Proposta metodológica para geração de mapas de fragmentação urbana: Estudo aplicado no município de Florianópolis, SC.

Methodological proposal for generating urban fragmentation maps: A case study in the municipality of Florianópolis, SC.

Hatan Pinheiro Silva[1]

Carlos Antônio Oliveira Vieira[2]

Everton Leandro Nubiato[3]

Everton da Silva[4]

RESUMO: A fragmentação urbana constitui um dos principais desafios para a gestão territorial no Brasil, impactando diretamente a eficiência do Cadastro Territorial Multifinalitário (CTM) e a formulação de políticas públicas de ordenamento do solo. Este artigo propõe uma metodologia para análise da fragmentação urbana baseada no método desenvolvido por Angel *et al*. (2010, 2012, 2016) no âmbito do *Atlas of Urban Expansion*, implementada na plataforma *Google Earth Engine (GEE)* e utilizando dados de uso e cobertura da terra do projeto MapBiomas, com resolução espacial de 10 metros (ano-base 2023). A abordagem proposta substitui a etapa de classificação supervisionada de imagens de satélite por dados já validados de mapeamento, eliminando subjetividades inerentes ao processo de classificação e ampliando a resolução espacial de 30 metros (Landsat) para 10 metros (Sentinel-2). O município de Florianópolis/SC foi selecionado como área de estudo por apresentar dinâmica urbana complexa, com processo de conurbação metropolitana, insularidade, pressão turística e expansão urbana fragmentada. Os resultados permitiram classificar o território municipal em sete categorias: Urbano Edificado Compacto (UEC), Urbano Edificado Disperso (UED), Rural Edificado (RE), Espaço Aberto Urbanizado (EAU), Borda de Transição, Espaço Aberto Rural (EAR) e Água. A metodologia demonstrou-se replicável, de baixo custo e aplicável a qualquer município brasileiro, configurando-se como ferramenta complementar ao CTM para o monitoramento da dinâmica territorial urbana. Os resultados evidenciam um padrão acentuado de fragmentação urbana, influenciado pelas restrições naturais locais e pela ocupação em múltiplos núcleos urbanos.

Palavras-chave: Fragmentação urbana; Espraiamento Urbano; Cadastro Territorial Multifinalitário; Google Earth Engine; MapBiomas.

ABSTRACT: Urban fragmentation constitutes one of the main challenges for territorial management in Brazil, directly impacting the efficiency of the Multipurpose Territorial Cadastre and the formulation of public policies for land-use planning. This article proposes a methodology for analyzing urban fragmentation based on the method developed by Angel et al. (2010, 2012, 2016) within the scope of the Atlas of Urban Expansion, implemented on the Google Earth Engine (GEE) platform and using land-use and land-cover data from the MapBiomas project, with a spatial resolution of 10 meters (base year 2023). The proposed approach replaces the supervised satellite image classification step with already validated mapping data, eliminating subjectivities inherent to the classification process and expanding the spatial resolution from 30 meters (Landsat) to 10 meters (Sentinel-2). The municipality of Florianópolis, Santa Catarina, was selected as the study area due to its complex urban dynamics, featuring metropolitan conurbation, insularity, tourist pressure, and fragmented urban expansion. The results allowed the municipal territory to be classified into seven categories: Compact Built-up Urban (UEC), Dispersed Built-up Urban (UED), Built-up Rural (RE), Urbanized Open Space (EAU), Transition Fringe, Rural Open Space (EAR), and Water. The methodology proved to be replicable, low-cost, and applicable to any Brazilian municipality, establishing itself as a complementary tool to the CTM for monitoring urban territorial dynamics. The results highlight a pronounced pattern of urban fragmentation, influenced by local natural

[1] Universidade Federal de Santa Catarina - Departamento de Engenharia Civil/ hatanpinheiro@gmail.com

[2] Universidade Federal de Santa Catarina - Departamento de Geociências/ carlos.vieira@ufsc.br

[3] Universidade Federal de Santa Catarina - Departamento de Engenharia Civil/ nubiato.everton@gmail.com

[4] Universidade Federal de Santa Catarina - Departamento de Geociências / everton.silva@ufsc.br

constraints and occupation across multiple urban cores.

Keywords: Urban fragmentation, Multipurpose Territorial Cadastre; Google Earth Engine; MapBiomas.

1. INTRODUÇÃO

O fenômeno da urbanização constitui uma das transformações territoriais mais significativas do século XXI. Segundo dados das Nações Unidas (UN-HABITAT, 2022), aproximadamente 56% da população mundial reside em áreas urbanas, com projeção de alcançar 68% no ano de 2050. No contexto brasileiro, o *Censo Demográfico de 2022*, realizado pelo *Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE)*, revelou que mais de 85% da população nacional habita em áreas classificadas como urbanas, configurando um cenário de intensa pressão populacional sobre o território das cidades (IBGE, 2023).

A expansão das áreas urbanas, no entanto, não ocorre de maneira homogênea nem compacta. Estudos conduzidos por Angel et al. (2010, 2012) no âmbito do programa *Atlas of Urban Expansion*, demonstraram que as cidades ao redor do mundo apresentam uma tendência de declínio das densidades urbanas e de expansão territorial que supera proporcionalmente o crescimento populacional. Em um estudo abrangendo 200 cidades, Angel *et al*. (2016) constataram que, entre 1990 e 2015, a área urbanizada das cidades cresceu em média duas vezes mais rapidamente que suas populações, resultando em padrões cada vez mais dispersos e fragmentados de ocupação do solo.

Esse fenômeno, frequentemente denominado '*urban sprawl'* ou espraiamento urbano, manifesta-se de formas distintas conforme o contexto geográfico, socioeconômico e institucional de cada região. Nas cidades latino-americanas, a expansão urbana fragmentada assume características que combinam processos formais e informais de ocupação do solo, descontinuidade da malha viária, déficits de infraestrutura e conflitos entre usos urbanos e rurais do território (SÁNCHEZ, 2018).

