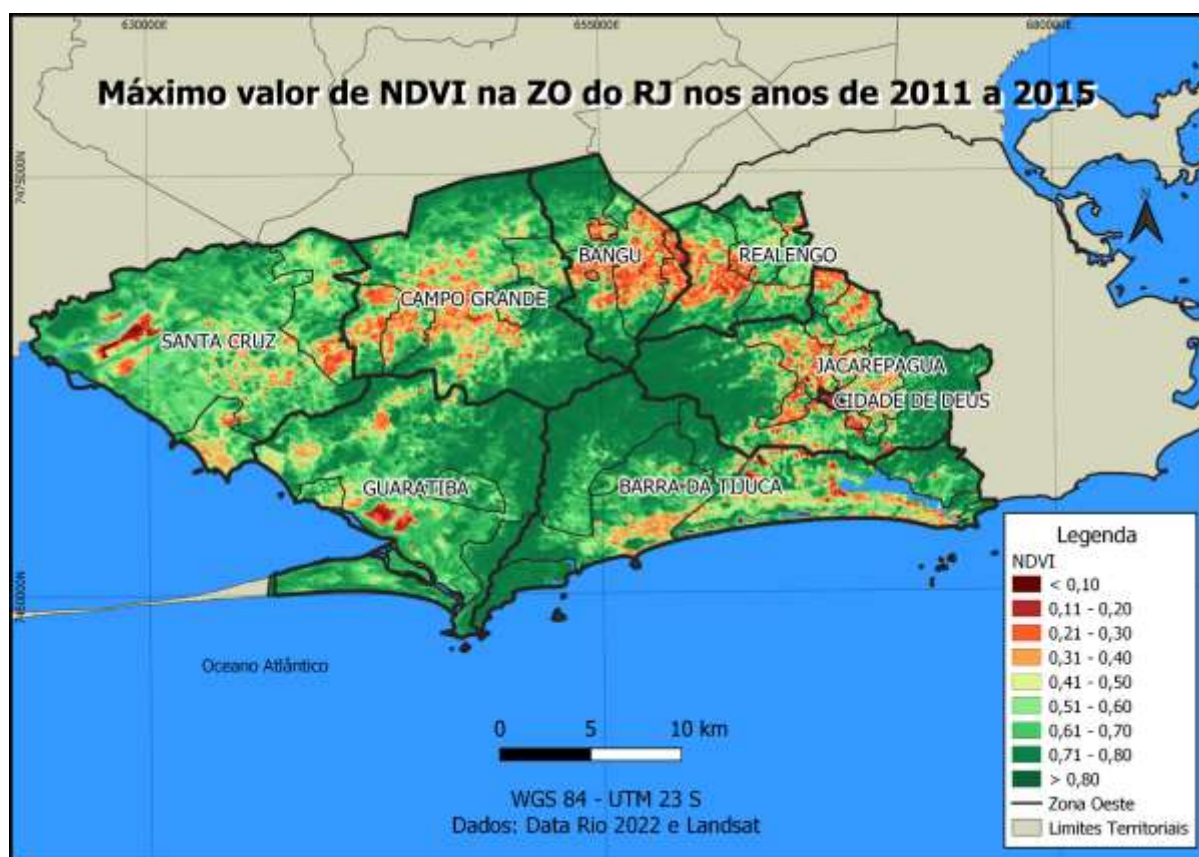


Figura 8. Mapa de máximo valor de NDVI na ZO da cidade do Rio de Janeiro na composição de máximo valor entre os anos de 2011 a 2015. | **Fonte:** Autora, 2022.

Na composição dos anos de 2011 a 2015 apenas oito dos 43 bairros que compõem as APs 4 e 5 apresentaram média de NDVI menor que 0,5, sendo que as menores médias ficaram nos bairros de Bangu e Cidade de Deus, os quais nos mapas de IBI se mostraram muito urbanizados e com poucos pontos de vegetação.

A principal alteração visível observada nessa composição é na porção noroeste de Santa Cruz, na qual existe uma mancha com valores de NDVI menores que 0,1 (representado em vermelho mais escuro). Essa baixa de NDVI se deu devido à implantação de novas áreas industriais próximas à Itaguaí e Ilha da Madeira (área externa ao mapa).

Assim como apontado nas análises do IBI para a composição do mesmo período, o mapa de NDVI destaca as alterações nas RAs Jacarepaguá e Barra da Tijuca, com novas áreas urbanas com menores valores de NDVI, destacados principalmente em vermelho e laranja (NDVI entre 0,21 e 0,4).

Na Figura 09 o mapa de NDVI para a composição dos anos 2016 a 2020 demonstra uma constância no padrão de altos valores de NDVI sobressaindo a cor verde escuro (NDVI maior que 0,8) para toda a porção já identificada como de relevo acidentado.

