XVIII ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO
XIV ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO
AMBIENTE CONSTRUÍDO E USUÁRIO: PERSPECTIVAS LATINO-AMERICANAS

O albedo das superfícies como indicador de resiliência urbana.

El albedo superficial como indicador de resiliência urbana.

The surface albedo as an indicator of urban resilience.

Clima e Planejamento Urbano/ Urban Climate and planning/ Clima y planificación urbana

Ferreira, Fabiana Lourenço e Silva
Doutora em Ciências do Sistema Terrestre, CEMADEN, São José dos Campos, Brasil,
fabiana.ferreira@cemaden.gov.br

Vieira, Rita Márcia da Silva Pinto
Doutora em Ciências do Sistema Terrestre, CEMADEN, São José dos Campos, Brasil,
rita.vieira@cemaden.gov.br

Resumo

Indicadores de resiliência urbana são essenciais para monitorar a eficácia das políticas de adaptação às mudanças climáticas globais. O albedo, que representa a capacidade dos materiais de refletir a radiação solar, desempenha um papel fundamental no clima urbano e no consumo de energia em edificações. Este artigo apresenta metodologia utilizada para calcular o percentual de superfícies com alto albedo em áreas urbanas. O método inclui a criação de um banco de dados espectral, desenvolvido a partir de imagens do Landsat 8, análise de clusters e uso de softwares e bancos de dados gratuitos. Os experimentos foram conduzidos em três municípios da Região Metropolitana do Vale do Paraíba (SP, Brasil), revelando que Jacareí possui a maior porcentagem de área coberta por materiais de alto albedo (5,62%), seguida por São José dos Campos (4,84%) e Caçapava (3,17%), indicando a necessidade de políticas urbanas para ampliação do albedo em códigos de edificações municipais.

Palavras-chave: Resiliência. Adaptação. Albedo. Áreas urbanas.

Resumen

Los indicadores de resiliencia urbana son esenciales para monitorear la efectividad de las políticas de adaptación al cambio climático global. El albedo, que representa la capacidad de los materiales para reflejar la radiación solar, juega un papel fundamental en el clima urbano y en el consumo energético de los edificios. Este artículo presenta la metodología utilizada para calcular el porcentaje de superficies con alto albedo en áreas urbanas. El método incluye la creación de una base de datos espectral, desarrollada a partir de imágenes Landsat 8, análisis de clusters y el uso de software y bases de datos libres. Los experimentos se realizaron en tres municipios de la Región Metropolitana de Vale do Paraíba (SP, Brasil), revelando que Jacareí tiene el mayor porcentaje de área cubierta por materiales de alto albedo (5,62%), seguido de São José dos Campos (4,84%) y Caçapava (3,17%), indicando la necesidad de políticas urbanas para ampliar el albedo en los códigos de construcción municipales.

Palabras clave: Resiliencia, Adaptación. albedo. Areas Urbanas.

Abstract

Urban resilience indicators are essential for monitoring the effectiveness of policies to adapt to global climate change. albedo, which represents the ability of materials to reflect solar radiation, plays a key role in urban climate and energy consumption in buildings. This article presents a methodology to calculate the percentage of surfaces with high albedo in urban areas. The method includes creating a spectral database, developed from Landsat 8 images, cluster analysis, and free software and databases. The experiments were conducted in three municipalities in the Metropolitan Region of Vale do Paraíba (SP, Brazil), revealing that Jacareí has the highest percentage of area covered by high albedo materials (5.62%), followed by São José dos Campos (4.84%) and Caçapava (3.17%), indicating the need for urban policies to expand albedo in municipal building codes.

Keywords: Indicators. Adaptation.albedo. Urban areas.

Introdução

A resiliência urbana diz respeito à capacidade das cidades e seus sistemas de resistirem a impactos causados por eventos climáticos extremos e se recuperarem rapidamente dessas adversidades (IPCC, 2023). Esse conceito é central no ODS 11 da ONU (UN, 2015), que propõe o desenvolvimento de cidades mais inclusivas, seguras, resilientes e sustentáveis (IPEA, 2018). A norma ABNT NBR ISO 37123:2021, voltada ao monitoramento de cidades resilientes, e que contempla 64 indicadores, define o percentual de área urbana coberta por materiais de alto albedo como um dos indicadores de resiliência associada ao meio ambiente e mudanças climáticas (ABNT, 2021).