A fragmentação urbana pode ser definida como a descontinuidade espacial da mancha edificada, caracterizada pela presença de vazios urbanos, enclaves não urbanizados e rupturas na malha construída dentro do perímetro de influência das cidades (ANGEL *et al.*, 2012). Diferentemente da simples expansão urbana, que se refere ao crescimento da área total ocupada, a fragmentação enfatiza a configuração espacial interna dessa ocupação, evidenciando a proporção e a distribuição dos espaços abertos entremeados ao tecido edificado.

Os impactos da fragmentação urbana sobre a gestão territorial são, do ponto de vista da infraestrutura, a descontinuidade da ocupação que eleva os custos de implantação e manutenção da infraestrutura pública, como redes de água, esgoto, energia elétrica e drenagem pluvial, uma vez que essas redes precisam percorrer extensões maiores para atender populações dispersas. Do ponto de vista fiscal, a existência de amplos vazios urbanos dotados de infraestrutura representa uma ineficiência na alocação de investimentos públicos, configurando um "*solo urbano ocioso*", ou seja, terrenos que se beneficiam de investimentos públicos em infraestrutura sem contribuir proporcionalmente com a geração de receita tributária municipal (SILVA, 1993).

No que tange ao planejamento urbano, a fragmentação compromete a definição

adequada dos perímetros urbanos, instrumento previsto no Estatuto da Cidade, Lei Federal nº 10.257/2001 (BRASIL, 2001). A delimitação dessas fronteiras favorece a especulação imobiliária e a retenção de vazios urbanos, agravando a dispersão e a subutilização do solo (SOUZA, 2020). Para mitigar esse cenário e subsidiar decisões de ordenamento territorial com dados de ocupação, a gestão municipal necessita de um sistema de informações integrado, papel desempenhado pelo Cadastro Territorial Multifinalitário (CTM).

Definido como um inventário territorial oficial e sistemático do município, baseado no levantamento dos limites de cada parcela, às quais é atribuída uma identificação numérica inequívoca (SILVA, 2023; BRASIL, 2022), o CTM ultrapassa a vertente puramente geométrica. A natureza "multifinalitária" do cadastro pressupõe que o sistema deve servir não apenas à finalidade fiscal e tributária, mas também ao planejamento urbano, à gestão ambiental, à regularização fundiária e ao ordenamento territorial de forma integrada.

Nesse contexto, a análise da fragmentação urbana constitui uma informação estratégica, na medida em que permite: (a) subsidiar a definição e a revisão dos perímetros urbanos com base em critérios técnicos e quantificáveis; (b) identificar áreas de expansão urbana recente que necessitam de atualização cadastral; (c) localizar vazios urbanos que podem ser alvo de políticas de incentivo à ocupação ou de instrumentos urbanísticos, como o IPTU progressivo no tempo; (d) monitorar temporalmente a dinâmica de ocupação do solo municipal.

A disponibilidade de dados geoespaciais de alta resolução e de plataformas de processamento em nuvem oferece oportunidades para a integração de análises de fragmentação urbana aos sistemas cadastrais municipais. O *Google Earth Engine* (GEE), plataforma de processamento de dados geoespaciais em nuvem, e o Projeto MapBiomas, iniciativa brasileira que produz mapeamentos anuais de uso e cobertura da terra para todo o território nacional, constituem recursos tecnológicos que viabilizam análises territoriais em escala municipal com baixo custo operacional e alta reprodutibilidade.

Embora o método proposto por Angel et al. (2010, 2012, 2016) tenha se consolidado como uma das principais referências para a análise da expansão e fragmentação urbana em escala global, sua aplicação ainda depende, em grande parte, de procedimentos de classificação de imagens de satélite que demandam conhecimento especializado e etapas de validação específicas para cada área de estudo. Além disso, observa-se uma lacuna em relação ao uso de uma metodologia utilizando bases nacionais de uso e cobertura da terra, como o MapBiomas, bem como sua integração com plataformas de processamento em nuvem, como o *Google Earth Engine*. Também são escassos os estudos que exploram o potencial dos produtos derivados da fragmentação urbana como subsídio direto às atividades do Cadastro Territorial Multifinalitário, especialmente no apoio à definição de perímetros urbanos, identificação de vazios urbanos e ao monitoramento da expansão urbana. Nesse contexto, uma metodologia operacional de baixo custo que permita integrar essas tecnologias ao planejamento e à gestão cadastral dos municípios brasileiros se faz necessária.

O presente artigo tem como objetivo propor uma metodologia para geração do mapa de fragmentação urbana baseada no método de Angel *et al.* (2010, 2012, 2016), implementada na plataforma *Google Earth Engine* e utilizando como insumo os dados de uso e cobertura do solo do MapBiomas, aplicada ao município de Florianópolis/SC.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

O estudo da expansão urbana como um fenômeno espacial ganhou reconhecimento a partir de estudos que se iniciaram no ano de 2005 no âmbito do programa *Urban Expansion Initiative*, uma parceria entre a New York University, o Lincoln Institute of Land Policy e o UN-Habitat. A obra "*Planet of Cities*" (ANGEL, 2012) estabeleceu as bases conceituais para uma ciência das cidades, ao introduzir a ideia de que a expansão física das cidades é um processo inevitável que deve ser compreendido e planejado, em contraposição ao paradigma de contenção urbana predominante no planejamento urbano europeu e norte-americano.

Angel *et al*. (2010), demonstraram que as densidades urbanas médias apresentaram declínio ao longo do tempo em praticamente todas as regiões do mundo. Analisando uma amostra global de 120 cidades entre 1990 e 2000, os autores constataram que a densidade média de ocupação declinou a uma taxa de aproximadamente 2% ao ano, enquanto a área urbanizada expandiu-se a uma taxa significativamente superior ao crescimento populacional. Essa constatação reforçou a necessidade de instrumentos analíticos capazes de mensurar não apenas a extensão, mas a configuração espacial interna da ocupação urbana.

