



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO - CTC
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES E
GESTÃO TERRITORIAL - PPGTG

ROBERTO YOSHITAKA TAGUCHI

**OBTENÇÃO AUTOMÁTICA DA PROJEÇÃO DAS EDIFICAÇÕES SOBRE O
SOLO (*FOOTPRINT*) EM ÁREAS DE FAVELAS: UMA ABORDAGEM *FIT FOR
PURPOSE***

Florianópolis

2026

ROBERTO YOSHITAKA TAGUCHI

**OBTENÇÃO AUTOMÁTICA DA PROJEÇÃO DAS EDIFICAÇÕES SOBRE O
SOLO (*FOOTPRINT*) EM ÁREAS DE FAVELAS: UMA ABORDAGEM *FIT FOR
PURPOSE***

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial.

Orientadora: Profa. Lia Caetano Bastos, Dra.

Florianópolis

2026

Taguchi, Roberto Yoshitaka

Obtenção automática da projeção das edificações sobre o solo (footprint) em áreas de favelas: uma abordagem fit for purpose /Roberto Yoshitaka Taguchi ; orientadora, Lia Caetano Bastos, 2026.

75 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial, Florianópolis, 2026.

Inclui referências.

1. Engenharia de Transportes e Gestão Territorial. 2. LiDAR. 3. Favelas. 4. Cadastro Territorial Multifinalitário. 5. Fit for purpose. I. Bastos, Lia Caetano . II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial. III. Título.

Roberto Yoshitaka Taguchi

**OBTENÇÃO AUTOMÁTICA DA PROJEÇÃO DAS EDIFICAÇÕES SOBRE O
SOLO (*FOOTPRINT*) EM ÁREAS DE FAVELAS: UMA ABORDAGEM *FIT FOR
PURPOSE***

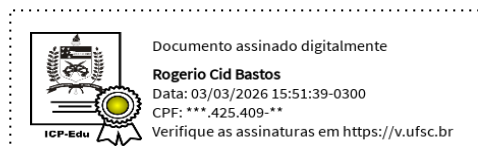
O presente trabalho em nível de Mestrado foi avaliado e aprovado em 08 de dezembro de 2025 pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Profa. Ana Maria Bencciveni Franzoni, Dra.
Universidade Federal de Santa Catarina

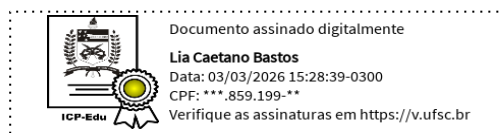
Prof. Everton da Silva, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Samuel Steiner dos Santos, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial.



Prof. Rogério Cid Bastos, Dr.
Coordenação do Programa de Pós-Graduação



Profa. Lia Caetano Bastos, Dra.
Orientadora

Florianópolis, 2026

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me conceder força e serenidade ao longo desta caminhada, permitindo que cada desafio se tornasse uma oportunidade de aprendizado e crescimento.

À minha esposa, companheira de vida em todos os momentos, pela presença constante, compreensão e amor incondicional. Sua parceria e apoio foram fundamentais para que esta jornada fosse possível, mesmo nos períodos mais desafiadores.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial da Universidade Federal de Santa Catarina, na pessoa da professora Dra. Lia Caetano Bastos, expresso minha sincera gratidão pela orientação atenta, pela disponibilidade em cada etapa e pela sensibilidade em tornar mais leve e enriquecedor este processo de formação.

Aos amigos da turma do PPGTG, em especial a amiga Selene, pela convivência generosa, pela troca de experiências e pelo compartilhamento de ideias e desafios. Agradeço, de modo particular, pelo tema herdado do trabalho conjunto que realizamos, cuja continuidade serviu de inspiração e base para o desenvolvimento desta pesquisa. Gratidão a Ednez pelo apoio na revisão e compartilhamento dos momentos de angústia.

À Receita Federal do Brasil, pela oportunidade de qualificação profissional e pelo incentivo à formação acadêmica, que possibilitaram a realização deste trabalho e contribuíram para o meu aperfeiçoamento técnico e humano.

