

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

ÍNDICES ESPECTRAIS COMO FERRAMENTA PARA ANÁLISE DA URBANIZAÇÃO E COBERTURA DO SOLO: ESTUDO DE CASO NO BAIRRO LÍRIO DO VALE - MANAUS/AM

Jossandra Alves Damasceno Oka¹; Daniel Andres Rodriguez² & Otto Corrêa Rotunno Filho³

Abstract: This study investigates urban expansion and its corresponding impacts on land use and land cover in the Lório do Vale neighborhood, located in Manaus, Brazil, by means of classification procedures applied to satellite images acquired through remote sensing. The main objective is to assess the evolution of the urban footprint and vegetation loss between the years 2014 and 2024. Based on Landsat 8 satellite imagery, the normalized difference vegetation index (NDVI) and the normalized difference built-up index (NDBI) were calculated to quantify spatial and temporal changes. The results indicated a 10% increase in exposed soil areas and a 9.8% growth in zones undergoing urbanization (such as construction sites). At the same time, there was a reduction of 11% in sparse or regenerating vegetation and a 10.7% decrease in open forest areas. These findings highlight the intensification of urbanization in the Lório do Vale neighborhood, showing a direct correlation between built-up area growth and the suppression of vegetation, with relevant implications for local and regional urban and environmental planning.

Resumo: Este estudo investiga a expansão urbana e correspondentes efeitos sobre o uso e a cobertura do solo no bairro Lório do Vale, em Manaus/AM, por meio de técnicas de classificação de imagens de satélite adquiridas por sensoriamento remoto. O principal objetivo consiste em avaliar a evolução da mancha urbana e a supressão da vegetação entre os anos de 2014 e 2024. Utilizando imagens do satélite Landsat 8, foram calculados o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) e o índice de áreas construídas por diferença normalizada (NDBI), permitindo quantificar as alterações espaciais e temporais. Os resultados indicaram um aumento de 10% nas áreas de solo exposto e de 9,8% em zonas em processo de urbanização, como, por exemplo, canteiros de obras. Simultaneamente, observou-se uma redução de 11% na vegetação esparsa ou em regeneração e de 10,7% nas florestas abertas. A análise evidenciou a intensificação da urbanização no bairro estudado, revelando uma correlação direta entre o crescimento da área edificada e a perda de cobertura vegetal, com implicações relevantes para o planejamento ambiental e urbano local e regional.

Palavras-Chave – Sensoriamento Remoto, Mapeamento Urbano , Urbanização

INTRODUÇÃO

O crescimento acelerado, muitas vezes desordenado, dos centros urbanos brasileiros tem gerado profundas transformações no uso e ocupação do solo, com significativos impactos ambientais, resultando especialmente na perda da cobertura vegetal (Rocha *et al.*, 2023). A supressão da

1) Doutoranda no Programa de Engenharia Civil (PEC) em Recursos Hídricos e Meio Ambiente, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, jossandra.oka@coc.ufri.br

2) Professor do Programa de Engenharia Civil, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, daniel.andres@coc.ufri.br

3) Professor do Programa de Engenharia Civil, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, otto@coc.ufri.br

vegetação e a exposição do solo afetam diretamente a qualidade ambiental das cidades, comprometendo não apenas o equilíbrio dos ecossistemas, mas também influenciando as condições climáticas locais e a disponibilidade de recursos hídricos (Guilherme *et al.*, 2020).

Diante do cenário exposto, cabe notar que Manaus constitui um exemplo notável do processo de alteração substancial das condições ambientais e hídricas em um intervalo de tempo que abrange sobretudo as últimas seis décadas. A capital amazonense, um dos principais polos de trabalho da região norte do Brasil, atrai um intenso fluxo migratório, o que demanda um planejamento urbano eficiente para conciliar o desenvolvimento da cidade com a preservação de seu valioso ambiente natural. (Melo, 2024) No entanto, a gestão ambiental em cidades de grande extensão territorial e com acentuadas desigualdades sociais, como Manaus, enfrenta desafios consideráveis no controle e na fiscalização do avanço do desmatamento e da ocupação irregular. O bairro Lírio do Vale, situado na zona centro-oeste de Manaus, destaca-se como um território urbano que reflete intensamente essa transformação. Segundo os dados do Sindicato da Indústria da Construção Civil do Amazonas (Sinduscon) (2020, apud Melo, 2024), o bairro é uma das regiões de maior atuação do setor imobiliário, passando por um processo de expansão populacional acelerado com impactos na drenagem natural, na qualidade ambiental e na configuração socioespacial.