O albedo ou refletância hemisférica — que representa a fração da radiação solar refletida por uma superfície — tem papel crucial na regulação térmica urbana, influenciando o clima urbano, o consumo energético em edificações e as emissões de gases de efeito estufa (AKBARI et al., 2015; BRETZ; AKBARI; ROSENFELD, 1998; QI et al., 2019). Embora a cor clara esteja associada a maior refletância no espectro visível (46% da radiação solar incidente), o albedo também é influenciado pela refletância no infravermelho próximo (43%), totalizando 89% da radiação solar absorvida ou refletida pela superfície (PRADO; FERREIRA, 2005). Estudos indicam que um aumento de 10% no albedo de coberturas e pavimentos urbanos poderia compensar até 44 giga toneladas (Gt) de carbono equivalente (CO_{2eq}), o que representa mais de um ano das emissões globais previstas até 2025 (AKBARI; MENON; ROSENFELD, 2009).

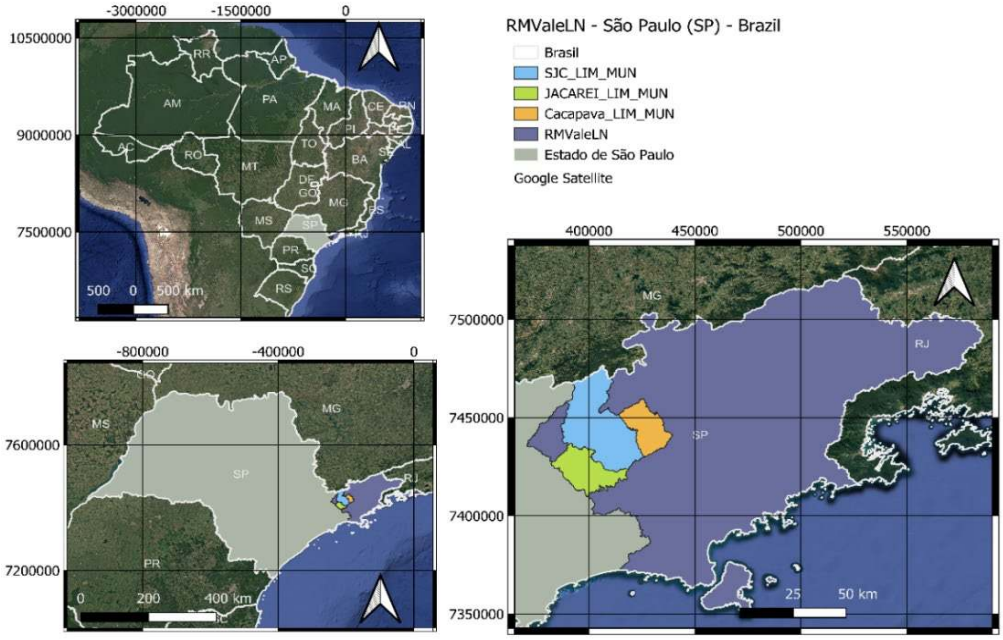
Diante da relevância do albedo para a resiliência urbana e mitigação dos impactos climáticos, este artigo apresenta a metodologia utilizada para calcular o percentual de áreas urbanas com alto albedo (AAA), desprovidas de cobertura vegetal. A aferição deste indicador, descrito na ABNT NBR ISO 37123:2021, contribui para monitorar e promover a resiliência ao calor em áreas urbanas, embasar estratégias para mitigação das emissões de gases de efeito estufa e promover adaptações, contribuindo para o desenvolvimento urbano sustentável. Esse processo requer uma abordagem sistêmica, com integração de dados multidisciplinares, onde a coleta de dados e a sistematização das informações é fundamental para a consolidação de planos integrados de gestão municipal em paralelo ao desenvolvimento de políticas públicas.