O trabalho de Angel *et al.* (2011), consolidou o paradigma de "fazer espaço" (*making room*) como alternativa ao paradigma de contenção. Os autores argumentam que, especialmente nos países em desenvolvimento, onde a urbanização é mais acelerada, as políticas urbanas devem antecipar e preparar o território para o crescimento inevitável, em vez de tentar impedi-lo. Essa preparação inclui a reserva de faixas de domínio para uma malha arterial de vias, a proteção de uma hierarquia de espaços públicos abertos e a realização de projeções realistas das necessidades futuras do solo urbano.

A metodologia de classificação da mancha urbana (*urban footprint*) desenvolvida por Angel *et al*. (2010) baseia-se na classificação de pixels de imagens de satélite em categorias, utilizando como critério a densidade de ocupação edificada no entorno imediato de cada pixel. O procedimento envolve as seguintes etapas:

- Classificação binária: cada pixel da imagem de satélite é classificado como "edificado" ou "não edificado" (incluindo uma categoria separada para corpos d'água). Na metodologia original, essa classificação é realizada a partir de imagens do satélite Landsat (resolução de 30 metros), utilizando índices espectrais de vegetação, como o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) e análise no infravermelho para distinguir superfícies impermeabilizadas de áreas vegetadas ou naturais.
- Cálculo de densidade por vizinhança: para cada pixel classificado como edificado, calcula-se a proporção de pixels edificados dentro de um círculo de vizinhança com raio de 586 metros, correspondente a uma área de aproximadamente 1 km². Esse raio foi definido por Angel et al. (2010) como representativo da "*distância de caminhada*" (*walking distance*), conceito que remete à escala de percepção espacial do pedestre e à unidade funcional mínima de vizinhança urbana.
- Classificação por limiares de densidade: com base na proporção de pixels

edificados no círculo de vizinhança, cada pixel edificado é classificado em uma das seguintes categorias:
    - Urbano Edificado Compacto (UEC): pixel edificado cujo entorno apresenta 50% ou mais de pixels edificados. Representa áreas de urbanização consolidada e densa;
    - Urbano Edificado Disperso (UED): pixel edificado cujo entorno apresenta entre 10% e 50% de pixels edificados. Representa áreas de urbanização em processo de consolidação ou de padrão suburbano;
    - Rural Edificado (RE): pixel edificado cujo entorno apresenta menos de 10% de pixels edificados. Representa edificações isoladas em contexto predominantemente rural.
- Delimitação da mancha urbana e classificação dos espaços abertos: a mancha urbana (*urban footprint*) é definida como o conjunto de pixels onde a densidade de edificação no entorno excede 10% (ou seja, a soma dos pixels UEC e UED). Os espaços não edificados são então classificados em:
    - Espaço Aberto Urbanizado (EAU): espaços não edificados situados dentro da mancha urbana, correspondendo aos vazios urbanos;
    - Borda de Transição: espaços não edificados situados até 100 metros da borda externa da mancha urbana;
    - Espaço Aberto Rural (EAR): todos os demais espaços não edificados, situados fora da mancha urbana e fora da borda de transição.

Essa classificação permite calcular métricas quantitativas de fragmentação, como a proporção de vazios urbanos em relação à mancha total, o grau de compacidade da mancha edificada e a relação entre edificação compacta e dispersa.

A aplicação mais sistemática e documentada do método Angel *et al*. (2010) no contexto sul-americano foi realizada pela *Infraestructura de Datos Espaciales de la Provincia de Córdoba (IDECOR)*, na Argentina. A IDECOR desenvolveu e publicou o "*Mapa de Fragmentación Urbana*" para toda a província de Córdoba, utilizando a metodologia adaptada às condições locais. O informe técnico de 2020 (IDECOR, 2020) detalha o processo de classificação da mancha urbana para as cidades e localidades da província de Córdoba, utilizando dados de alta resolução espacial e aplicando os mesmos limiares de densidade (50% para UEC, 10%-50% para UED, <10% para RE) propostos por Angel *et al.* (2010).

A experiência da IDECOR demonstrou que o método pode ser aplicado, com sucesso, em contextos distintos do norte-americano e europeu onde foi originalmente concebido, adaptando-se às características das cidades latino-americanas. Os resultados obtidos para a cidade de Córdoba e sua região metropolitana evidenciaram padrões de fragmentação urbana, com proporções expressivas de espaços abertos urbanizados (vazios urbanos) dentro da mancha urbana.

Um aspecto particularmente relevante da aplicação da IDECOR é a articulação entre a análise de fragmentação urbana e a gestão cadastral territorial. IDECOR (2020) demonstra como as categorias de classificação da mancha urbana podem subsidiar decisões

administrativas relacionadas à delimitação de '*ejidos'* municipais, à planificação da extensão de redes de infraestrutura e à identificação de áreas prioritárias para densificação ou regularização fundiária.

O trabalho de Sánchez et al. (2018), ampliou a aplicação do método Angel *et al*. (2010) para cidades da América Latina, incluindo estudos de caso na Colômbia, com ênfase em cidades como Valledupar e Montería. O trabalho destacou a importância de integrar a análise da mancha urbana com projeções demográficas de longo prazo (30 anos), permitindo estimar as necessidades futuras de solo urbano e planejar a expansão dessas áreas. Os planos de expansão urbana desenvolvidos nesse contexto incorporaram três elementos fundamentais: a reserva de faixas de domínio para uma malha arterial de vias, a proteção de espaços públicos abertos e a definição de limites administrativos para o crescimento projetado.

