

Estudo

Texto recebido em: 10 ago. 2023. Aprovado em: 26 jan. 2024.

PAIVA, Anderson Luiz Ribeiro de; OLIVEIRA, Leidjane Maria Maciel de; ALMEIDA, Débora Natália Oliveira de; LEONARDO, Haylla Rebeqa de Albuquerque Lins; SILVA JÚNIOR, Ubiratan Joaquim da. Análise urbanística na Região Imediata de Petrolina a partir de imagens orbitais. *Estudos Universitários: revista de cultura*, UFPE/Proexc, Recife, v. 40, n. 2, p. 270-292, jul./dez. 2023.

<https://doi.org/10.51359/2675-7354.2023.259912>

ISSN Edição Digital: 2675-7354



Esta obra está licenciada com uma Licença Creative Commons
[Atribuição 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

ANÁLISE URBANÍSTICA NA REGIÃO IMEDIATA DE PETROLINA A PARTIR DE IMAGENS ORBITAIS

URBAN ANALYSIS IN THE IMMEDIATE REGION OF PETROLINA
BASED ON ORBITAL IMAGES

Anderson Luiz Ribeiro de Paiva

Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

Doutor em Engenharia Civil

E-mail: anderson.paiva@ufpe.br

 <https://orcid.org/0000-0003-3475-1454>

 <http://lattes.cnpq.br/8275483858862408>

Leidjane Maria Maciel de Oliveira

Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

Doutora em Engenharia Civil

E-mail: leidjane.oliveira@ufpe.br

 <https://orcid.org/0000-0003-1251-6998>

 <http://lattes.cnpq.br/0036923505084083>

Débora Natália Oliveira de Almeida

Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

Mestre em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação

E-mail: debora.noalmeida@ufpe.br

 <https://orcid.org/0000-0001-6000-6138>

 <http://lattes.cnpq.br/0686530224846541>

Haylla Rebeka de Albuquerque Lins Leonardo

Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

Mestre em Engenharia Civil

E-mail: haylla.rebeka@ufpe.br

 <https://orcid.org/0000-0001-6404-3366>

 <http://lattes.cnpq.br/1048859922511937>

Ubiratan Joaquim da Silva Júnior

Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

Mestre em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação

E-mail: ubiratan.joaquim@ufpe.br

 <https://orcid.org/0000-0001-7995-6416>

 <http://lattes.cnpq.br/5795088600817699>

Resumo

O uso de técnicas de sensoriamento remoto em estudos sobre mudanças territoriais se tornou frequente nos últimos anos por meio da aplicação das imagens orbitais no mapeamento de áreas urbanas. Este estudo tem por objetivo analisar as alterações ocorridas na Região Geográfica Imediata de Petrolina em decorrência das alterações espaciais sofridas nela, como o desenvolvimento das áreas urbanas e agrícolas. Foi aplicado o processamento em nuvem do Google Earth Engine para o cálculo dos parâmetros biofísicos Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (Normalized Difference Vegetation Index – NDVI), SAVI e Albedo da Superfície nos anos de 1991 e de 2022. Os resultados evidenciaram que, em comparação com o ano de 1991, houve um aumento do NDVI, uma pequena diminuição de SAVI e um aumento do Albedo da Superfície no ano de 2022, tendo em vista as alterações no uso e na ocupação do solo, bem como a expansão urbana e das áreas irrigadas da região. Os resultados desses índices foram condizentes com os dados obtidos do setor censitário, que delimita as áreas com maior densidade urbana e áreas rurais.

Palavras-chave: análise censitária. expansão urbana. sensoriamento remoto.

Abstract

The use of remote sensing techniques in studies on territorial change has become frequent in recent years through the application of orbital images, which are used for mapping urban areas. This study aims to analyze changes that occurred in the Immediate Geographic Region of Petrolina because of spatial changes resulting from development in

urban and agricultural areas. *Google Earth Engine's* cloud processing was applied to calculate the biophysical parameters *Normalized Difference Vegetation Index* – NDVI, SAVI and Surface Albedo in the years 1991 and 2022. The results showed that, in comparison with 1991, there was an increase in NDVI, a small decrease in SAVI and an increase of Surface Albedo in the year 2022, considering changes in land use and occupation, as well as urban expansion and irrigated areas in the region. The results of the biophysical indices were consistent with data obtained from the census sector, which delimits areas with greater urban density and rural areas.

Keywords: census analysis. urban sprawl. remote sensing.

INTRODUÇÃO

O processo de urbanização é resultado tanto da concentração populacional, causada pela migração rural, quanto da expansão urbana, impulsionada pelo crescimento da população já estabelecida nas cidades, sendo também influenciado pelo avanço da industrialização, conforme Moura (2019). Segundo o trabalho de Santos, Rufino e Barros Filho (2017), estudos realizados constataram que o crescimento da população e, em consequência, a expansão urbana, são processos nos quais o Estado não possui total controle, no entanto, quando há um bom planejamento, os possíveis desafios podem ser sanados, trazendo assim um melhor ordenamento nessa expansão.