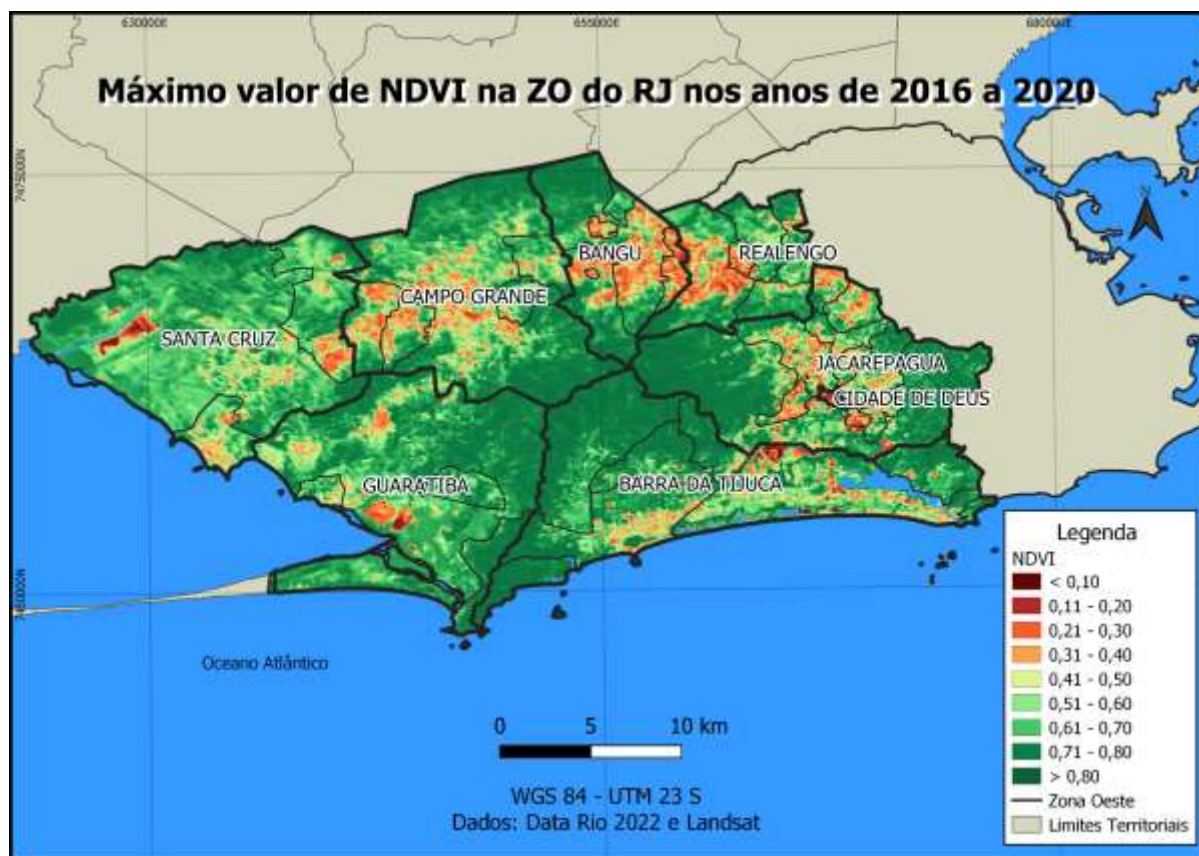


Figura 9. Mapa de máximo valor de NDVI na ZO da cidade do Rio de Janeiro na composição de máximo valor entre os anos de 2016 a 2020. | Fonte: Autora, 2022.

A região limítrofe entre a RA Barra da Tijuca e Jacarepaguá mostrou uma grande diminuição no NDVI, apresentado para a composição de 2016 a 2020 cores avermelhadas, área que corresponde ao Parque Olímpico, totalmente consolidado nas imagens desse período.

Os destaques numéricos nas RAs mantiveram para esse período os padrões de alto NDVI (cores verdes em valores maiores que 0,51) nas áreas de preservação ambiental como os maciços e limite com a Floresta da Tijuca (porção leste do mapa).

As áreas de composição heterogênea, na qual se encontram residências, terrenos de vegetação, comércio e ruas arborizadas, como é o caso da parte norte de Santa Cruz e região leste de Realengo se destacam com cores verdes e NDVI predominante entre 0,51 e 0,7.

Em uma análise comparativa das composições de NDVI apresentadas, é perceptível uma crescente nos valores, indicando que as áreas vegetadas se mantiveram com alta resposta ambiental, enquanto em outras áreas a urbanização se intensificou e houve a inserção de novas áreas com resposta urbana.