Por fim, a todos que, de alguma forma, contribuíram com palavras, gestos, estímulos e apoio, deixo o meu mais sincero e profundo agradecimento.

*Se você é neutro em situações de injustiça,
você escolheu o lado do opressor.*

Desmond Tutu

RESUMO

A extração automática de bordas de telhado (*roof outlines*) a partir de dados LiDAR e imagens aéreas tem sido utilizada para representar edificações e gerar modelos urbanos tridimensionais em áreas formais das cidades, onde as construções apresentam padrões geométricos regulares. Entretanto, a aplicação dessas técnicas em favelas e comunidades urbanas informais ainda é incipiente e trazem desafios adicionais devido à morfologia irregular e à alta densidade das edificações, que desafiam os métodos convencionais de modelagem. Diante dessa lacuna, este trabalho tem por objetivo avaliar a aplicabilidade de técnicas automáticas na extração da projeção bidimensional das edificações sobre o terreno (*footprints*) em áreas de favela, a partir de dados LiDAR aerotransportados. O estudo utiliza métodos de segmentação da nuvem de pontos baseados em crescimento de regiões orientado por coplanaridade local, identificando superfícies planas a partir da análise das normais. A partir dessas superfícies, realiza-se a extração dos perímetros por abordagem híbrida baseada em α -shape adaptativo, complementada por operações geométricas de recuperação e fusão, com o propósito de gerar bases geométricas compatíveis com a abordagem *Fit-for-Purpose* (FFP) para estruturação de um Sistema de Informação Geográfica (SIG). As etapas metodológicas incluem o pré-processamento e classificação da nuvem de pontos, o cálculo do Modelo Digital de Superfície Normalizado (MDSN), a extração dos polígonos representativos e a avaliação da aderência geométrica por meio das métricas IoU, F1-Score e Distância de Hausdorff. Sob a perspectiva FFP, o estudo demonstrou uma forma viável de obtenção automática das geometrias das áreas de favela e comunidades urbanas, abrindo novas possibilidades para a estruturação de bancos de dados geoespaciais consistentes e atualizáveis. Esses bancos de dados permitirão estruturar, relacionar e analisar os registros territoriais, promovendo a sistematização das informações e a geração de conhecimento qualificado capaz de subsidiar a formulação de políticas públicas baseadas em evidências, favorecendo o reconhecimento das características e da individualidade de cada território. Essa perspectiva contribui para alinhar as ações municipais aos princípios do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 11 (ODS 11), voltado à promoção de cidades inclusivas, seguras, resilientes e sustentáveis.

Palavras-chave: *footprint*, favelas; LiDAR, *Fit for Purpose*.

ABSTRACT

Automatic extraction of roof outlines from LiDAR data and aerial imagery has been used to represent buildings and generate three-dimensional urban models in formal urban areas, where constructions present regular geometric patterns. However, the application of these techniques in slums and informal urban settlements remains incipient and poses additional challenges due to irregular morphology and the high density of buildings, which challenge conventional modeling methods. In view of this gap, this study aims to evaluate the applicability of automatic techniques for extracting the two-dimensional projection of buildings onto the ground (footprints) in slum areas using airborne LiDAR data. The study employs point-cloud segmentation methods based on region growing guided by local coplanarity, identifying planar surfaces through normal vector analysis. From these surfaces, perimeter extraction is performed using a hybrid approach based on adaptive α -shape, complemented by geometric recovery and fusion operations, with the purpose of generating geometric datasets compatible with the Fit-for-Purpose (FFP) approach for the structuring of a Geographic Information System (GIS).

The methodological steps include point-cloud preprocessing and classification, computation of the Normalized Digital Surface Model (nDSM), extraction of representative polygons, and evaluation of geometric agreement using IoU, F1-Score, and Hausdorff Distance metrics. From the FFP perspective, the study demonstrated a viable approach for the automatic acquisition of building geometries in slums and informal settlements, opening new possibilities for the structuring of consistent and updatable geospatial databases. These databases will enable the structuring, integration, and analysis of territorial records, promoting the systematization of information and the generation of qualified knowledge capable of supporting evidence-based public policies, while recognizing the characteristics and individuality of each territory. This perspective contributes to aligning municipal actions with the principles of Sustainable Development Goal 11 (SDG 11), aimed at promoting inclusive, safe, resilient, and sustainable cities.