As geotecnologias vêm contribuindo como uma ferramenta para o auxílio de tomadas de decisão acerca do gerenciamento da expansão urbana, assim como de áreas agrícolas. Diante das geotecnologias, destacam-se as técnicas de sensoriamento remoto,

que, a partir dos Índices de Vegetação e Albedo¹ da Superfície, contribuem para diversos estudos voltados à delimitação do uso e da ocupação do solo.

O Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index* - NDVI), proposto por Rouse *et al.* (1974), é útil para identificar áreas verdes ou regiões com escassa presença de vegetação. Pesquisas que envolvem áreas urbanas e periurbanas, por sua vez, buscam monitorar e acompanhar o crescimento e a distribuição espacial dessas regiões (Jensen, 2009; Costa; Augusto; Seabra, 2017).

O Albedo da Superfície (α) é considerado um dos mais importantes parâmetros na caracterização de feições naturais e artificiais pertencentes à superfície da Terra. Um conhecimento detalhado de como o albedo varia no espaço e no tempo é crucial para entender o balanço da radiação global, sua influência no clima e na dinâmica da vegetação e a alteração de áreas urbanas (Kirschbaum *et al.*, 2011), uma vez que o aumento ou redução do Albedo implica em alteração do balanço radiativo e energético da superfície da Terra. Nesse foco, o Albedo da Superfície (α) é um parâmetro imprescindível, que auxilia na compreensão das mudanças climáticas, da desertificação, das queimadas, das áreas antropizadas e de outras aplicações ambientais, bem como os métodos de pesquisa relacionados a elas (Silva *et al.*, 2005).

Assim, a área de estudo deste artigo é a Região Geográfica Imediata (RGI) de Petrolina (Figura 1), composta por seis municípios: Afrânio, Dormentes, Santa Maria da Boa Vista, Orocó, Lagoa

1 “Fração de radiação solar refletida por uma superfície ou objeto, expressada em porcentagem” (Ipam, 2024).

Grande e Petrolina. Nesse contexto, este estudo tem por objetivo analisar, no período entre 1991 e 2022, as alterações ocorridas na RGI de Petrolina em decorrência das alterações espaciais sofridas e da expansão urbana, aplicando o processamento em nuvem de dados do NDVI, do Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (*Soil Adjusted Vegetation Index* – SAVI) e do Albedo da Superfície

METODOLOGIA

ÁREA DE ESTUDO

O Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) estabeleceu 134 regiões intermediárias² no território nacional. No contexto desse mapeamento, o estado de Pernambuco se destaca ao abranger quatro dessas regiões: Recife, Caruaru, Serra Talhada e Petrolina. Essa última é composta por um total de 25 municípios e se subdivide em três regiões geográficas imediatas: Petrolina, Araripe e Salgueiro (IBGE, 2017a).

A população total estimada da Região Imediata de Petrolina (Figura 1) para 2018 foi de 988.153 habitantes, distribuídos em

² “As Regiões Geográficas Imediatas têm na rede urbana o seu principal elemento de referência. Essas regiões são estruturadas a partir de centros urbanos próximos para a satisfação das necessidades imediatas das populações, tais como: compras de bens de consumo, busca de trabalho, procura por serviços de saúde e educação e prestação de serviços públicos, como postos de atendimento do Instituto Nacional do Seguro Social (INSS), do Ministério do Trabalho e de serviços judiciários, entre outros. As Regiões Geográficas Intermediárias correspondem a uma escala intermediária entre as Unidades da Federação e as Regiões Geográficas Imediatas. Elas articulam as Regiões Geográficas Imediatas de funções urbanas de maior complexidade, como serviços médicos especializados ou grandes universidades” (Agência IBGE – Notícias, 2017).

uma área total de 35.487,080 km², sendo Petrolina o município mais populoso, com 343.865 habitantes (IBGE, [S.d]). Esta Região se encontra predominantemente inserida nos domínios da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, sendo drenada pela Bacia Hidrográfica do Rio Pontal e de pequenos rios interiores, todos afluentes do São Francisco. De maneira geral, a vegetação da região é composta pela Caatinga hipertermófila, com trechos de floresta caducifólia³. O seu clima é do tipo Tropical Semiárido, com chuvas de verão (IBGE, 2017a).