4. Considerações finais

Os índices adotados mostram a manutenção da vegetação nas áreas de reserva ambiental, principalmente na região dos maciços da Pedra Branca e Gericinó-Mendanha, com altos valores de NDVI e baixo valores de IBI, conforme as composições quinquenais. Por outro lado, aquelas áreas de urbanização consolidada ou em processo de urbanização apresentaram uma resposta oposta. Portanto, os produtos gerados neste estudo são importantes às políticas de planejamento urbano, ao manejo e à sustentabilidade ambiental.

As RAs da Área de Planejamento 5, com exceção de Guaratiba, se destacaram no quesito urbano, possuindo poucos focos de áreas vegetadas em regiões de centros urbanos. Suas áreas urbanizadas ocupam a maior parte da área passível de construção dentro de seus limites, tendo poucas oportunidades de expansão. Por outro lado, as RAs Barra de Guaratiba (AP-5) e Jacarepaguá (AP-4) tiveram muitas áreas de expansão urbana e ainda possuem áreas disponíveis para dar continuidade à urbanização em processo.

A maior parcela de áreas com alto NDVI e menor IBI e, conseqüente maior concentração de vegetação, se localiza nos maciços da cidade (Pedra Branca e Mendanha), onde o relevo acidentado e a legislação vigente impedem a expansão urbana. As áreas de maior destaque urbano se mantiveram próximas às áreas já urbanizadas, com exceção dos bairros Recreio e Santa Cruz, que apresentaram densificação de alto IBI e baixo NDVI em espaços mais afastados de seus centros urbanos.

Os mapas temáticos coropléticos foram instrumentos efetivos na elaboração das análises visuais, facilitando a compreensão das mudanças de valores nos índices. A composição das

imagens foi uma etapa necessária para garantir a compactação dos dados, porém é notável que a quantidade de imagens utilizadas por ano, tal qual suas datas de obtenção influenciam no resultado final do índice, principalmente devido à variação da densidade vegetal observada em diferentes condições (entre o período úmido e seco, por exemplo). Neste contexto, entende-se que, para trabalhos futuros, o uso de composições de imagens por sazonalidade (verão e inverno) possa trazer respostas espectrais mais precisas aos usos, seja a vegetação, o urbano, ou outro uso que se queira investigar.

O método de composição utilizado (a composição de máximo valor - CMV) foi satisfatório para as análises propostas pois possui a capacidade de minimizar os efeitos externos, tais como influência de nuvens, vapor d'água e aerossóis. A técnica de composição também impacta a alta variação de valores, principalmente nos mapas de IBI, que tiveram diferentes predominâncias de coloração durante o período de análise. Provavelmente, com o método da composição média os produtos de IBI poderiam expor pouca diferença com o NDVI, uma vez que a equação do IBI tem nele o próprio NDVI.

A metodologia utilizada possui limitações quanto à especificação de alvos em pequenas áreas devido à resolução espacial do *Landsat* (de 30 metros) que tende a generalizar as respostas espectrais. Por conta disso, outros sensores deverão ser explorados para melhoria da resolução espacial, bem como a ampliação da análise espacial e temporal dos indicadores de vegetação e urbanização.

Recomenda-se para estudos futuros a aplicação de outros índices ambientais, alinhados a uma estatística descritiva ou inferencial, correlacionados ao IBI e NDVI, como o Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI), o Índice de Vegetação Melhorado (EVI), o Índice Foliar Verde (IFV) e o Índice Resistente à Atmosfera na Região Visível (VARI). Entende-se que um maior espectro de índices e o uso da estatística ampliam o mapeamento espacial e temporal e o entendimento de áreas urbanas complexas, e em expansão, como a Zona Oeste da cidade do Rio de Janeiro.

Referências

BEM, P. P. et al. Change detection of deforestation in the Brazilian Amazon using landsat data and convolutional neural networks. **Remote Sensing**, v. 12, n. 6, p. 901, 2020.

BRASIL, Rio de Janeiro. Lei complementar nº 111, de 1 de fevereiro de 2011.

BOUZEKRI, S.; LASBET, A. A.; LACHEHAB, A. A new spectral index for extraction of built-up area using Landsat-8 data. **Journal of the Indian Society of Remote Sensing**, v. 43, n. 4, p. 867-873, 2015.

CAMPBELL, J. B.; HALL-BEYER, M. Introduction to remote sensing. **Cartographica**, v. 34, n. 1, p. 70, 1997.