Materiais e métodos

Área de Estudos

A área de estudo abrange três municípios da Região Metropolitana do Vale do Paraíba e Litoral Norte (RMVale-LN), no estado de São Paulo (SP), Brasil: Caçapava, Jacareí e São José dos Campos (SJC) (Figura 2), inseridos no bioma Mata Atlântica. A Tabela 1 apresenta um resumo das principais características desses municípios, com base nos Censos de 2010 e 2022, incluindo dados sobre população, densidade demográfica e altitude em relação ao nível do mar.

Figura 2: Localização da área de estudos: Jacareí, Caçapava e SJC.



Fonte: o autor, adaptado de: (IPEA, 2015)

Tabela 1: Dados demográficos e altitude em relação ao nível do mar.

Município	Área (Km²)	Número de habitantes - Censo 2010	Número de habitantes - Censo 2022	Densidade Demográfica (habitantes/km²) (2010)	Densidade Demográfica (habitantes/km²) (2022)	Altitude (m)
Caçapava	368,99	84.752	96.202	230	260,72	560
Jacareí	464,272	211.214	240.275	455	464,272	567
SJC	1099,409	629.921	697.428	573	634,03	600

Fonte: Adaptado de: (IBGE, 2010, 2023)

Metodologia

A metodologia adotada foi estruturada em quatro etapas. Na primeira, foi construído um banco de dados espectral com base em um espaço celular georreferenciado no formato shapefile (shp), utilizando os limites municipais da base de dados do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – IPEA (2015), para a Região Metropolitana do Vale do Paraíba e Litoral Norte (RMVale-LN). As células, criadas com dimensão de 60 × 60 metros (3.600 m²), permitiram representar o território em escala local, com baixo custo computacional. O preenchimento das células foi realizado no software FillCell (INPE, 2023), aplicando-se o operador “average” para a Fração de Cobertura Vegetal (FCV) e o Índice de Umidade por Diferença Normalizada (NDMI), e o operador “maximum” para o albedo da superfície (AS). A manipulação das imagens incluiu a adequação da escala de dados com a aplicação dos fatores de multiplicação e adição descritos para cada produto (USGS, 2023). Os índices utilizados foram o NDVI, para aferição da FCV, o NDMI, para identificação de umidade e água, e as bandas 2 a 7 de refletância no topo da atmosfera (TOA) para a estimativa do albedo da superfície (AS). A Tabela 2 apresenta os códigos das imagens usadas para mapear as áreas urbanas sem vegetação com alto albedo (AAA) (≥30%), incluindo a data de aquisição e os produtos utilizados para o cálculo das variáveis espectrais.

Tabela 2: Descrição dos produtos Landsat 08 utilizados

Código dos produtos Landsat coleção 1	Data	Produto utilizado
LC08_L1TP_219076_20200429_20201015_01_T1_toa_band_N	29/04/2020	Refletância da superfície (Toa)
LC08_L1TP_219076_20201006_20201015_01_T1_toa_band_N	16/10/2020	Refletância da superfície (Toa)
LC08_L1TP_219076_20201006_20201015_01_T1	16/10/2020	NDVI, NDMI
LC08_L1TP_219076_20200429_20200509_01_T1	29/04/2020	NDVI, NDMI

Fonte: adaptado de: (USGS, 2024)

Na segunda etapa, foram realizadas análises espaciais exploratórias para avaliar a dependência espacial das variáveis espectrais entre os períodos analisados, por meio do Índice Global de Moran (I) (MORAN, 1950), utilizando o software GeoDa (ANSELIN, 2005). A matriz de vizinhança adotada foi do tipo "queen" de ordem 1, que considera como vizinhas as células que compartilham ao menos uma aresta ou vértice. Na terceira etapa, foram mapeados agrupamentos espaciais (clusters) para identificar áreas urbanas desprovidas de vegetação, aplicando-se o método de agrupamento K-means no software GeoDa, com a métrica de distância Euclidiana (ANSELIN, 2005). O número ideal de clusters a reter foi determinado com base no critério do coeficiente de determinação (R^2), assegurando que a variabilidade superasse 85%

(MAROCO, 2007).Por fim, na quarta etapa, foi selecionado o subconjunto de AAA dentro das áreas urbanas sem vegetação identificadas na etapa anterior. A filtragem foi realizada no software QGIS, considerando células com albedo ≥ 30%. O percentual de AAA foi calculado a partir do número total de células selecionadas, multiplicado pela área unitária de cada célula (3.600 m²).