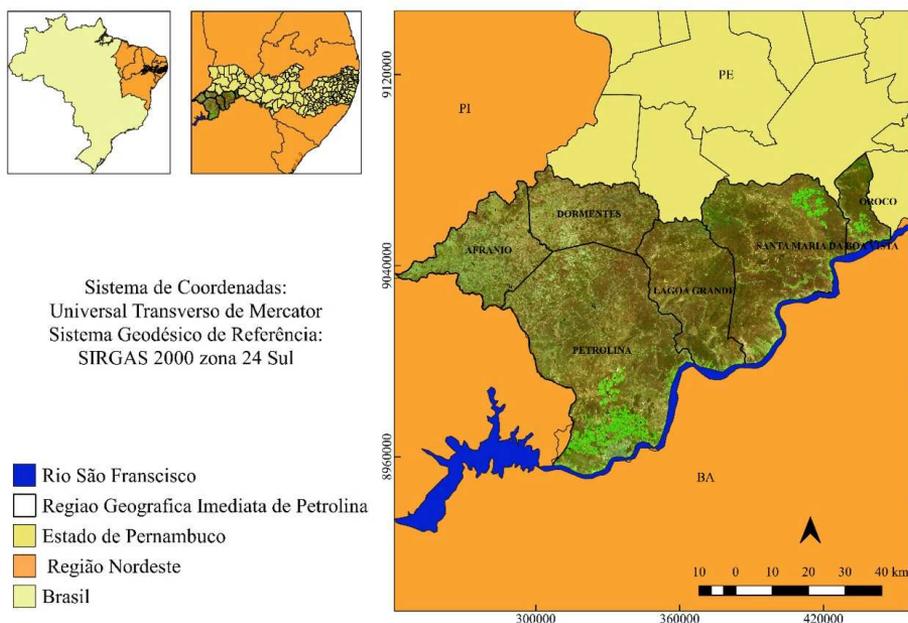


Figura 1. Mapa de localização da área de estudo – Região Geográfica Imediata de Petrolina-PE, Brasil

Fonte: Os autores (2023), a partir de dados do IBGE (2017a).

³ “Que perde as folhas na estação seca ou no inverno (diz-se de planta ou vegetação) (por oposição ao perenifólio)” (Dicio, c2024).

Para complementar a caracterização da área, foram utilizados dados dos setores censitários urbanos⁴, que são, de fato, essencialmente agrícolas e com baixa densidade urbana (IBGE, [s. d.]).

PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

A aquisição e o processamento dos dados orbitais foram realizados a partir da sua implementação, em linguagem de programação *JavaScript*, no editor de código da plataforma de processamento em nuvem *Google Earth Engine* (GEE). Por meio de uma extensa pesquisa, selecionaram-se as imagens disponíveis para a área de estudo, observando a menor incidência de nuvens. Dessa forma, foram escolhidas imagens referentes aos dias 12/12/1991, provenientes do satélite Landsat 5, equipado com o sensor *Thematic Mapper* (TM), e 24/12/2022, provenientes do satélite Landsat 8, equipado com o sensor *Operational Lander Imager* (OLI).

As imagens orbitais e os arquivos vetoriais foram reprojeto para o Sistema Geodésico de Referência SIRGAS 2000 (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas), UTM fuso 24 sul. As imagens SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) foram adquiridas pelo site da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), em conformidade com a delimitação da Região Geográfica Imediata de Petrolina – PE.

As imagens orbitais selecionadas foram dispostas em mosaicos e, em seguida, realizou-se o seu processamento, considerando o

4 São as unidades territoriais utilizadas pelo IBGE para o estabelecimento do Censo Demográfico.

recorte da cena conforme a área de interesse. Para a composição dos mapas, recorreu-se às imagens dos parâmetros biofísicos processados, como o NDVI e o Albedo da Superfície, com os quais utilizou-se a ferramenta de composição de impressão do *software* QGIS, versão 3.16.16. O processamento dos parâmetros biofísicos foi realizado com o editor de códigos GEE. As reflectâncias planetárias corrigidas para cada banda foram obtidas pelos satélites *Landsat 5 TM* e *Landsat 8 OLI*, referentes aos dados de superfície da Terra com correção atmosférica e correspondentes fatores de multiplicação e adição.

O NDVI permite detectar mudanças sazonais e interanuais no desenvolvimento e nas atividades da vegetação, fornecendo informações sobre o perfil temporal de crescimento e de pico de áreas vegetadas. O NDVI varia de -1 a +1, com os valores entre 0 e 1 indicando superfícies com vegetação verde, enquanto valores abaixo de zero predominam em áreas de água ou nuvens (Rouse *et al.*, 1973). O cálculo do NDVI foi realizado aplicando a equação 1:

$$\text{NDVI} = \frac{\rho_{IVp} - \rho_V}{\rho_{IVp} + \rho_V}$$

Em que ρ_{IVp} é a reflectância da banda do infravermelho próximo e ρ_V é a reflectância da banda do vermelho.

O cálculo do Albedo planetário para cada banda, isto é, o Albedo não ajustado à transmissividade atmosférica, foi obtido através

de combinação linear entre as reflectâncias monocromáticas pela equação 2, conforme em Allen *et al.* (2007):

$$\alpha_{toa} = 0,293\rho_1 + 0,274\rho_2 + 0,233\rho_3 + 0,155\rho_4 + 0,032\rho_5 + 0,012\rho_7$$

Em que: $\rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_4, \rho_5$ e ρ_{77} são os Albedos planetários das bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7.

Por sua vez, a transmissividade atmosférica foi definida por Allen *et al.* (2007), tendo sido considerada, em dias de céu claro, a seguinte equação:

$$\tau_{sw} = 0,75 + 2 \cdot 10^{-5} * Z$$

Em que “Z” corresponde à altitude de cada *pixel* representado no Modelo Digital de Elevação (MDE) ou da estação hidrometeorológica da área de estudo.

Para o Albedo da Superfície ou Albedo corrigido, os efeitos atmosféricos (α) corresponderam à equação:

$$\alpha = \frac{\alpha_{toa} - \alpha_p}{\tau_{sw}^2}$$

Em que: α_{toa} é o Albedo planetário, α_p é a porção da radiação solar refletida pela atmosfera, considerado 0,03 conforme Bastiaanssen (2000), e α_{sw} é a transmissividade atmosférica para os dias de céu claro.