- CRACKNELL, A. P. **Introduction to remote sensing**. CRC press, 2007.
- EKLUNDH, L. R. Noise estimation in NOAA AVHRR maximum-value composite NDVI images. **Remote Sensing**, v. 16, n. 15, p. 2955-2962, 1995.
- FRANÇA, G. B.; CRACKNELL, A. P. A simple cloud masking approach using NOAA AVHRR daytime data for tropical areas. **International Journal of Remote Sensing**, v. 16, n. 9, p. 1697-1705, 1995.
- GOMES, S. A cultura como alternativa: Uma aproximação a partir de sociabilidades militantes na Zona Oeste do Rio de Janeiro. **Dilemas-Revista de Estudos de Conflito e Controle Social**, v. 13, n. 1, p. 57-76, 2020.
- GOWARD, S. et al. Historical record of Landsat global coverage. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 72, n. 10, p. 1155-1169, 2006.
- HAWBAKER, T. J. et al. Mapping burned areas using dense time-series of Landsat data. **Remote Sensing of Environment**, v. 198, p. 504-522, 2017.
- HOLBEN, B.; KIMES, D.; FRASER, R. S. Directional reflectance response in AVHRR red and near-IR bands for three cover types and varying atmospheric conditions. **Remote Sensing of Environment**, v. 19, n. 3, p. 213-236, 1986.
- HUETE, A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote sensing of environment**, v. 25, n. 3, p. 295-309, 1988.
- JENSEN, J. R. EPIPHANIO, J. C. N. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. São José dos Campos: Parêntese Editora, 2009.
- LORENZZETTI, J. A. **Princípios físicos de sensoriamento remoto**. Editora Blucher, 2015.
- LUCENA, A., HERBST, I., BASTOS, V., MIRANDA, V. Utilização do Índice de Área Construída (IBI) para análise da evolução espaço-temporal da Temperatura da Superfície Continental (TSC) na Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ). *Revista Entre-Lugar*, 12(24), 269-300, 2021.
- LUCENA, A. J. et al. Urban climate and clues of heat island events in the metropolitan area of Rio de Janeiro. **Theoretical and applied climatology**, v. 111, n. 3, p. 497-511, 2013.
- LUCENA, A. J.. O sistema clima urbano da Zona Oeste/RJ: uma contribuição ao monitoramento e análise em sistemas ambientais. **Geoambiente on-line**, n. 15, p. 01-20 pág., 2010.
- LIU, K. et al. Analysis of the urban heat island effect in Shijiazhuang, China using satellite and airborne data. **Remote Sensing**, v. 7, n. 4, p. 4804-4833, 2015.
- MAMEDE-NEVES, M. A.; VIDAL, F.; WILMER, C. Problemas e valores apontados por jovens universitários pertencentes a "sociedades emergentes": um estudo sobre a Barra da Tijuca, Rio de Janeiro. **ALCEU**, v. 4, n. 7, p. 164-195, 2003.
- MATHER, P. M. **Computer Processing of Remotely-Sensed Images: An Introduction**. 2004.
- MATHER, P. M. **Computer processing of remotely-sensed images: An introduction**, 3 ed. United Kingdom: John Wiley & Sons, 2005.
- MATHER, P. M.; KOCH, M. **Computer processing of remotely-sensed images: an introduction**. John Wiley & Sons, 2011.
- MCCOY, R. M. **Field methods in remote sensing**. Guilford Press, 2005.

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

MENESES, P. R.; MADEIRA NETTO, J. da S. **Sensoriamento remoto: reflectância dos alvos naturais**. Editora Universidade de Brasília; Planaltina: Embrapa Cerrados, 2001.

OLIVEIRA, M. A. S. A. Zona oeste da cidade do Rio de Janeiro: entre o rural e o urbano. **Iluminuras**, v. 18, n. 45, 2017.

ORTEGA ADARME, M. et al. Evaluation of deep learning techniques for deforestation detection in the Brazilian Amazon and cerrado biomes from remote sensing imagery. **Remote Sensing**, v. 12, n. 6, p. 910, 2020.

PERES, L. de F., LUCENA, A. J., ROTUNNO FILHO, O. C.; ALMEIDA FRANÇA, J. R. The urban heat island in Rio de Janeiro, Brazil, in the last 30 years using remote sensing data. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 64, 104-116. 2018.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; KUPLICH, T. M. **Sensoriamento remoto da vegetação**. Oficina de Textos, 2015.

ROUSE JR, J. W. et al. **Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation**. 1973.
deering 1975

SHORT, N. M. **Mission to Earth: Landsat views the world**. Scientific and Technical Office, National Aeronautics and Space Administration, 1976.

WANG, S. et al. Mapping twenty years of corn and soybean across the US Midwest using the Landsat archive. **Scientific Data**, v. 7, n. 1, p. 1-14, 2020.

XU, H.. A new index for delineating built-up land features in satellite imagery. **International journal of remote sensing**, v. 29, n. 14, p. 4269-4276, 2008.