Por outro lado, o sensoriamento remoto emerge como uma ferramenta geotecnológica indispensável para o monitoramento hídrico-ambiental, oferecendo a alternativa de realizar análises espaço-temporais qualitativas e quantitativas da paisagem de forma ágil e precisa (Guilherme *et al.*, 2020). Nesse sentido, o procedimento de reconhecimento de padrões mediante a aplicação de índices espectrais, como, por exemplo, o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), torna viável quantificar e qualificar a cobertura vegetal, distinguindo-a de outras classes de uso e cobertura do solo, nomeadamente áreas urbanas e corpos de água (Lacerda, 2021). Some-se a essa perspectiva o fato de que o NDVI guarda, até certo grau, na escala da bacia hidrográfica, uma relação física com a variabilidade de componentes do balanço hídrico, notadamente precipitação e evaporação, bem como com o comportamento da variável de estado umidade solo. Adicionalmente, cabe ressaltar que a formação das ilhas de calor urbano (ICU) tornou-se um problema relativamente novo, mas persistente no século XXI, impulsionado pela intensa urbanização e industrialização (Lemos *et al.*, 2019). Essas ilhas resultam, por sua vez, da alteração da quantidade de energia solar absorvida pela superfície terrestre devido a mecanismos físicos, como a substituição de vegetação por áreas construídas e a pavimentação asfáltica, o que leva ao aumento da temperatura da superfície e do ar (Rafael, 2014).

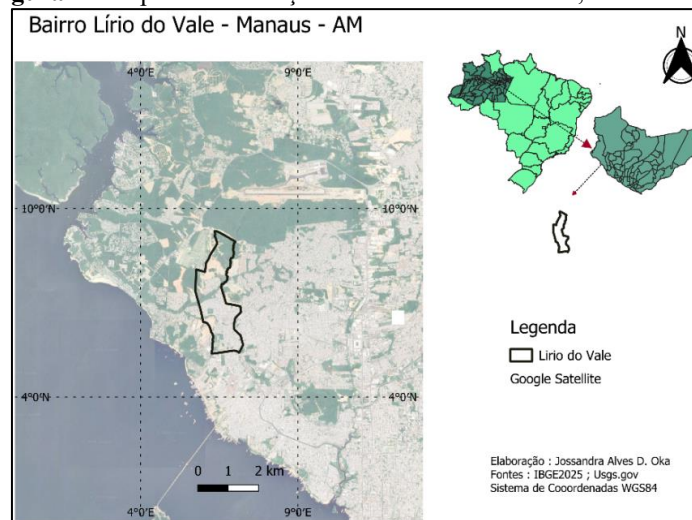
Diante do exposto, o presente trabalho objetivou mapear e analisar as transformações da cobertura e uso do solo no bairro Lírio do Vale, bem como investigar a evolução da urbanização, por meio de técnicas de sensoriamento remoto. A análise multitemporal, na medida em que compara dados de 2014 e de 2024, busca oferecer uma compreensão abrangente da dinâmica entre o crescimento urbano e o ambiente natural, fornecendo subsídios para o planejamento urbano e regional bem como efetuando a gestão ambiental no contexto da Amazônia urbana.

METODOLOGIA

Área de Estudo

A área de estudo compreende o bairro Lírio do Vale, localizado na zona centro-oeste de Manaus, capital do estado do Amazonas. O bairro é caracterizado por um forte dinamismo urbano e significativas alterações nos padrões de uso e cobertura do solo.