Para o processamento das imagens Landsat 8 OLI, executou-se conforme Ruhoff *et al.* (2015): para conversão dos valores quantizados e calibrados (ND) do sistema sensor Landsat 8 OLI para

reflectância espectral, utilizou-se coeficientes radiométricos disponibilizados no arquivo de metadados das imagens da USGS (2018). Para o cálculo de Albedo planetário em imagens do OLI Landsat 8, teve-se a seguinte equação (Silva *et al.*, 2016):

$$\alpha_{toa} = 0,300\rho_2 + 0,276\rho_3 + 0,233\rho_4 + 0,143\rho_5 + 0,035\rho_6 + 0,012\rho_7$$

Por sua vez, a transmissividade atmosférica foi definida por Allen *et al.* (2007), tendo sido considerada, em dias de céu claro, a seguinte equação:

$$\tau_{sw} = 0,75 + 2 \cdot 10^{-5} \cdot Z$$

Em que: “Z” corresponde à altitude de cada *pixel* representado no MDE ou da estação hidrometeorológica da área de estudo.

Para o Albedo da Superfície ou Albedo corrigido, os efeitos atmosféricos (α) corresponderam à equação:

$$\alpha = \frac{\alpha_{toa} - \alpha_p}{\tau_{sw}^2}$$

Em que: α_{toa} é o Albedo planetário; α_p é a porção da radiação solar refletida pela atmosfera, considerado 0,03 conforme Bastiaanssen (2000); e τ_{sw} é a transmissividade atmosférica para os dias de céu claro.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os municípios que compõem a Região Imediata de Petrolina possuem, todos, maior área rural, exceto nas regiões que compreendem seus centros urbanos, em especial no município de Petrolina, que configura uma área urbana de baixa densidade apesar do alto número de edificações em seu centro (representado pela coloração vermelha), como detalha a Figura 2.

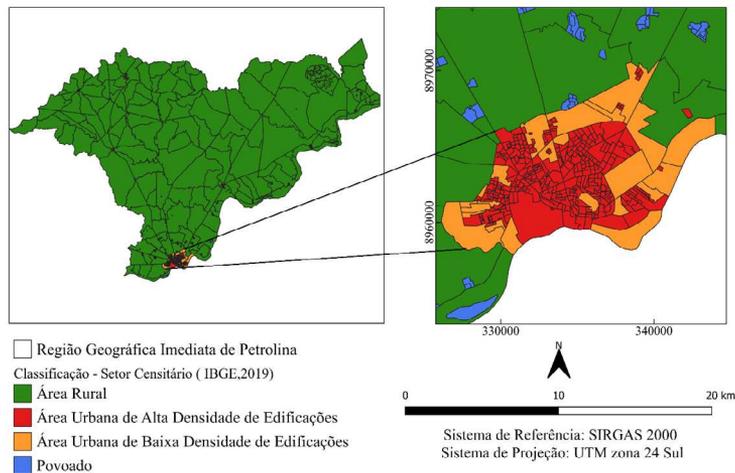


Figura 2. Distribuição espacial dos setores censitários da Região Imediata de Petrolina-PE
 Fonte: Os autores (2023), com dados fornecidos pelo IBGE (2017a).

No período estudado, foram evidenciadas mudanças nos valores dos parâmetros físicos NDVI (Figuras 3 e 4), Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (*Soil Adjusted Vegetation Index – SAVI*) (Figura 5) e Albedo da Superfície (Figura 6), ou seja: imagens orbitais com dinâmica temporal de 31 anos, quando esse período coincide com a expansão da agricultura irrigada na região. A Figura 3 demons-

tra que essas variações tendem a ser maiores na data mais recente (24/12/2022) de captura, envolvendo as áreas rurais desses municípios.

Ao analisar as classes que apresentam valores menores que 0 (zero), notou-se a representação das áreas de corpo hídrico, destacando-se um recorte do rio São Francisco que permeia os municípios de Petrolina, Lagoa Grande, Santa Maria da Boa Vista e Orocó, como pode ser evidenciado no mapa de localização apresentado anteriormente na Figura 1.

Observou-se nos municípios de Afrânio, Dormentes, Santa Maria da Boa Vista, Orocó, Lagoa Grande e Petrolina valores mais baixos de NDVI, classificados entre 0,00 e 0,10 (coloração laranja), denotando uma menor presença ou vigor da vegetação. Tal fato pode estar relacionado com várias condições, como a ausência de vegetação, a vegetação desidratada ou a cobertura vegetal escassa. Constatou-se que a região que compreende os centros urbanos dos municípios da Região Geográfica Imediata de Petrolina encontra-se com valores próximos a zero (0,00 – 0,10), conforme a Figura 4.