Keywords: footprint; slums; LiDAR; Fit-for-Purpose.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - FLUXO DE PROCESSAMENTO - LiDAR	44
FIGURA 2 - MAPA DE LOCALIZAÇÃO	54
FIGURA 3 - MORFOLOGIA DAS EDIFICAÇÕES	59
FIGURA 4 - DISTRIBUIÇÃO 3D DOS PONTOS LiDAR.....	60
FIGURA 5 – POLÍGONOS RESULTANTES DO PROCESSAMENTO DOS DADOS LiDAR	61
FIGURA 6 - <i>FOOTPRINTS</i> RESULTANTES DA SEGMENTAÇÃO SOBRE A ORTOFOTO	62
FIGURA 7 - BASE GEOMÉTRICA PARA ELABORAÇÃO DO BANCO DE DADOS	63

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1- TRABALHOS ACADÊMICOS DO PPTG RELACIONADOS	19
QUADRO 2 - ESTATÍSTICAS GLOBAIS DAS MÉTRICAS DE ACURÁCIA GEOMÉTRICA	64
QUADRO 3 - CLASSIFICAÇÃO DOS POLÍGONOS POR CATEGORIA DE ADERÊNCIA (IoU).....	65
QUADRO 4 - CLASSIFICAÇÃO DOS POLÍGONOS POR QUALIDADE (F1- SCORE).....	65

LISTA DE ABREVIATURAS SIGLAS

ALS	<i>Airborne Laser Scanning</i>
ASPRS	<i>American Society for Photogrammetry and Remote Sensing</i>
BNH	Banco Nacional da Habitação
CEBRAP	Centro Brasileiro de Análise e Planejamento
COBRAC	Congresso Brasileiro de Cadastro
COHAB	Companhia de Habitação
CTM	Cadastro Territorial Multifinalitário
DBSCAN	<i>Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise</i>
DEM	<i>Digital Elevation Model</i>
DMC	<i>Digital Mapping Camera</i>
DOI	<i>Digital Object Identifier</i>
EPS	<i>European Petroleum Survey Group</i> (sistema de referência espacial)
FFP	<i>Fit for Purpose</i>
FIG	<i>International Federation of Surveyors</i>
GLTN	<i>Global Land Tool Network</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GSD	<i>Ground Sample Distance</i>
HAG	<i>Height Above Ground</i>
IAPAS	Instituto de Administração da Previdência e Assistência Social
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
IPTU	Imposto Predial e Territorial Urbano
LADM	<i>Land Administration Domain Model</i>
LAS	<i>LASer file format</i>
LASPY	Biblioteca Python para manipulação de arquivos LAS/LAZ
LAZ	Formato comprimido do arquivo LAS
LiDAR	<i>Light Detection and Ranging</i>
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDS	Modelo Digital de Superfície
MDT	Modelo Digital de Terreno
NADIR	Ponto no solo diretamente abaixo do sensor
NSSDA	<i>National Standard for Spatial Data Accuracy</i>
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
OSM	<i>OpenStreetMap</i>

PCA	<i>Principal Component Analysis</i>
PCD	Padrão Cartográfico Digital
PCL	<i>Point Cloud Library</i>
PEC-PCD	Padrão de Exatidão Cartográfica para Produtos Cartográficos Digitais
PMS	Prefeitura Municipal de São Paulo
PNUD	Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento
PPGTG	Programa de Pós-Graduação em Geografia (UFSC)
REURB	Regularização Fundiária Urbana
RMSE	<i>Root Mean Square Error</i>
SDG	<i>Sustainable Development Goals</i>
SGB	Sistema Geodésico Brasileiro
SHP	<i>Shapefile</i>
SINTER	Sistema Nacional de Gestão de Informações Territoriais
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
STDM	<i>Social Tenure Domain Model</i>
TIN	<i>Triangular Irregular Network</i>
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
UN-HABITAT	<i>United Nations Human Settlements Programme</i>
UTM	<i>Universal Transverse Mercator</i>