No âmbito global, ANGEL *et al.* (2016), compilou dados de expansão urbana para 200 cidades distribuídas em todos os continentes, produzindo uma base de dados comparativa. O atlas documenta, para cada cidade, a evolução da mancha urbana em três períodos temporais (1990, 2000 e 2014), classificando a expansão em categorias como preenchimento (*infill*), extensão (*extension*), desenvolvimento descontínuo (*leapfrog*) e inclusão. Essas categorias complementam a análise de fragmentação ao revelar os mecanismos espaciais predominantes de expansão de cada cidade.

2.1. Geotecnologias para análise da expansão urbana

O *Google Earth Engine* (GEE) é uma plataforma de processamento geoespacial baseada em computação em nuvem, desenvolvida pela Google e disponibilizada gratuitamente para uso acadêmico e de pesquisa desde 2010 (GORELICK et al., 2017). A plataforma combina um catálogo de dados de sensoriamento remoto e geoespaciais com alta capacidade computacional, permitindo a execução de análises espaciais em escala planetária sem a necessidade de infraestrutura computacional local.

O GEE disponibiliza uma API (*Application Programming Interface*) nas linguagens de programação *Javascript* e *Python*, além de um editor de código *web* interativo (*Code Editor*), que permite a prototipação rápida e a execução de scripts de processamento geoespacial. A plataforma oferece acesso a catálogos de imagens de satélite (incluindo as séries Landsat, Sentinel, MODIS, entre outras), dados climáticos, modelos digitais de elevação e produtos derivados como mapeamentos de uso e cobertura do solo.

O GEE apresenta vantagens em relação aos *softwares* de SIG (Sistemas de Informação Geográfica) tradicionais (*desktop GIS*), sendo a principal delas a capacidade de executar operações de cálculo sobre imagens de alta resolução sem restrições de memória. Algumas operações que demandariam horas de processamento em ambiente *desktop*, são executadas rapidamente na ferramenta.

2.2. MapBiomas

O Projeto MapBiomas é uma iniciativa para a produção de mapeamentos anuais de uso e cobertura da terra para o Brasil. Desde sua primeira coleção (*Collection 1*), o MapBiomas utiliza algoritmos de classificação supervisionada aplicados a séries temporais de imagens

de satélite, processados integralmente na plataforma *Google Earth Engine* (SOUZA JR. et al., 2020).

A *Collection 2* é uma coleção de dados classificados que utiliza como insumo imagens de satélite Sentinel 2 de 10 m, repesentando um avanço em relação aos 30 m de resolução utilizados pela classificação anterior, baseada em imageamentos do satélite Landsat. Essa melhoria na resolução permite a identificação de feições de menor porte, como edificações individuais, vias locais e pequenos lotes, que seriam generalizados na resolução de 30 metros.

A classificação do MapBiomas de 10 m segue a mesma estrutura hierárquica do MapBiomas padrão, sendo a classe 24 (Infraestrutura Urbana) a categoria que corresponde às áreas edificadas e impermeabilizadas. Para os fins deste estudo, a classe 24 é utilizada como equivalente à classificação binária "*edificado*" da metodologia Angel *et al.* (2010), substituindo a etapa de classificação supervisionada.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Área de estudo

O município de Florianópolis, capital do estado de Santa Catarina, está localizado na região Sul do Brasil. Segundo o Censo Demográfico de 2022 (IBGE, 2023), o município possui 537.211 habitantes distribuídos em uma área territorial de aproximadamente 675 km². Seu território possui mais de 90% de seu território situado na Ilha de Santa Catarina, conectada ao continente por três pontes, enquanto uma pequena porção continental completa o perímetro municipal.

O município integra a Região Metropolitana da Grande Florianópolis, composta por 22 municípios, e apresenta intenso processo de conurbação com os municípios vizinhos de São José, Palhoça e Biguaçu, formando um núcleo urbano conurbado na porção continental e nos acessos às pontes.

O crescimento populacional acelerado nas últimas décadas, impulsionado pelo turismo, pela migração e pelo setor de tecnologia da informação resultou em uma forte expansão urbana tanto na porção central da ilha (distrito sede) quanto nas porções norte e sul. O Plano Diretor de Florianópolis (Lei Complementar nº 739/2023) reconhece essa dinâmica e busca promover a densificação de áreas já urbanizadas e a multicentralidade como estratégias de ordenamento territorial.

3.2. Base de dados

Os dados utilizados neste estudo compreendem dois conjuntos principais:

- Mapa da classificação de uso e cobertura do solo com resolução espacial de 10 metros, referente ao ano de 2023, produzido pelo Projeto MapBiomas a partir de imagens do satélite Sentinel-2 do programa Copernicus da Agência Espacial Europeia. O acesso ao dado foi realizado diretamente na plataforma Google Earth Engine por meio do *asset* `projects/mapbiomas-public/assets/brazil/lulc_10m/collection2/mapbiomas_10m_collection2_integ

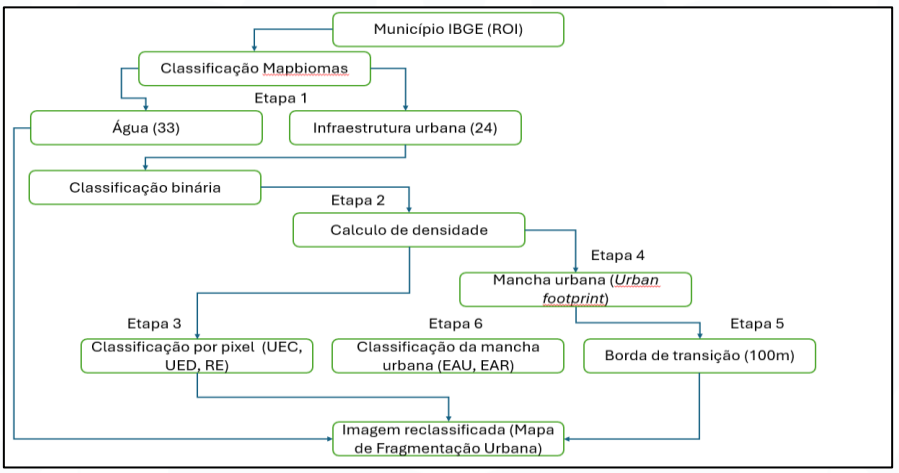
ration_v1`, selecionando-se a banda `classification_2023`. A legenda segue a estrutura hierárquica do MapBiomas, sendo utilizadas neste estudo as classes 24 (Infraestrutura Urbana/Edificado) e 33 (Rio, Lago e Oceano/Água). Os dados são disponibilizados sob licença Creative Commons CC-BY-SA.