Resultados

A tabela 4 apresenta os resultados obtidos para cada município em análise. Em Caçapava, o espaço celular resultou em 103.860 células, com FCV de 47,2%, NDMI de 0,140 e AS de 17,2%. Em Jacareí, foram 130.357 células, FCV de 46,2%, NDMI de 0,132 e AS de 17,1%. Em SJC o espaço celular totalizou 1.099.409 células, FCV de 57,1%, NDMI de 0,178 e AS de 15,2%. Os resultados indicam que SJC apresentou os maiores valores de FCV e NDMI, o que resultou em um AS inferior, devido à maior cobertura vegetal e presença de corpos d'água, que absorvem mais radiação solar (JENSEN, 2009).

Tabela 4: Resultados: banco de dados municipais.

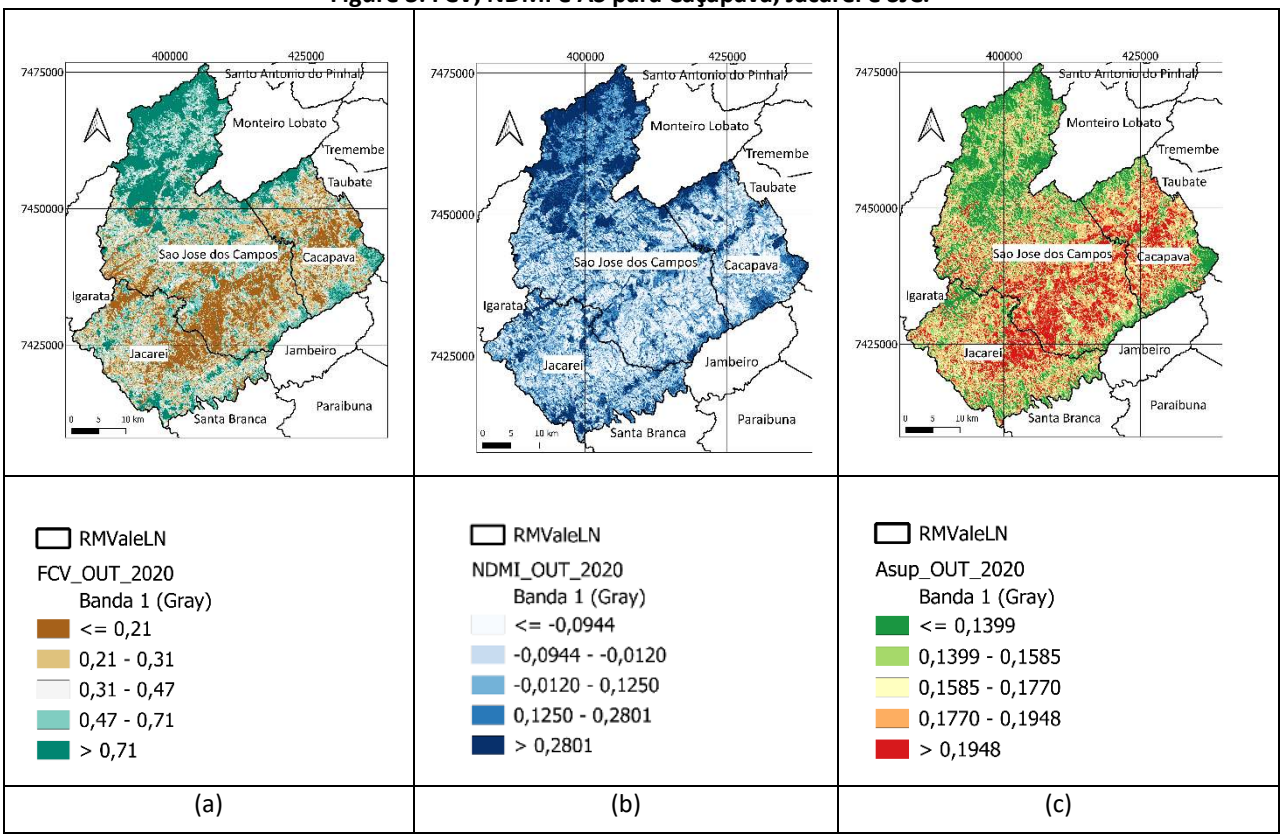
Município	Número total de células	FCV (média)	NDMI (média)	AS (médio)
Caçapava	103.860	0,472	0,140	0,172
Jacareí	130.357	0,462	0,132	0,171
SJC	1.099.409	0,571	0,178	0,152