Figura 2 – Mapa de localização do bairro Lírio do Vale, Manaus/AM



Fonte: Autor, 2025

Aquisição e Processamento de Dados

Para a realização deste estudo, foram utilizadas imagens do satélite Landsat 8, obtidas gratuitamente na plataforma Earth Explorer do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS) (Figura 2). As imagens selecionadas e suas características são:

ID: LC08_L2SP_231062_20140706_20200911_02_T1

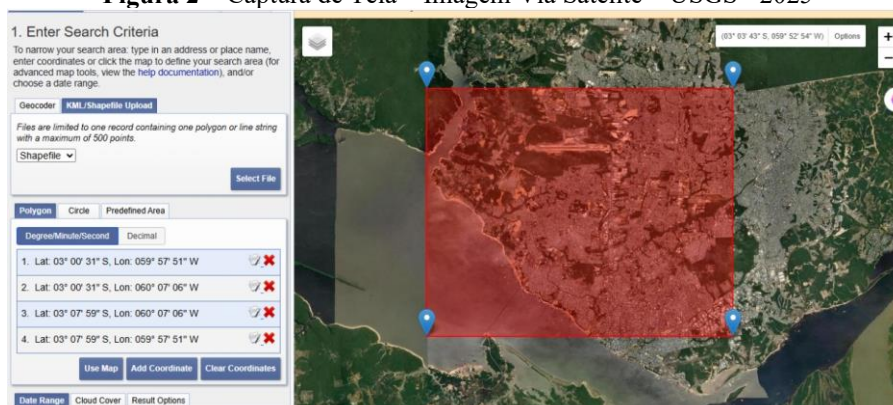
Data de Aquisição: 06/07/2014

ID: LC08_L2SP_231062_20241021_20241029_02_T1

Data de Aquisição: 21/10/2024

O satélite Landsat 8 possui o sensor imageador terrestre operacional (em inglês, *Operational Land Imager* - OLI), que capta nove (9) bandas, e o sensor infravermelho termal (*Thermal Infrared Sensor* - TIRS). Para a análise de urbanização e cobertura do solo, foram utilizadas as bandas relevantes para os índices espectrais. As imagens foram selecionadas com base na menor cobertura de nuvens.

Figura 2 – Captura de Tela – Imagem Via Satélite – USGS - 2025



O pré-processamento das imagens incluiu a conversão da radiância espectral para refletância planetária corrigida para efeitos atmosféricos, resultando na refletância de superfície. Para o mapeamento da vegetação, foi utilizado o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), que é um dos índices mais amplamente utilizados na literatura devido às suas propriedades espectrais na região do visível e do infravermelho próximo (Muniz e Rotunno Filho, 2013). O NDVI é calculado

pela razão entre as refletâncias do infravermelho próximo e do vermelho, conforme a Equação 1 (Guilherme *et al.*, 2020; Kshetri, 2018; Viana *et al.*, 2011):

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} + \rho_{Red}}{\rho_{NIR} - \rho_{Red}} \quad (1)$$

onde ρ_{NIR} representa a refletância no infravermelho próximo (banda 5 para Landsat 8) e ρ_{Red} a refletância no vermelho (banda 4 para Landsat 8). Os valores de NDVI variam de -1 a +1, onde valores mais altos indicam maior densidade de vegetação (Kshetri, 2018). Baseado nessas informações, utilizaram-se os dados da Tabela 1.

Tabela 1 – NDVI – Descrição dos padrões de vegetação.

Intervalo de NDVI	Descrição da Vegetação
0.6 a 1.0	Vegetação densa e muito saudável
0.4 a 0.6	Vegetação moderadamente densa e saudável
0.2 a 0.4	Vegetação esparsa ou em recuperação
0.1 a 0.2	Vegetação estressada, pastagens degradadas
0.0 a 0.1	Solo exposto, grama seca, áreas de baixa biomassa
-0.1 a 0.0	Áreas urbanas, construções, solo nu
-0.2 a -0.1	Rochas, solo muito seco
-0.5 a -0.2	Água, neve ou nuvens
-1.0 a -0.5	Água profunda, corpos d'água grandes, sombra

Fonte: adaptado de Kshetri (2018) e Muniz e Rotunno Filho (2013).

Para a quantificação de áreas construídas e solo exposto, foi empregado o índice de áreas construídas por diferença normalizada (NDBI), calculado pela Equação 2 (Kshetri, 2018; Guilherme *et al.*, 2020):

$$NDBI = \frac{SWIR + NIR}{SWIR - NIR} \quad (2)$$

Para a plataforma Landsat 8, a faixa SWIR corresponde à banda 6, enquanto a faixa do infravermelho próximo (NIR) está associada à banda 5 (Kshetri, 2018). Valores positivos de NDBI representam áreas construídas e solo exposto, enquanto valores negativos indicam corpos de água e vegetação. Baseado nessas informações, utilizaram-se os dados da Tabela 2.