- Limites municipais - IBGE 2024: malha digital dos municípios brasileiros, edição 2024, produzida pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. A camada vetorial foi importada na plataforma GEE e utilizada para delimitar a região de interesse (ROI) correspondente ao município de Florianópolis, por meio de filtragem pelo atributo `NM_MUN`.

3.3. Método

A metodologia de análise da fragmentação urbana foi implementada seguindo as etapas propostas por Angel et al. (2010) e IDECOR (2020) com a adaptação de substituir a classificação supervisionada de imagens de satélite pelos dados já classificados do MapBiomas. O fluxo metodológico compreende seis etapas sequenciais, conforme descrito a seguir e sintetizado na Figura 1.

Figura 1 – Fluxo metodológico para geração do mapa de fragmentação urbana.



Fonte: Autores (2026).

Etapa 1 - Separação das classes: a imagem de classificação do MapBiomas é segmentada em três categorias binárias: (a) edificado - pixels classificados como classe 24 (Infraestrutura Urbana); (b) água - pixels classificados como classe 33 (Água); (III) espaço aberto - todos os pixels que não são edificados nem água, abrangendo formações florestais, agropecuárias, campos naturais e demais coberturas.

Etapa 2 - Cálculo da densidade de edificação por vizinhança: para cada pixel da imagem, calcula-se a proporção de pixels edificados dentro de um círculo de vizinhança com raio de 586 metros, correspondente a uma área de aproximadamente 1 km² ($\pi \times 586^2 \approx 1.078.000$ m² ≈ 1,08 km²). Essa operação é implementada no GEE por meio da função `*reduceNeighborhood*` com o redutor `*ee.Reducer.mean*()` e kernel circular (`*ee.Kernel.circle*`), que calcula a média dos valores binários (0 e 1) na vizinhança,

resultando em uma superfície contínua de densidade variando de 0 a 1 para cada pixel.

O raio de 586 metros foi mantido conforme especificado por Angel et al. (2010), pois representa a escala de análise do método, a "*distância de caminhada*", e permite a comparabilidade direta dos resultados com estudos prévios, incluindo a aplicação da IDECOR em Córdoba.

Etapa 3 - Classificação dos pixels edificados: cada pixel classificado como edificado na Etapa 1 é reclassificado em uma de três categorias, conforme o valor de densidade calculado na Etapa 2:

- Urbano Edificado Compacto (UEC): densidade ≥ 0,50 (50% ou mais do entorno edificado);
- Urbano Edificado Disperso (UED): densidade ≥ 0,10 e < 0,50 (entre 10% e 50% do entorno edificado);
- Rural Edificado (RE): densidade < 0,10 (menos de 10% do entorno edificado).

Etapa 4 - Delimitação da mancha urbana: a mancha urbana (*urban footprint*) é definida pelo conjunto de pixels cuja densidade de edificação no entorno excede 10% (densidade > 0,10). Essa delimitação abrange tanto os pixels edificados (UEC e UED) quanto os espaços abertos que se encontram dentro da envoltória de densidade superior a 10%.

Etapa 5 - Borda de transição: define-se uma faixa de transição correspondente aos pixels de espaço aberto situados a até 100 metros da borda externa da mancha urbana. Essa faixa é calculada mediante a transformação rápida de distância (`*fastDistanceTransform*`) aplicada à imagem da mancha urbana, seguida da conversão de distância em pixels para distância em metros.

Etapa 6 - Classificação dos espaços abertos: os pixels de espaço aberto (não edificados e não aquáticos) são classificados em duas categorias complementares:

- Espaço Aberto Urbanizado (EAU): pixels de espaço aberto situados dentro da mancha urbana (densidade do entorno > 10%). Representam os vazios urbanos - terrenos não edificados entremeados ao tecido urbano, que podem corresponder a lotes vagos, praças, parques urbanos ou áreas de preservação;
- Espaço Aberto Rural (EAR): pixels de espaço aberto situados fora da mancha urbana e fora da borda de transição. Representam áreas de uso agropecuário, formações naturais ou outros usos não urbanos.