As Figuras 3a, 3b e 3c apresentam os mapas de Fração de Cobertura Vegetal (FCV), Índice de Umidade por Diferença Normalizada (NDMI) e albedo da superfície (AS) gerados para os três municípios, considerando-se 98% dos valores obtidos em cada localidade. O FCV variou entre 0,21 (21%) e 0,71 (71%), o AS entre 0,14 (14%) e 0,19 (19%) e o NDMI entre –0,094e 0,280. Os coeficientes de autocorrelação espacial, com Indice de Moran (I) obtidos com valores superiores a 0,65 (I > 0,65), indicam a existência de dependência espacial significativa entre as três variáveis espectrais nas duas datas analisadas, mesmo diante da variabilidade climática sazonal (Tabela 5).

Tabela 5: Índice Global de Moran (I) calculado para FCV, albedo e NDMI entre datas analisadas.

Município	FCV_OUT2020	AS_OUT2020	NDMI_OUT2020
Caçapava	0,737	0,669	0,687
Jacareí	0,746	0,659	0,692
SJC	0,807	0,697	0,726

Figure 3: FCV, NDMI e AS para Caçapava, Jacareí e SJC.



Fonte: o autor

Na Tabela 6, são apresentados os valores do coeficiente de determinação (R^2) obtidos para agrupamentos variando de três a oito clusters, referentes aos municípios de Caçapava, Jacareí e SJC. Observa-se que, nos três casos, a variabilidade explicada ultrapassou 85% a partir de agrupamentos com mais de seis clusters, com os seguintes valores de R^2: Caçapava (0,890), Jacareí (0,869) e SJC (0,899).

Tabela 6: R^2 para diferentes números de clusters para os 3 municípios analisados

Número de Clusters		CL3	CL4	CL5	CL6	CL7	CL8
R^2	Caçapava	0,730	0,810	0,867	0,890	0,903	0,910
	Jacareí	0,758	0,813	0,843	0,869	0,886	0,891
	SJC	0,808	0,858	0,881	0,899	0,911	0,919

O mapeamento dos clusters deu origem a um novo conjunto de dados, no qual foram definidas as áreas urbanas desprovidas de vegetação . A partir desse conjunto, foram selecionadas as Áreas

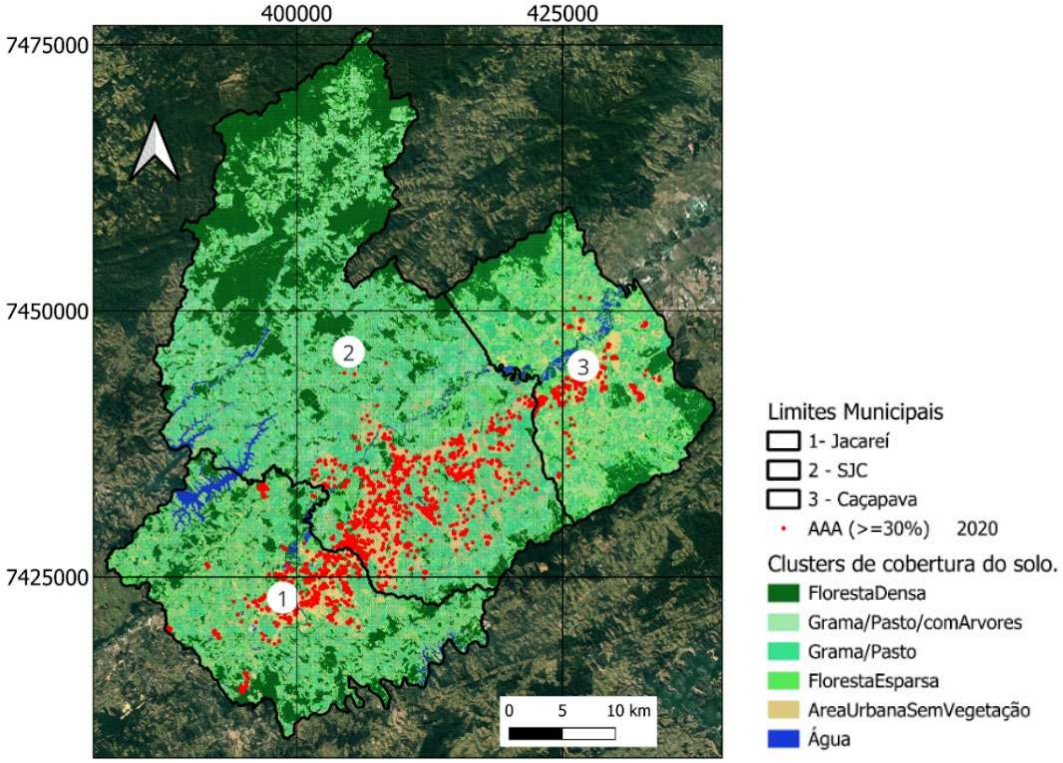
com Alto Albedo (AAA). A Tabela 7 apresenta um resumo do número total de células classificadas como área urbana desprovidas de vegetação, o número de células identificadas como AAA e o percentual correspondente em relação ao total em relação ao total de as áreas urbanas desprovidas de vegetação.