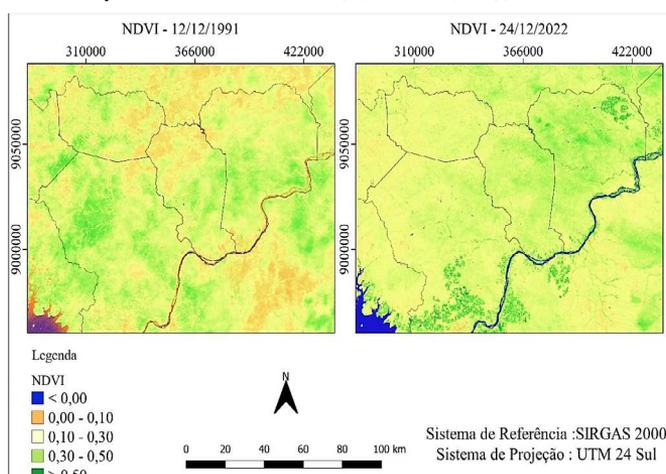


Figura 3. NDVI da Região Imediata de Petrolina entre os anos de 1991 e 2022
Fonte: Os autores (2023).

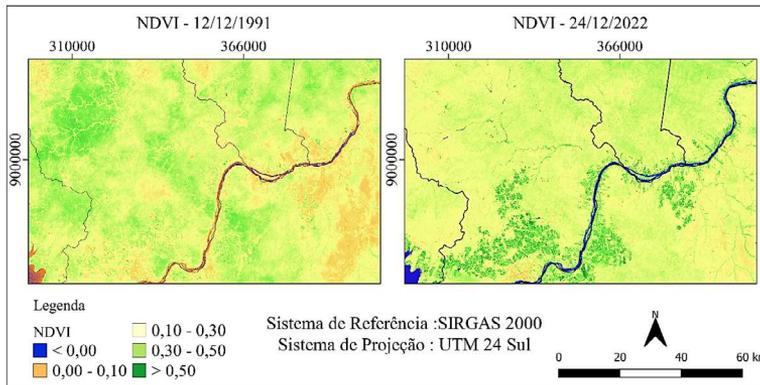


Figura 4. Recorte do município de Petrolina (NDVI), destacando área irrigada
Fonte: Os autores (2023).

Pesquisas realizadas por Alademomi *et al.* (2022) constataram que o NDVI é utilizado para quantificar a densidade da vegetação e analisar as mudanças fisiográficas da planta. Os autores evidenciaram que o NDVI é um dos parâmetros biofísicos mais amplamente utilizados para monitoramento regional e global da dinâmica da vegetação, fato que concorda com esta presente pesquisa, que proporciona a visualização georreferenciada com efetiva nitidez da dinâmica da vegetação nas datas estudadas entre os municípios de Lagoa Grande e Petrolina (Figura 4).

Na Tabela 1, foi observada a variação estatística do índice entre os anos de análise, evidenciando-se a variação dos valores do NDVI para o ano de 2022, em comparação com o ano de 1991. É notável que ocorreu um aumento da densidade vegetativa da área de estudo no ano de 2022, indicado pela elevação nos valores do NDVI. A região que compreende a Região Geográfica Imediata de Petrolina apresentou valores de NDVI entre 0,10 e 0,30, caracterizando área com vegetação de baixo porte.

Data	Máx	Média	Min	Desvio Padrão
12/12/1991	0,695	0,281	-0,279	0,110
24/12/2022	0,850	0,301	-0,980	0,109

Tabela 1. Dados estatísticos do NDVI nos anos de 1991 e 2022

Fonte: Os autores (2023).

Na Figura 5, pode-se observar o SAVI processado para a Região Imediata de Petrolina nos anos de 1991 e 2022:

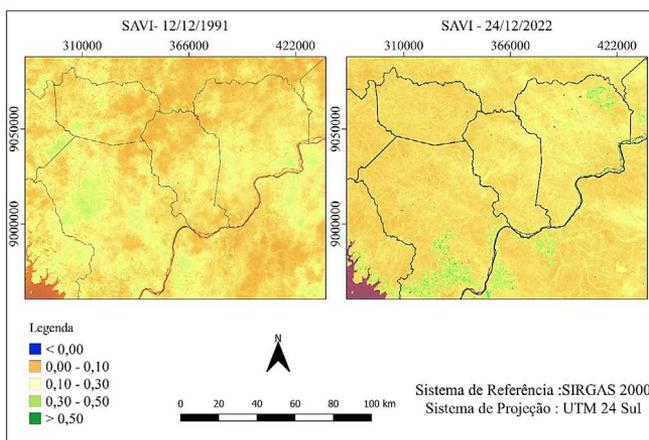


Figura 5. SAVI da Região Imediata de Petrolina nos anos de 1991 a 2022

Fonte: Os autores (2023).

O Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (*Soil Adjusted Vegetation Index – SAVI*), onde foi introduzido um fator no NDVI para incorporar o efeito do solo, destacou-se nas áreas pesquisadas principalmente no ano de 2022 no que concerne espaços com solo exposto, e também se evidenciaram áreas com perímetro irrigado na região. Notou-se que os maiores valores do índice SAVI compreenderam o intervalo entre 0,30 e 0,50 para essa área de estudo, na qual predomina a agricultura irrigada. Evidenciou-se que as regiões demarcadas por menores valores de SAVI apresentaram menores valores

de NDVI também, classificados como o intervalo de ($<0,00$), sendo áreas de corpo hídrico.