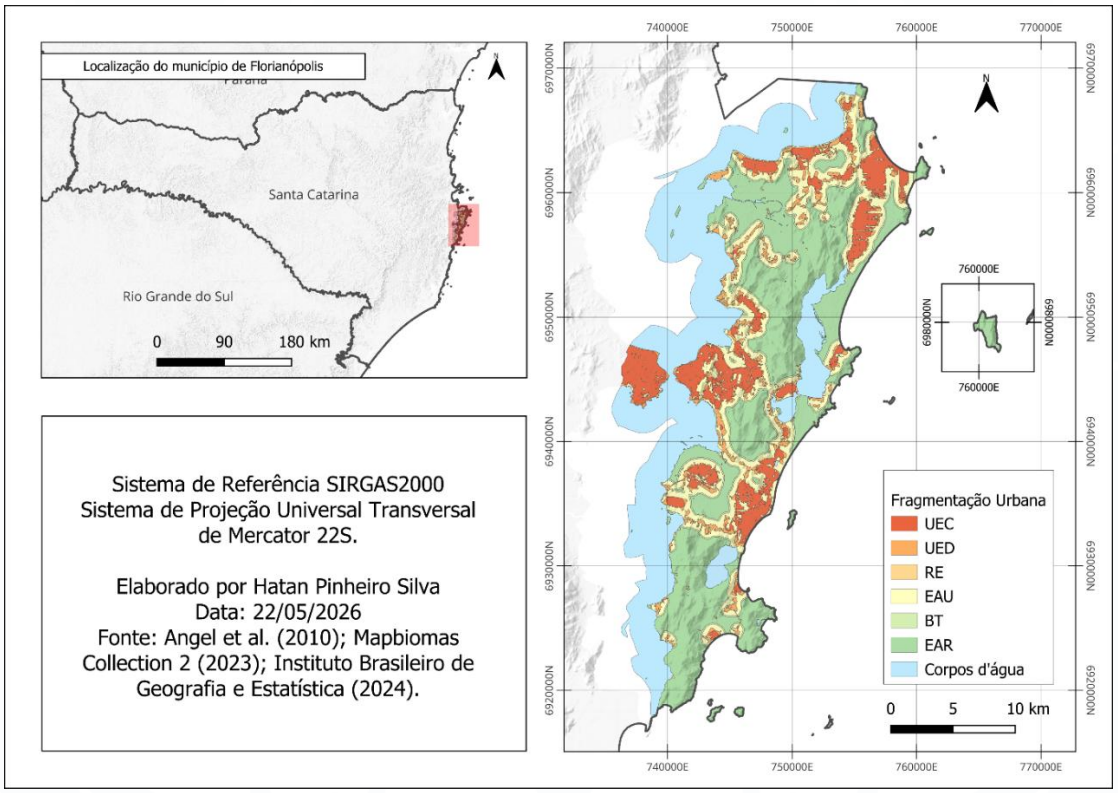
A composição final resulta em uma imagem reclassificada com sete categorias mutuamente exclusivas, codificadas numericamente de 1 a 7: (1) UEC, (2) UED, (3) RE, (4) EAU/Vazios, (5) Borda, (6) EAR e (7) Água. O processamento integral foi realizado na plataforma *Google Earth Engine*, utilizando a *API Javascript* por meio do *Code Editor*.

As funções do script incluem: `*reduceNeighborhood*` para o cálculo de estatísticas zonais em janela móvel circular; `*fastDistanceTransform*` para o cálculo de distâncias euclidianas em formato matricial; e `*ee.Image.pixelArea().sqrt()*` para a conversão de distâncias em pixels para metros, levando em conta o sistema de projeção da imagem. A exportação é configurada para resolução de 10 metros, compatível com a resolução dos dados de entrada.

4. RESULTADOS

A aplicação da metodologia proposta ao município de Florianópolis produziu o mapa de fragmentação urbana apresentado na Figura 2, que classifica todo o território municipal nas sete categorias. A análise visual do mapa revela padrões espaciais distintos de urbanização ao longo da ilha e da porção continental do município.

Figura 2 – Mapa de fragmentação urbana do município de Florianópolis.



Fonte: Autores (2026).

A região central da Ilha de Santa Catarina, correspondente ao distrito-sede e áreas adjacentes (bairros Centro, Trindade, Itacorubi, Córrego Grande, Santa Mônica, Pantanal e adjacências), apresenta predomínio de pixels classificados como Urbano Edificado Compacto (UEC), indicando urbanização consolidada e densa. Essa concentração estende-se linearmente em direção ao continente, cruzando as pontes e conectando-se ao núcleo urbano conurbado de São José.

Os bairros do norte da ilha (Canasvieiras, Jurerê, Ingleses e Rio Vermelho), apresentam padrão predominantemente classificado como Urbano Edificado Compacto (UEC), com os balneários da Daniela, Brava e Santinho apresentando uma classificação dispersa (UED). Esse padrão é consistente com a ocupação turístico-residencial que caracteriza essas localidades, com loteamentos de menor densidade e maior presença de espaços intersticiais. Padrão similar ao observado nos bairros do sul da Ilha de Santa Catarina (Armação, Carianos, Campeche, e Pântano do Sul), que apresentam um padrão mais compacto com bordas dispersas, diferente do Ribeirão da Ilha e toda sua continuidade até a

Caeira da Barra do Sul.

Os Espaço Aberto Urbanizado (EAU), ou vazios urbanos, aparecem em diferentes regiões da ilha. Esses vazios correspondem predominantemente a áreas de preservação (dunas, manguezais, encostas), mas também incluem parcelas não edificadas em meio a bairros urbanizados, representando potencial de densificação ou, alternativamente, áreas que necessitam de proteção especial.

Os pixels classificados como Rural Edificado (RE) são esparsos e localizam-se predominantemente nas porções mais isoladas do sul e leste da ilha, correspondendo a residências rurais, sítios e propriedades de menor porte fora do contexto urbano, principalmente no Sertão do Peri.

A Tabela 1 apresenta a quantificação das áreas de cada classe de fragmentação urbana para o município de Florianópolis, obtida a partir da contagem de pixels da imagem classificada.

Tabela 1 - Distribuição das classes de fragmentação urbana em Florianópolis.

Nome	**Classe**	**Área (m²)**	**Área (%)**
Urbano Edificado Compacto	1 (UEC)	68.622,185	16,57
Urbano Edificado Disperso	2 (UED)	28.844,584	6,97
Rural Edificado	3 (RE)	995,713	0,24
Espaço Aberto Urbanizado	4 (EAU)	96.517,115	23,31
Borda de Transição	5	18.992,923	4,59
Espaço Aberto Rural	6 (EAR)	200.152,628	48,33
Total		**414.125,148**	**100,00**

Os resultados indicam que a área total edificada (UEC + UED + RE) corresponde a 98.462,482 m², representando 23,78% do território municipal em análise. A Mancha Urbana, definida como a área onde a densidade de edificação no entorno excede 10%, totaliza 193.983,884 m² (UEC + UED + EAU), correspondendo a 46,85% do território. Esse valor evidencia que a proporção de vazios urbanos (EAU) quase se iguala à área efetivamente edificada do município, uma vez que o EAU representa 23,31% da área total e compõe 49,75% do interior da própria mancha urbana.