Sumário

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	15
1.2	OBJETIVO GERAL	16
1.2.1	Objetivos Específicos	17
1.3	JUSTIFICATIVA	17
1.4	ADERÊNCIA AO PPGTG	18
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	20
2	REFERENCIAL TEÓRICO	21
2.1	URBANIZAÇÃO E FAVELAS NO BRASIL	21
2.1.1	Favelas e territórios urbanos no mapa	23
2.1.2	Definição de Favela	24
2.1.3	Produção do IPEA sobre Favelas	25
2.2	LADM, FIT-FOR-PURPOSE E O CTM BRASILEIRO	26
2.2.1	STDM e Fit-for-Purpose	27
2.2.2	O FFP em prática: experiências internacionais	29
2.2.3	A evolução cadastral no contexto brasileiro	30
2.3	A EVOLUÇÃO LIDAR	31
2.3.1	Segmentação de Pontos LiDAR e Extração Vetorial de Perímetros	38
2.3.2	Implementação computacional e bibliotecas utilizadas	39
2.3.3	<i>Footprints</i> de edificações a partir de imagens orbitais por <i>deep learning</i>	41
3	METODOLOGIA	42
3.1	MATERIAIS	42
3.2	FLUXO DO PROCESSAMENTO DA NUVEM DE PONTOS	43
3.3	SEGMENTAÇÃO POR REGION GROWING COM ÍNDICES	45
3.3.1	Estimação das Normais por Análise de Componentes Principais (PCA)	46
3.3.2	Critérios de Agrupamento	47
3.3.3	Expansão e Consolidação de Regiões	47
3.4	ESTÁGIO DE RECUPERAÇÃO: FILL + BOOTSTRAP DE CLUSTERS	48
3.4.1	Preenchimento de Pontos Soltos (Fill)	48
3.4.2	Bootstrapping de Novos Clusters	48
3.5	EXTRAÇÃO HÍBRIDA DE CONTORNOS E PÓS-PROCESSAMENTO	49
3.5.1	Abordagem Híbrida de Extração	49
3.5.2	Pós-processamento e suavização	50

3.6	FUSÃO POR AGLUTINAÇÃO GEOMÉTRICA	51
3.6.1	Fusão por Sobreposição Vertical	51
3.6.2	Fusão por Proximidade Vertical (Anexos)	51
3.6.3	Análise de Conectividade	51
3.7	AVALIAÇÃO QUANTITATIVA:	52
4	ESTUDO DE CASO: FAVELA DE HELIÓPOLIS	54
4.1	APLICAÇÃO DO MÉTODO.....	58
4.2	DISCUSSÃO	63
4.2.1	Análise das métricas globais.....	64
4.2.2	Classificação da Aderência Geométrica	65
4.2.3	O Impacto da Fusão na Revocação.....	66
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	67
5.1	CONCLUSÕES	67
5.2	RECOMENDAÇÕES.....	67

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A urbanização acelerada e desigual tem consolidado os assentamentos precários como uma realidade persistente e complexa no cenário urbano contemporâneo. Segundo a Organização das Nações Unidas (ONU), em 2020 cerca de 1,1 bilhão de pessoas viviam em favelas ou em condições habitacionais análogas, número que pode atingir dois bilhões nas próximas três décadas. No Brasil, o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), por meio do Censo Demográfico de 2022, identificou 16,4 milhões de brasileiros vivendo em favelas e comunidades urbanas, evidenciando que o fenômeno é estrutural e não marginal, e que demanda políticas públicas específicas e territorialmente orientadas.

A Agenda 2030 da ONU, por meio do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 11 (ODS 11), propõe tornar as cidades e os assentamentos humanos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis. Contudo, a efetividade dessas metas depende da capacidade de reconhecer e representar adequadamente os territórios informais. No Brasil, observa-se uma lacuna significativa: a ausência de informação territorial qualificada sobre população, morfologia urbana e infraestrutura das favelas, configurando o problema central deste estudo, denominado desinformação territorial.