Conforme observado na Tabela 2, houve uma leve diminuição do valor do SAVI no ano de 2022, em comparativo com o ano de 1991, o que é justificado pelas alterações no uso e na ocupação do solo e na identificação de áreas irrigadas.

Data	Máx	Média	Min	Desvio Padrão
12/12/1991	0,543	0,161	-0,162	0,065
24/12/2022	0,691	0,155	-0,275	0,071

Tabela 2. Dados estatísticos do SAVI nos anos de 1991 e 2022

Fonte: Os autores (2023).

A análise do índice ressaltou que nos municípios de Petrolina e de Santa Maria da Boa Vista, regiões demarcadas por maiores valores de SAVI, há uma maior predominância de valores positivos. Para o ano de 1991, foram observados valores entre -0,162 e 0,543, indicando uma predominância de cobertura terrestre não construída na área analisada. Já para o ano de 2022, notou-se uma expansão das áreas com intervalo de 0,30 e 0,50 do índice, classificadas por valores de SAVI maiores do que 0,30, corroborando com o resultado destacado pelo NDVI de que nessa região ocorreu uma melhora da saúde da cobertura vegetal ao longo dos anos de análise.

A análise do Albedo (Figura 6) indicou que os valores registrados nas regiões dos municípios de Afrânio, Dormentes, Santa Maria da Boa Vista, Orocó, Lagoa Grande e Petrolina foram classificados entre 16% e 20%, havendo, ainda, a presença de valores superiores a 30%, identificados pela coloração vermelha na imagem. O ano de 1991 apresentou, como valor máximo do índice, 29%, sendo

inferior ao valor máximo evidenciado no ano de 2022, que foi de 86% (Tabela 3).

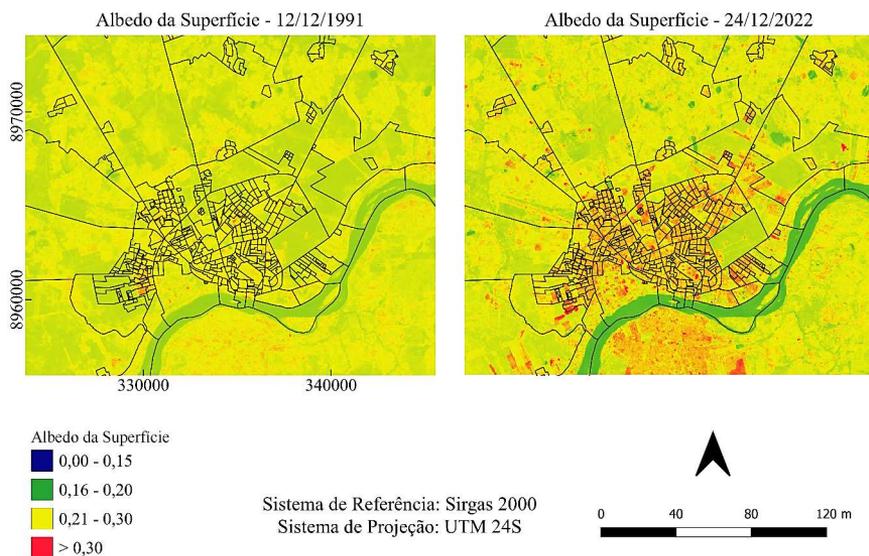


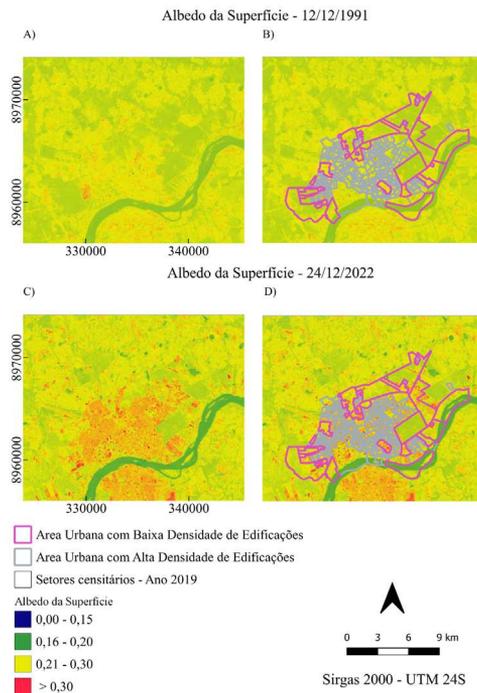
Figura 6. Albedo da Superfície da Região Imediata de Petrolina nos anos de 1991 a 2022
Fonte: Os autores (2023).

Data	Máx	Média	Min	Desvio Padrão
12/12/1991	0,29	0,15	0,08	0,02
24/12/2022	0,86	0,16	0,05	0,06

Tabela 3. Dados estatísticos do Albedo da Superfície nos anos de 1991 e 2022
Fonte: Os autores (2023).