Tabela 7: Resultados para áreas urbanas de vegetação por município

Município	Área da cidade com exclusão de áreas verdes (número de células)	AAA (número de células)	Percentual AAA (%)
Caçapava	11.897	377	3,17
Jacareí	15.041	846	5,62
SJC	33.685	1631	4,84

A Figuras 6 apresenta a localização das AAA (AS >=0,30) mapeadas nos 3 municípios, e as seis classes de cobertura do solo, obtidas na etapa anterior: floresta densa, floresta esparsa, grama e pasto sem árvores, grama e pasto com árvores, água e área urbana sem a presença de vegetação.

Figura 6: Clusters de cobertura do solo em Caçapava, SJC e Jacareí e AAA mapeadas.



Conclusão

Jacareí apresenta o maior percentual de área urbana sem a presença de vegetação coberta por áreas com alto albedo (5,62%), seguida por SJC (4,84%) e Caçapava (3,17%), evidenciando a necessidade de políticas públicas voltadas à ampliação do albedo das superfícies em áreas urbanas. As respostas políticas para gerenciar a resiliência e adaptação as mudanças climáticas, por meio da ampliação do albedo das superfícies (AS), devem incluir o fortalecimento dos códigos de edificações para exigir materiais refletivos, evitar a má adaptação associada ao seu uso, incentivar a recuperação da refletividade das superfícies urbanas e fornecer incentivos financeiros para práticas sustentáveis, além da formação de parcerias público-privadas, que possam viabilizar o aumento do AS nas áreas urbanizadas.

O uso de produtos padronizados, como os do satélite Landsat 8, é essencial para o monitoramento contínuo e comparativo entre municípios ao longo do tempo. A grade de 60 × 60 metros, mostrou-se eficiente para análises em larga escala, embora tenha limitações para detectar superfícies menores que 3.600 m². Sistemas de sensoriamento remoto podem monitorar as mudanças no albedo ao longo do tempo, de modo a embasar cientificamente as decisões de planejamento urbano, enquanto campanhas de conscientização pública e programas educacionais podem promover os benefícios do uso de materiais de alto albedo.

Os elevados índices de autocorrelação espacial de Moran ($I > 0,65$) evidenciam a dependência espacial da FCV, NDMI e do AS mesmo com variações sazonais. O mapeamento de clusters com base nas características espectrais analisadas, mostrou-se eficaz na identificação de áreas urbanas com pouca vegetação, funcionando como uma alternativa útil para mapear zonas urbanas não previamente reconhecidas.