Tabela 2 – NDBI – Descrição dos padrões de vegetação.

Intervalo de NDBI	Descrição da Vegetação
0,2 a 1,0	Áreas Urbanas Densa/Construções
0,1 a 0,2	Áreas Urbanas Escassas/Solo Nu (áreas em urbanização, canteiros de obras)
0,0 a 0,1	Solo Exposto/Áreas de Transição (solos agrícolas, pastagens degradadas, margens urbanas)
-0,1 a 0,0	Vegetação Esparsa/Campos (vegetação rasteira, pastagens, agricultura leve)
-0,2 a -0,1	Vegetação Moderada (florestas abertas, áreas agrícolas densas)
-1,0 a -0,2	Vegetação Densa/Corpos d'Água (florestas densas, água profunda, neve/nuvens)

Fonte: adaptado de Kshetri (2018) e Muniz e Rotunno Filho (2013).

Além disso, para auxiliar na distinção de corpos de água, áreas úmidas e solos, foi utilizado o índice de água modificado por diferença normalizada (MDBWI), desenvolvido por Xu (2006) para aprimorar a detecção de feições de água aberta. Esse índice utiliza as bandas do verde e infravermelho

de onda curta (SWIR). Para o Landsat 8, esse procedimento corresponderia à banda 3 (*Green*) e à banda 6 (SWIR). A fórmula geral do NDWI, segundo o qual se baseia o MDBWI, é:

$$MDBWI = \frac{GREEN+SWIR}{GREEN-SWIR} \quad (3)$$

A classificação das imagens foi realizada por meio de técnica de classificação não supervisionada (método K-médias), que agrupa os píxeis com base em similaridade espectral. As classes de uso e cobertura do solo foram definidas com base nas características espectrais e no conhecimento da área, buscando categorizar a vegetação (densa, esparsa, estressada), o solo exposto, as áreas de transição e as áreas urbanas (escassas e densas), bem como corpos de água. Baseado nessas informações, utilizaram-se os dados da Tabela 3.

Tabela 3 – MNDWI – Descrição dos padrões de vegetação.

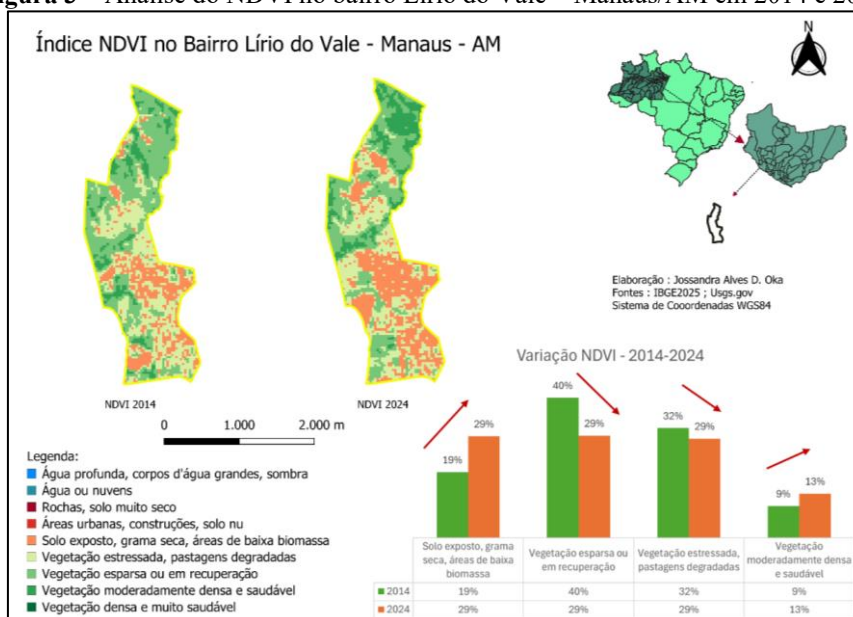
Intervalo de MNDWI	Descrição da Vegetação
0,2 a 1,0	Água (Alta Confiança)
0,0 a 0,2	Água Rasa / Áreas Úmidas / Transição
-0,2 a 0,0	Solo Úmido / Áreas Urbanas / Sombra
-0,5 a -0,2	Vegetação Densa / Solo Exposto
-1,0 a -0,5	Vegetação Seca / Solo Seco / Nuvens

Fonte: adaptado de Kshetri (2018); Muniz e Rotunno Filho(2013).