O Espaço Aberto Rural (EAR) predomina territorialmente com 200.152,628 m² (48,33% do município), refletindo a cobertura vegetal da Ilha de Santa Catarina, que inclui áreas de Mata Atlântica, restingas, manguezais e dunas protegidas pela legislação ambiental.

Ressalta-se que, para a Tabela 1, não foram contabilizados os valores referentes a corpos d'água. Como os limites municipais sobrepõem grandes extensões das Baías Norte e Sul, Lagoa da Conceição e Lagoa do Peri, essa classe abrange um total de 1.417.333,785 m², um valor que ultrapassa 77% da área total real do município.

5. DISCUSSÃO

A principal vantagem da abordagem proposta reside na eliminação da subjetividade inerente à classificação edificado/não-edificado. Na metodologia original, essa classificação é realizada mediante definição de limiares em índices espectrais (tipicamente NDVI), o que introduz variabilidade entre diferentes operadores e contextos geográficos. O MapBiomas, por sua vez, aplica algoritmos de *machine learning* (*Random Forest*) calibrados e validados por equipes especializadas para cada bioma brasileiro, utilizando séries temporais de imagens Sentinel-2 e extensas amostras de treinamento. Embora nenhuma classificação automatizada seja isenta de erros, a padronização do processo e a escala nacional da validação conferem ao MapBiomas uma consistência metodológica de difícil reprodução em classificações realizadas individualmente.

Como principal limitação, identifica-se a dependência da acurácia da classificação MapBiomas. A *Collection 2* do MapBiomas está em versão beta, o que significa que refinamentos na classificação podem alterar os resultados obtidos. Especificamente para a classe 24 (Infraestrutura Urbana), há possibilidade de erros de omissão (edificações não detectadas, especialmente em áreas de baixa densidade sob cobertura arbórea) e erros de comissão (superfícies impermeáveis não edificadas, como estacionamentos e vias, classificadas como edificado). No entanto, para a escala de análise utilizada neste estudo esses erros pontuais tendem a ser atenuados pela operação de média espacial, uma vez que omissões e comissões individuais são diluídas nos pixels da vizinhança.

Outra consideração relevante é que a metodologia original de Angel et al. (2010) foi concebida para aplicação em imagens multitemporais com três períodos de referência (1990, 2000 e 2014), permitindo a análise de trajetórias de expansão urbana. A adaptação proposta neste estudo demonstra a aplicação para um único período (2023), mas a disponibilidade de dados anuais do MapBiomas para o período 2016-2023 abre a possibilidade de análises multitemporais com resolução anual.

A IDECOR aplicou o método para a cidade de Córdoba e demais localidades da província, utilizando imagens de alta resolução e classificação proprietária de áreas edificadas. Os resultados reportados pela IDECOR para a cidade de Córdoba evidenciaram padrões de fragmentação que, embora significativos, diferem qualitativamente dos observados em Florianópolis.

Enquanto Córdoba apresenta uma mancha urbana predominantemente contínua com fragmentação concentrada na periferia suburbana, Florianópolis exibe um padrão de fragmentação intrinsecamente relacionado à sua condição insular. Os múltiplos núcleos urbanos da ilha geram um padrão de fragmentação que não é resultado exclusivo de processos de espraiamento urbano, mas também de condicionantes geomorfológicos e ambientais. Essa distinção é fundamental para a interpretação dos resultados: enquanto uma elevada Proporção de Vazios Urbanos (PVU) em Córdoba pode indicar predominantemente terrenos ociosos passíveis de densificação, o mesmo indicador em Florianópolis reflete uma combinação de terrenos ociosos com áreas de preservação que não devem ser ocupadas.

Essa diferença ressalta a importância de complementar a análise quantitativa de fragmentação com informações qualitativas sobre a natureza dos espaços abertos

urbanizados. A integração com dados cadastrais, que permitem distinguir terrenos vagos de áreas de preservação, parques e equipamentos públicos, constitui um passo necessário para a aplicação plena dos resultados de fragmentação à gestão territorial, reforçando a vocação multifinalitária do CTM.

Apesar das diferenças contextuais, ambas as aplicações, IDECOR em Córdoba e a proposta para Florianópolis, demonstram a importância da aplicação do método em contextos urbanos sul-americanos, validando a aplicabilidade dos limiares de densidade (50% e 10%) e do raio de vizinhança (586 metros) em cidades com morfologias e dinâmicas distintas.

6. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos para Florianópolis indicam um padrão de fragmentação acentuado que reflete tanto as condicionantes geomorfológicas da Ilha de Santa Catarina quanto a dinâmica de ocupação diversificada em diversos núcleos. Essas métricas fornecem subsídios quantitativos para o planejamento territorial, a definição de perímetros urbanos e a identificação de áreas prioritárias para políticas de densificação ou proteção ambiental.

A contribuição metodológica principal deste trabalho reside na demonstração de que dados de mapeamento de uso do solo (MapBiomas) podem substituir a etapa de classificação supervisionada de imagens de satélite na implementação do método de Angel et al. (2010), ampliando a resolução espacial e simplificando significativamente o fluxo de processamento. A implementação em plataforma de computação em nuvem (GEE) garante a reprodutibilidade e a escalabilidade da análise, permitindo sua aplicação a qualquer município brasileiro sem custos de *software* ou infraestrutura computacional.

No que tange à articulação com o Cadastro Territorial Multifinalitário, o estudo demonstrou que os produtos da análise de fragmentação urbana constituem informações estratégicas para múltiplas finalidades do CTM. A experiência da IDECOR em Córdoba, Argentina, constitui um precedente bem-sucedido dessa articulação, demonstrando a viabilidade de integrar análises de fragmentação urbana a infraestruturas de dados espaciais e sistemas de gestão territorial.