Conforme detalha a Figura 6, foram evidenciadas alterações nos índices de Albedo da Superfície ao longo do período de 31 anos analisado. Notavelmente, esse período coincide com a expansão da agricultura irrigada na região, o que, em parte, justifica as variações observadas, as quais foram mais expressivas na data mais recente observada, particularmente nas áreas rurais dos municípios estudados, que são predominantemente caracterizados por atividades agrícolas e pela baixa densidade urbana (IBGE, 2017a).

Nas imagens, as áreas nas cores azul e verde (predominantes em alguns municípios) apresentaram menor Albedo da Superfície percentual, variando aproximadamente de 0 a 15%, e foram caracterizadas pelos corpos hídricos superficiais (inferior direito da Figura 6) e pelo domínio da vegetação nativa de Caatinga bem preservada (cores em verde escuro). Entretanto, à medida que o agronegócio se expandiu, essas áreas foram convertidas em áreas



cultivadas e passaram a apresentar o Albedo da Superfície com percentuais de 20%.

Figura 7. Albedo da Superfície, catalogado com dados de setores censitários da Região Imediata de Petrolina-PE fornecidos pelo IBGE

Fonte: Autores (2023), com dados fornecidos pelo IBGE (2017a).

Foi observado que, em 1991, as áreas delimitadas pelo IBGE (Delimitação de Setores Censitários em 2019) como regiões urba-

nizadas de baixa densidade de edificações (destaque em coloração magenta) foram classificadas como áreas com presença de vegetação de classe 16% a 20%, como apontam as Figuras 7A e 7B.

A imagem que corresponde ao ano de 2022 (Figuras 7C e 7D) traz a delimitação da área urbanizada de alta densidade de edificações (destaque em coloração cinza), a qual coincide com a região em que o Albedo denotou os maiores valores, corroborando com a afirmativa de que os maiores percentuais de Albedo representam áreas urbanas. Resultados semelhantes foram encontrados no trabalho de Pavão *et al.* (2015), quando estes avaliaram o Albedo da Superfície em diversos pontos estratégicos no sudoeste da Amazônia para caracterizar as feições presentes no local.

Nos últimos 30 anos, a região tem passado por significativas transformações no uso e na ocupação do solo, abrangendo vastas áreas rurais. Essas mudanças são resultados de políticas públicas consecutivas que apoiaram o financiamento, à pesquisa e o desenvolvimento do agronegócio, focado principalmente na fruticultura irrigada para fins de exportação. Esse abrangente processo trouxe benefícios substanciais para segmentos econômicos locais e regionais, contudo, necessita-se de mais pesquisas e ações em relação aos impactos ambientais dessas medidas sobre o ecossistema da Caatinga, à medida que a vegetação nativa é substituída por extensas zonas cultivadas, em especial por perímetros irrigados.

CONCLUSÃO

A aplicação das técnicas de sensoriamento remoto para a análise da expansão urbana e da alteração no uso e na ocupação do solo

da RGI de Petrolina apresentou elevada eficiência. O uso do processamento em nuvem do *Google Earth Engine* para tratamento das imagens georreferenciadas e cálculo dos parâmetros biofísicos como NDVI, SAVI e Albedo da Superfície demonstraram precisão e rapidez.

A análise do NDVI identificou uma elevação do valor do índice para o ano de 2022, em comparação com o ano de 1991, denotando a ocorrência de um aumento no vigor vegetativo da área de estudo, em especial nos perímetros irrigados em Petrolina. A análise das cartas georreferenciadas indicaram valores mais altos de NDVI nos municípios de Petrolina e de Santa Maria da Boa Vista.

Os valores obtidos pelo processamento do SAVI e do Albedo da Superfície corroboraram com os resultados analisados do NDVI. Assim, evidenciou-se que houve uma pequena diminuição do valor do SAVI e aumento para o Albedo da Superfície no ano de 2022, também em comparativo com o ano de 1991, sendo isso justificado pelas alterações no uso e na ocupação do solo, bem como a expansão urbana e das áreas irrigadas com todos os fatores evidenciados, principalmente no município de Petrolina.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES pela bolsa de doutorado de Débora Almeida (Processo número 88887.827976/2023-00), à FACEPE pela bolsa de doutorado de Haylla Rebeka (IBPG-1657-3.01/21) e pela bolsa de pesquisa de Ubiratan Joaquim (BFI-2783-3.01/22).