RESULTADOS

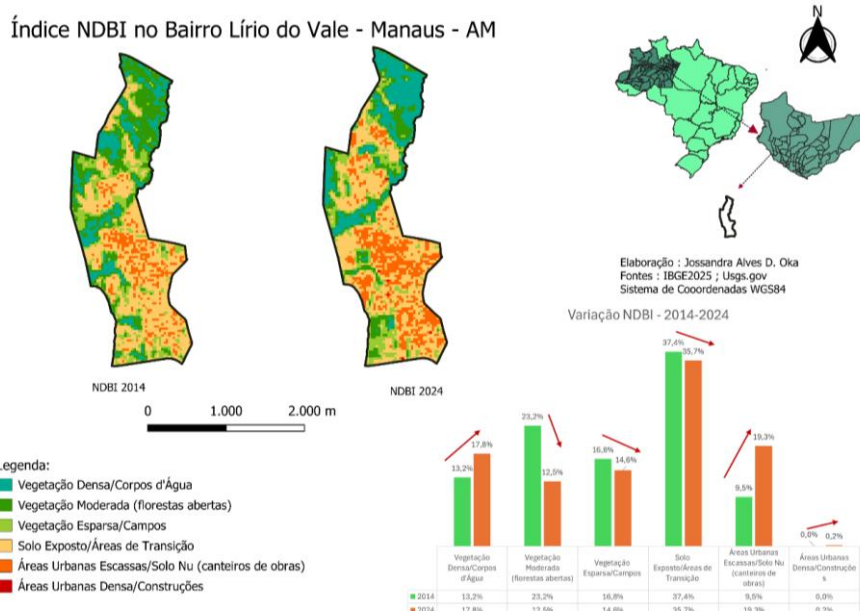
Os resultados obtidos mostram as transformações significativas na cobertura e uso do solo no bairro Lírio do Vale entre 2014 e 2024, evidenciando o avanço da urbanização. A análise por NDVI (Figura 3) revelou um aumento de 10% nas áreas classificadas como "*Solo exposto, grama seca, áreas de baixa biomassa*" entre 2014 e 2024, passando de 19% para 29% da área total (Figura 1). Esse dado é um forte indicativo da crescente supressão vegetal e da exposição do solo no bairro. Houve uma diminuição expressiva de 11% na "*Vegetação esparsa ou em recuperação*" (de 40% para 29%) e de 3% na "*Vegetação estressada, pastagens degradadas*" (de 32% para 29%). Embora a "*Vegetação moderadamente densa e saudável*" tenha apresentado um leve aumento de 4% (de 9% para 13%), esse crescimento não compensa as perdas nas outras categorias de vegetação, o que sugere uma degradação líquida da cobertura vegetal no bairro Lírio do Vale.

Figura 3 – Análise do NDVI no bairro Lírio do Vale – Manaus/AM em 2014 e 2024.



O NDBI, mostrado na Figura 4, corrobora a expansão urbana de forma mais direta, mostrando um aumento de 9,8% nas "*Áreas Urbanas Escassas/Solo Nu (canteiros de obras)*", que passaram de 9,5% para 19,3% da área total. Notavelmente, a categoria "*Áreas Urbanas Densa/Construções*" surgiu em 2024, representando 0,2% da área, inexistente em 2014, o que confirma a consolidação de novas construções no bairro. A "*Vegetação Moderada*" sofreu uma redução acentuada de 10,7% (de 23,2% para 12,5%), reforçando a ideia de que a urbanização está avançando sobre áreas florestadas e de menor densidade. A "*Vegetação Escassa/Campos*" também teve uma diminuição de 2,2%, e "*Solo Exposto/Áreas de Transição*" diminuiu 1,7%. Curiosamente, a categoria "*Vegetação Densa/Corpos de água*" apresentou um aumento de 4,6%, o que pode ser um reflexo de dinâmicas específicas ou da categorização que agrupa esses dois elementos.