A aplicação da metodologia apresenta limitações que devem ser consideradas na interpretação dos resultados. A principal delas reside na dependência direta da acurácia temática da classe 24 (Infraestrutura Urbana) do MapBiomas, que está sujeita a erros. Assim, a validação de campo dos dados do MapBiomas e o cruzamento dos produtos gerados com as restrições de uso do solo do Plano Diretor municipal, com as parcelas do Cadastro Territorial Multifinalitário (CTM) configuram-se como etapas subsequentes indispensáveis para a aplicação prática e segura desse diagnóstico na gestão territorial.

Recomenda-se aos gestores municipais e profissionais de cadastro e planejamento urbano a adoção desta ferramenta de diagnóstico territorial, contribuindo para a efetivação do princípio de multifinalidade do cadastro e para a qualificação das políticas públicas de ordenamento do solo urbano. A replicação do método para séries temporais e para conjuntos de municípios permitirá a construção de indicadores comparativos de fragmentação urbana em diferentes escalas, subsidiando políticas públicas de desenvolvimento urbano

sustentável.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), também ao Laboratório de Geoprocessamento (LabGeop) da Universidade Federal de Santa Catarina e ao Grupo de Observação e Transformação do Território (GOTT).

Referências

ANGEL, S. **Planet of Cities**. Cambridge: Lincoln Institute of Land Policy, 2012. 360 p.

ANGEL, S.; BLEI, A. M.; PARENT, J.; LAMSON-HALL, P.; GALARZA SÁNCHEZ, N. **Atlas of Urban Expansion - 2016 Edition**. Volume 1: Areas and Densities. New York: New York University; Nairobi: UN-Habitat; Cambridge: Lincoln Institute of Land Policy, 2016.

ANGEL, S.; PARENT, J.; CIVCO, D. L.; BLEI, A. M. **Making Room for a Planet of Cities**. Policy Focus Report. Cambridge: Lincoln Institute of Land Policy, 2011. 76 p.

ANGEL, S.; PARENT, J.; CIVCO, D. L.; BLEI, A. M. **The Persistent Decline in Urban Densities**: Global and Historical Evidence of Sprawl. Working Paper. Cambridge: Lincoln Institute of Land Policy, 2010.

BRASIL. Lei nº 10.257, de 10 de julho de 2001. Regulamenta os artigos 182 e 183 da Constituição Federal, estabelece diretrizes gerais da política urbana e dá outras providências (Estatuto da Cidade). **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 11 jul. 2001.

BRASIL. Ministério das Cidades. Portaria nº 511, de 7 de dezembro de 2009. Estabelece Diretrizes para a criação, instituição e atualização do Cadastro Territorial Multifinalitário (CTM) nos municípios brasileiros. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 8 dez. 2009.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Portaria nº 3.242, de 9 de novembro de 2022. Aprova as diretrizes para a criação, a instituição e a atualização do Cadastro Territorial Multifinalitário – CTM, nos municípios brasileiros. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 11 nov. 2022.

FLORIANÓPOLIS. Lei Complementar nº 739, de 2023. Dispõe sobre o Plano Diretor de Urbanismo do Município de Florianópolis. **Prefeitura Municipal de Florianópolis**, Florianópolis, 2023.

GALARZA SÁNCHEZ, N. **Urban Expansion in Latin American Cities**: Analyzing Trends and Developing Planning Frameworks. Working Paper WP18NG1. Cambridge: Lincoln Institute of Land Policy, 2018.

GORELICK, N.; HANCHER, M.; DIXON, M.; ILYUSHCHENKO, S.; THAU, D.; MOORE, R. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. **Remote Sensing of Environment**, [S. l.], v. 202, p. 18-27, 2017. DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.031.

INFRAESTRUCTURA DE DATOS ESPACIALES DE LA PROVINCIA DE CÓRDOBA (IDECOR). **Informe de fragmentación urbana 2020**. Córdoba: Gobierno de la Provincia de Córdoba, 2020.

INFRAESTRUCTURA DE DATOS ESPACIALES DE LA PROVINCIA DE CÓRDOBA (IDECOR). **Metadatos del Mapa de Fragmentación Urbana**. Córdoba: Gobierno de la Provincia de Córdoba, 2020.

INFRAESTRUCTURA DE DATOS ESPACIALES DE LA PROVINCIA DE CÓRDOBA (IDECOR). **Nuevo Mapa de Fragmentación Urbana en la Provincia de Córdoba**. Córdoba: Gobierno de la Provincia de Córdoba, 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo Demográfico 2022**: resultados do universo. Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Disponível em: https://censo2022.ibge.gov.br/. Acesso em: [dia] maio 2026.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Malha municipal digital do Brasil 2024**. Rio de Janeiro: IBGE, 2024. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais.html. Acesso em: [dia] maio 2026.

PROJETO MAPBIOMAS. **MapBiomas 10 metros — Collection 2 (beta)**. [S. l.]: Projeto MapBiomas, 2024. Disponível em: https://mapbiomas.org/. Acesso em: [dia] maio 2026.

SILVA, A. N. R. **O custo do solo urbano ocioso e uma nova sistemática de tributação da propriedade**. 1993. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1993.

SILVA, E. (org.). **Cadastro Territorial Multifinalitário Aplicado à Gestão Municipal**. Florianópolis: UFSC, 2023. 214 p. DOI: 10.5281/zenodo.7869277.

SOUZA, M. L. de. **Mudar a cidade**: uma introdução crítica ao planejamento e à gestão urbanos. 12. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2020.

SOUZA JR., C. M. et al. Reconstructing three decades of land use and land cover changes in Brazilian biomes with Landsat archive and Earth Engine. **Remote Sensing**, [S. l.], v. 12, n. 17, p. 2735, 2020. DOI: 10.3390/rs12172735.

UNITED NATIONS HUMAN SETTLEMENTS PROGRAMME (UN-HABITAT). **World Cities Report 2022**: Envisaging the Future of Cities. Nairobi: UN-Habitat, 2022.