REFERÊNCIAS

- ALADEMOMI, A. S. *et al.* The interrelationship between LST, NDVI, NDBI, and land cover change in a section of Lagos metropolis, Nigeria. *Applied Geomatics*, [s. l.], v. 14, p. 299-314, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12518-022-00434-2>. Acesso em: 15 jan. 2024.
- ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; TREZZA, R. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) – Model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Reston, v. 133, n. 4, 2007. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/228615269_Satellite-Based_Energy_Balance_for_Mapping_Evapotranspiration_With_Internalized_Calibration_METRIC_-_Model.. Acesso em: 15 jan. 2024.
- BASTIAANSEN, W. G. M. SEBAL based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. *Journal of Hydrology*, Oxford, v. 229, n. 1-2, p. 87-100, 2000. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169499002024?via%3Dihub>. Acesso em: 15 jan. 2024.
- CADUCIFÓLIO. In: DICIO: Dicionário Online de Português. 7GRAUS, c2024. Disponível em: <https://www.dicio.com.br/caducifolio/>. Acesso em: 11 jan. 2024.
- COSTA, E. C. P.; AUGUSTO, R. C.; SEABRA, V. S. Análise da eficiência dos índices Built-up e NDBI para classificação de áreas urbanas em imagens Landsat 8 OLI. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 18., 2017, Santos. *Anais* [...]. Santos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2017. p. 6632-6639.
- EDITOR DE CÓDIGOS. *Google Earth Engine*, [S. d]. Disponível em: <https://code.earthengine.google.com/>. Acesso em: 12 jul. 2023.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Divisão regional do Brasil em regiões geográficas imediatas e regiões geográficas intermediárias*: 2017. Rio de Janeiro: IBGE, 2017a. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=2100600>. Acesso em: 14 jul. 2023.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Área dos Municípios: 2017b. *IBGE*, [s.d.]. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/estrutura-territorial/15761-areas-dos-municipios.html?=&t=o-que-e>. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Acesso em: 15 jul. 2023.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Estimativas da População. *IBGE*, 2018. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9103-estimativas-de-populacao.html?=&t=o-que-e>. Acesso em: 15 jul. 2023.

IBGE DIVULGA nova divisão territorial com foco nas articulações regionais. *Agência IBGE – Notícias*, 2017. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/10515-ibge-divulga-nova-divisao-territorial-com-foco-nas-articulacoes-regionais>. Acesso em: 11 jan. 2024.

IPAM - Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia. *Albedo*. In: Glossário. Brasília. Ipam, 2024.

JENSEN, J. R. *Sensoriamento Remoto do Ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres*. 2 ed. São José dos Campos: Editora Parêntese, 2009. 604 p.

KIRSCHBAUM, M. U. F. *et al.* Implications of Albedo changes following afforestation on the benefits of forests as carbon sinks. *Biogeosciences*, [S. l.], v. 8, n. 12, p. 3687-3696, 2011. Disponível em: <https://bg.copernicus.org/articles/8/3687/2011/bg-8-3687-2011.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2024.

MOURA, V. C. S. *Impactos ambientais da urbanização: esforços da pesquisa brasileira e mapeamento e percepção de moradores na cidade de Santarém, Pará*. 2019. 107 p. Dissertação (Mestrado em Sociedade, Ambiente e Qualidade de Vida) – Programa de Pós-Graduação em Sociedade, Ambiente e Qualidade de Vida, Centro de Formação Interdisciplinar da Universidade Federal do Oeste do Pará, Universidade Federal do Oeste do Pará, Santarém, 2019. Disponível em: https://repositorio.ufopa.edu.br/jspui/bitstream/123456789/137/1/Disserta%c3%a7ao_Impactosambientaisdaurbanizacao.pdf. Acesso em: 15 jan. 2024.

PAVÃO, V. M. *et al.* Temperatura e Albedo da superfície por imagens TM Landsat 5 em diferentes usos do solo no sudoeste da Amazônia brasileira (nota de pesquisa). *Revista Brasileira De Climatologia*, Curitiba, v. 16,

2015. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/40128/26012>. Acesso em: 15 jan. 2024.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS (Earth Resources Technology Satellite). *Proceedings of 3rd Earth Resources Technology Satellite Symposium, Greenbelt*, v. 1, p. 309-317, 1974. Disponível em: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19740022614/downloads/19740022614.pdf>. Acesso em: 16 jan. 2024.

RUHOFF, A. L.; NOVO, B.B. da S.; ROCHA, H.R. da. Determinação da irradiância solar no topo da atmosfera para cálculo do Albedo e balanço de energia a partir de imagens LANDSAT 8 OLI. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 17., 2015, João Pessoa. *Anais [...]*. João Pessoa: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2015. p. 4496-4502.

SANTOS, K. A.; RUFINO, I. A.; BARROS FILHO, M. N. *Impactos da ocupação urbana na permeabilidade do solo: o caso de uma área de urbanização consolidada em Campina Grande – PB. Engenharia Sanitária e Ambiental*, Rio de Janeiro, v. 22, n. 5, p. 943-952, 2017. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/yMBFbMh7WdYmfw9H9KH9bhn/?lang=pt&format=pdf>. Acesso em: 16 jan. 2024.

SILVA, B. B.; LOPES, G. M.; AZEVEDO, P. V. Determinação do Albedo de áreas irrigadas com base em imagens Landsat 5-TM. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v. 13, n. 2, p. 201-211, 2005. Disponível em: <http://www.sbagro.org/index.php?page=biblioteca&q=Determina%E7%E3o%20do%20Albedo%20de%20%E1reas%20irrigadas%20com%20base%20em%20imagens>. Acesso em: 16 jan. 2024.

SILVA, B. B. *et al.* *Procedures for calculation of the Albedo with OLI-Landsat 8 images: application to the Brazilian semi-arid. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 20, n. 1, p. 3-8, 2016. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/sX6cJjNXWMfHQ5p4h33B8Zz/?lang=en&format=pdf>. Acesso em: 16 jan. 2024.

USGS – United States Geological Survey. Landsat Missions. USGS, 2018. Disponível em: <https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat>. Acesso em: 22 ago. 2023.