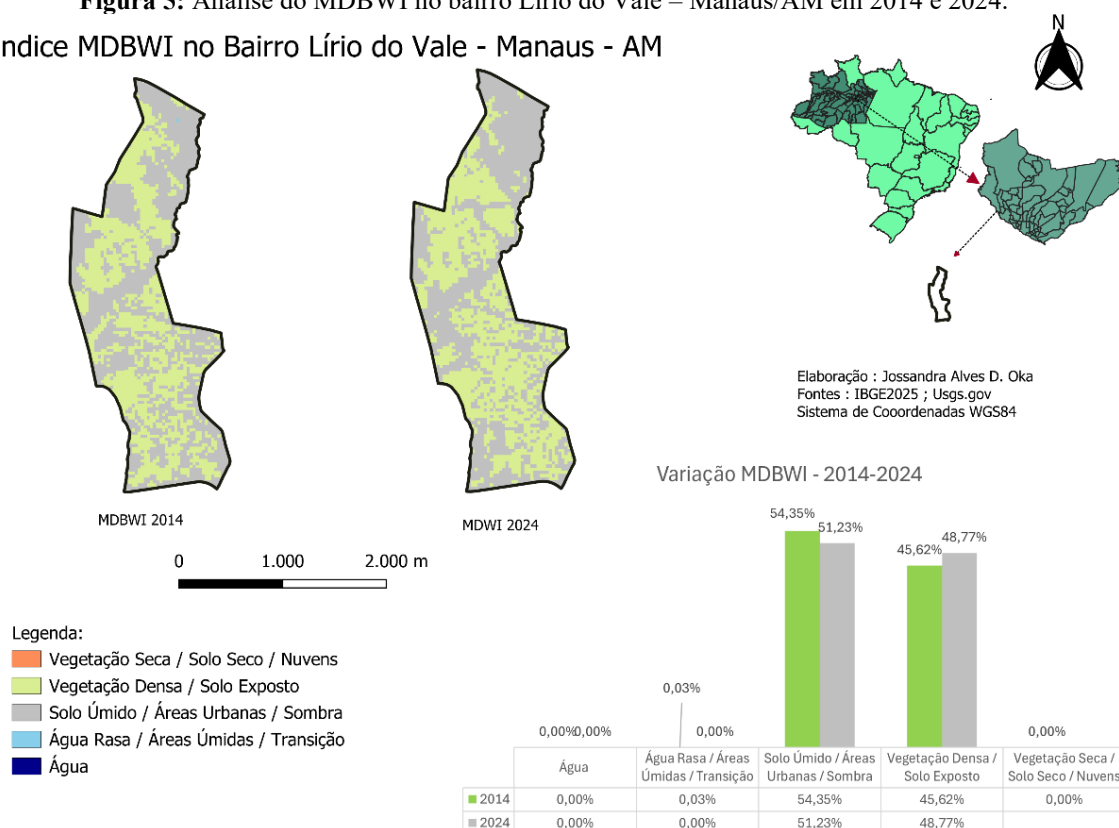
Figura 4 – Análise do NDBI no bairro Lírio do Vale – Manaus/AM em 2014 e 2024.



Os resultados da Figura 5, obtidos com o MDBWI, complementam as análises anteriores. A categoria "*Solo Úmido/Áreas Urbanas / Sombra*", que representa a maior parte da área do bairro, diminuiu em 3%, passando de 54% para 51%. Essa constatação pode indicar uma redução da umidade do solo ou uma mudança na natureza das áreas sombreadas devido à urbanização. A categoria "*Vegetação Densa / Solo Exposto*" aumentou em 3%, o que pode ser um reflexo da complexidade dessa classe ao englobar tanto vegetação densa quanto solo exposto, e a sua dinâmica de conversão mútua. A categoria "*Água Rasa / Áreas Úmidas / Transição*", que representava 900 m² em 2014, desapareceu em 2024, o que pode indicar a drenagem ou aterramento de pequenas áreas úmidas e de transição no bairro.

Figura 5: Análise do MDBWI no bairro Lírio do Vale – Manaus/AM em 2014 e 2024.

Índice MDBWI no Bairro Lírio do Vale - Manaus - AM



Em suma, os resultados dos três (3) índices apontam para uma clara e acelerada expansão da mancha urbana no bairro Lírio do Vale entre 2014 e 2024. A urbanização tem ocorrido em detrimento da vegetação esparsa e das florestas abertas, com o surgimento e a consolidação de áreas construídas. Essa transformação da paisagem natural para um ambiente mais impermeabilizado e com menor cobertura vegetal pode intensificar problemas ambientais já observados em Manaus, como o aumento das temperaturas locais (ilhas de calor urbano) e alterações nos padrões de drenagem.