A inexistência dessa informação compromete a compreensão da diversidade interna desses territórios, reforça visões homogêneas e favorece a adoção de políticas públicas genéricas e frequentemente desconectadas da realidade local. Para superar essa limitação, propõe-se a implementação de um Sistema de Informação Geográfica (SIG) interoperável com o Cadastro Territorial Multifinalitário (CTM), formando uma infraestrutura informacional capaz de estruturar e relacionar diferentes camadas temáticas do território. Entretanto, a operacionalização desses sistemas depende da existência de uma base cartográfica de referência que na maioria das situações é inexistente. Para favelas e comunidades urbanas a delimitação espacial das edificações poderiam se constituir na unidade fundamental de organização cadastral.

Diante dessa limitação, esta pesquisa propõe a geração automática da base geométrica das edificações (footprints) a partir do processamento de nuvens de pontos LiDAR, com o objetivo de produzir uma geometria mínima de referência capaz de estruturar o SIG. Ressalta-se que a utilização dessa tecnologia seria viável no contexto brasileiro, uma vez que levantamentos LiDAR já se encontram disponíveis para a área de estudo e também em diversas

capitais do país. Assim, a proposta aproveita uma janela de oportunidade representada pela existência prévia desses dados, permitindo acelerar a produção da base cartográfica sem a necessidade de grandes investimentos.

Dessa forma, a limitação da informação cartográfica em assentamentos informais não decorre da inexistência de tecnologia, mas de condicionantes econômico-institucionais que restringem sua produção e atualização. Destacam-se, nesse contexto, as limitações orçamentárias recorrentes da administração pública e o reduzido interesse do mercado imobiliário em investir nesses territórios, geralmente marcados por conflitos fundiários ou localizados em áreas ambientalmente protegidas, fatores que resultam em baixos níveis de investimento na produção de informação territorial estruturada.

Nesse cenário, formula-se a seguinte pergunta de pesquisa: é possível obter, de maneira automática, uma base geométrica a partir de dados LiDAR suficiente para estruturar e viabilizar a implementação de SIG em áreas de favela?

Sob a perspectiva da abordagem Fit for Purpose (FFP), a proposta busca viabilizar e acelerar a obtenção de uma base geométrica inicial funcional. Ressalta-se que não há impossibilidade técnica para a produção de informação cartográfica de maior precisão, uma vez que métodos consolidados de levantamento, como o uso de receptores GNSS e estação total e outros, poderiam ser aplicados. Entretanto, tais procedimentos demandam elevados investimentos financeiros, mão de obra especializada e tempo de execução, o que dificulta sua aplicação em larga escala, especialmente em territórios extensos e complexos.

A proposta não tem como objetivo atender aos níveis de precisão estabelecidos pelo Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC-PCD), nem substituir levantamentos de maior precisão. Trata-se de uma estratégia inicial para viabilizar a implantação inicial do SIG e seu aprimoramento progressivo em consonância com os princípios da abordagem FFP.

A hipótese de pesquisa que orienta o estudo é que é possível obter, de maneira automática, a projeção bidimensional das edificações em áreas de favela a partir de dados LiDAR, produzindo uma base geométrica adequada ao propósito FFP e suficiente para estruturar o SIG que seja interoperável com o Cadastro Territorial Multifinalitário.

1.2 OBJETIVO GERAL

Avaliar a aplicabilidade de técnicas automáticas de extração da projeção bidimensional das edificações sobre o terreno (*footprints*) em áreas de favela, utilizando dados LiDAR.

1.2.1 Objetivos Específicos

- Avaliar a efetividade do método de *region growing* na segmentação da nuvem de pontos LiDAR em planos representativos das superfícies de edificações com morfologia típicas de áreas de favela.
- Avaliar técnicas de aderência geométrica dos polígonos como critério de validação da extração automática da projeção bidimensional das edificações sobre o terreno (footprints) em áreas de favela.
- Analisar o potencial do método proposto para acelerar a produção de bases de dados geoespaciais em áreas de favela, por meio da extração automática de footprints a partir de dados LiDAR.
- Aplicar o método proposto em uma quadra da favela de Heliópolis, no município de São Paulo, como estudo de caso.