Os resultados obtidos nesta pesquisa não se restringem a uma coletânea de números, e sim num indicador, que pode instigar a criação de um ciclo virtuoso, onde a evolução do AS, que influencia a resiliência ao calor, pode ser monitorado e melhorias podem ser implantadas em programas municipais. Como sugestões para futuros estudos, propõe-se o uso de grades com maior resolução espacial para capturar áreas menores, além da análise das tipologias construtivas associadas a áreas com alto albedo e o uso de outros métodos para aferição do albedo.

Conclui-se que as interações entre atores da comunidade científica, que desenvolvem métodos para o monitoramento de variáveis espectrais e indicadores, como o albedo de superfície (AS), e atores institucionais, como os tomadores de decisão municipais, responsáveis por desenvolver leis e políticas de adaptação e mitigação das mudanças climáticas globais, são essenciais para o desenvolvimento e a implementação da resiliência e adaptação urbana.

Referências

ABNT. ABNT NBR ISO 37123: Cidades e comunidades sustentáveis - Indicadores para cidades resilientes. Associação Brasileira de Normas Técnicas Brasil Associação Brasileira de Normas Técnicas, , 21 jan. 2021.

AKBARI, H. et al. Local climate change and urban heat island mitigation techniques – The state of art. **Journal of Civil Engineering and Management**, v. 22, n. 1, p. 1–16, 18 dec. 2015.

AKBARI, H.; MENON, S.; ROSENFELD, A. Global cooling: Increasing world-wide urban albedos to offset CO2. **Climatic Change**, v. 94, n. 3–4, p. 275–286, 2009.

ANSELIN, L. Exploring Spatial Data with GeoDa TM: A Workbook Center for Spatially Integrated Social Science. **Center for Spatially Integrated Social Science**, p. 244, 2005.

BRETZ, S.; AKBARI, H.; ROSENFELD, A. Practical issues for using solar-reflective materials to mitigate urban heat islands. **Atmospheric Environment**, v. 32, n. 1, p. 95–101, jan. 1998.

IBGE. **Censo demográfico 2010**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/censo2010/apps/painel/>. Acesso em: 28 maio. 2023.

IBGE. **Censo Demográfico 2022 - PGI**. Disponível em: <https://censo2022.ibge.gov.br/apps/pgi/#/home>. Acesso em: 14 ago. 2023.

INPE. **FillCell - Luccme**. São José dos Campos, SP, Brasil Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2023.

IPCC. **Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability**. [s.l.] Cambridge University Press, 2023.

IPEA. **ODS-Metas Nacionais dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável Proposta de adequação**. [s.l: s.n.].

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres.** Tradução: J. C. N Epiphanio. São José dos Campos: Editora Parentese, 2009. v. 1

MAROCO, J. **Análise Estatística com utilização do SPSS**. 3. ed. Lisboa: Edições Sílabo Ltda, 2007.

MORAN, P. A. P. Notes on continuous stochastic phenomena. **Biometrika**, v. 37, n. 1–2, p. 17–23, 1950.

PRADO, R. T. A.; FERREIRA, F. L. Measurement of albedo and analysis of its influence on the surface temperature of building roof materials. **Energy and Buildings**, v. 37, n. 4, p. 295–300, 1 abr. 2005.

QI, J.-D. et al. Do grey infrastructures always elevate urban temperatures? No, utilizing grey infrastructures to mitigate urban heat island effects. **Sustainable Cities and Society**, v. 46, p. 101392, abr. 2019.

UN. **Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development**. New York: [s.n.]. Disponível em: <https://documents-dds-ny.un.org/doc/UNDOC/GEN/N15/291/89/PDF/N1529189.pdf?OpenElement>.

USGS. **How do I use a scale factor with Landsat Level 2 science products? | U.S. Geological Survey**.

USGS. **EarthExplorer Home**. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso em: 21 abr. 2025.

Siglas

AAA – áreas com alto albedo (>=30%)

AS – albedo das superfícies

CO_{2eq} - carbono equivalente

FCV – Fração de cobertura de vegetação

Gt - gigatoneladas

I – índice de Moran

LC08 – satélite Landsat 8.

NDMI - Índice de Vegetação por Diferença Normalizada

NDVI - Índice de Umidade por Diferença Normalizada

RMVale-LN – Região metropolitana do Vale do Paraíba e Litoral Norte de São Paulo.

SJC – São José dos Campos

SP – São Paulo