CONCLUSÃO

O estudo mostrou que os índices espectrais, como NDVI, NDBI e MDBWI, são ferramentas eficazes para analisar e quantificar a urbanização e as mudanças no uso e na cobertura do solo em áreas urbanas específicas, como o bairro Lírio do Vale em Manaus. A análise multitemporal entre 2014 e 2024 revelou um avanço significativo das áreas urbanizadas e de solo exposto, acompanhado por uma diminuição notável da vegetação esparsa, pastagens degradadas e florestas abertas. Essa transformação da paisagem, com a substituição da cobertura vegetal por superfícies construídas, pode contribuir para a intensificação de problemas ambientais característicos de centros urbanos, como as ilhas de calor e alterações hidrológicas. Os resultados deste estudo podem subsidiar políticas públicas que promovam a arborização e a vegetação em áreas urbanas, contribuindo para o conforto térmico da população e para a sustentabilidade ambiental da cidade de Manaus.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a bolsa de estudos concedida para a primeira autora fornecida pela CAPES, bem como pelo apoio da CAPES - Código de Financiamento 001. Complementarmente, agradecimentos são estendidos à FAPERJ, por meio do projeto FAPERJ – Pensa Rio – Edital 34/2014 (2014-2025) – E-26/010.002980/201, ao CNPq, por meio dos projetos CNPq Edital nº 09/2023 – Processo 309073/2023 e CNPq/BRICS *Multilateral Projects* - Processo 440014/2024-7, bem como pelo apoio da CAPES - Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

- GUILHERME, A. P.; BIUDES, M. S.; MOTA, D. S.; DE MUSIS, C. R. *Relação entre tipo de cobertura do solo e temperatura de superfície*. Sociedade & Natureza, Uberlândia, v. 32, p. 539-550, 2020.
- KSHETRI, T. B. *NDVI, NDBI and NDWI Calculation Using Landsat 7*, 8. *ResearchGate*, 2018. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/327971920>. Acesso em: 20 jun. 2025.
- LEMO, M. B.; LIMA, A. A.; CORRÊA, P. B.; BEZERRA, I. F. O. *Surface Temperature and NDVI Behavior Analysis in September in Manaus/AM City*. International Journal of Advanced Engineering Research and Science (IJAERS), v. 6, n. 11, p. 467-474, Nov. 2019.
- MELO, F. M. *Da provisão habitacional à produção imobiliária em Manaus (AM)*. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOGRAFIA URBANA, 18., 2024, Niterói. Anais eletrônicos [...]. Niterói: SIMPURB, 2024. Disponível em: <https://www.simpousiourb.com.br/anais/index.php/simpousiourb/article/view/123>. Acesso em: 15 jun. 2025.
- MUNIZ, Rodrigo Sondermann; ROTUNNO FILHO, Otto Corrêa; AMBIENTE–LABH2O, Meio. *Evolução temporal do NDVI na bacia do Rio Piabanha/RJ*. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16., 2013, Foz do Iguaçu PR: INPE, 2013
- PRATES, L. P.; LACERDA, C. S. A. *Comparação entre o uso de NDVI, NDBI e classificação não-supervisionada para avaliação da expansão urbana*. In: JORNADA CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA, 12., 2021. Anais eletrônicos [...]. 2021. Disponível em: <https://www.ifmg.edu.br/portal-ifmg/jornadas/jornada-cientifica-e-tecnologica>. Acesso em: 17 jun. 2025.
- RAFAEL, R. A. *Relação entre ilhas de calor urbano e mudanças no uso da terra: um estudo de caso para Manaus - AM*. 2014. 60 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2014.
- ROCHA, A. R. et al. *Índice de sensoriamento remoto na mudança do uso da terra na região urbana de Manaus, Amazonas/AM*. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 20., 2023, Florianópolis. Anais [...]. Florianópolis: SBSR, 2023. p. 3349-3352. Disponível em: <https://proceedings.science/p/164919?lang=pt-br>. Acesso em: 19 jun. 2025.
- XU, H. *Modification of Normalized Difference Water Index (NDWI) to Enhance Open Water Features in Remotely Sensed Imagery*. International Journal of Remote Sensing, v. 27, n. 14, p. 3025-3033, 2006.