1.3 JUSTIFICATIVA

Este estudo propõe uma alternativa a um dos grandes desafios da gestão urbana no Brasil: a invisibilidade das favelas e comunidades urbanas decorrentes da falta de informações sobre a população e o território e o impacto no planejamento das ações do poder público . A falta de dados qualificados sobre esses territórios perpetua a desinformação, dificultando o planejamento e mantendo milhões de pessoas fora do alcance das políticas de desenvolvimento urbano.

A pesquisa parte da criação de uma proposta para acelerar a produção de bases de dados geoespaciais voltadas para favelas e comunidades urbanas, preenchendo uma lacuna de informação cartográfica por meio de um método ágil, automatizado e adequado à finalidade FFP. A geração automática da projeção bidimensional das edificações sobre o solo, a partir de dados LiDAR, permitiria formar uma base geométrica para estruturar o SIG.

O impacto direto dessa abordagem é a perspectiva da produção de informação essencial sobre a população e o território, atualmente fragmentada ou inexistente. Do ponto de vista social, essas informações possibilitam conhecer o perfil e as condições de vida dos moradores, revelando indicadores como educação, renda, acesso a serviços e vulnerabilidades específicas. Do ponto de vista físico e territorial, tornam-se acessíveis dados sobre morfologia urbana, infraestrutura, riscos ambientais, regularização fundiária e disponibilidade de serviços e equipamentos públicos.

Com a disponibilidade de informações estruturadas e atualizadas, a ação de planejamento das políticas públicas pode passar a considerar com maior precisão a realidade

concreta de cada comunidade. Nessa direção, o planejamento orientado por evidências tende a direcionar recursos, priorizar investimentos e delinear ações compatíveis com o grau de vulnerabilidade e o estágio de desenvolvimento local. Assim, busca-se que a política pública deixe de assumir caráter genérico e reativo, passando a incorporar abordagens mais específicas e preventivas, capazes de tratar as favelas não como exceções, mas como parte integrante da cidade.

O presente estudo pretende contribuir para a redução da desinformação territorial e para a inclusão desses territórios no planejamento urbano oficial. A iniciativa encontra correspondência nas metas do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 11 (ODS 11), que propõe cidades inclusivas, seguras e sustentáveis, ao oferecer subsídios para que comunidades historicamente invisibilizadas possam participar de forma mais efetiva das políticas de desenvolvimento, e não apenas como objetos de intervenção.

1.4 ADERÊNCIA AO PPGTG

O presente trabalho se insere na área de concentração em Gestão Territorial e tem interface direta com as linhas de pesquisa Planejamento Territorial e Cadastro Técnico Multifinalitário. Desse modo, respeita o caráter multidisciplinar do programa, ao articular inovação técnica, compromisso social e fundamentação científica, aliando o rigor acadêmico à relevância prática para a gestão do território urbano. Para isso, propõe uma contribuição para o combate do que Maricato (2002) chama de “analfabetismo urbanístico”, caracterizado pela ausência de dados fidedignos sobre o território e pela consequente invisibilidade das populações que habitam espaços precários e segregados.

Nesse sentido, a geração de um SIG não é um fim em si mesmo, mas um instrumento para ampliar a capacidade de diagnóstico e intervenção do poder público, favorecendo políticas mais justas e efetivas.

O tema proposto converge tanto com a ementa do curso do PPGTG/UFSC quanto com os trabalhos acadêmicos já desenvolvidos no programa, os quais abordam temas centrais da gestão territorial, como uso e ocupação do solo, políticas públicas e aplicação de geotecnologias no planejamento urbano. Dada a relevância e a escalada do fenômeno das favelas no Brasil e no mundo, este trabalho representa uma ferramenta de gestão territorial que reforça a importância de abordagens técnicas e sensíveis no planejamento urbano. O quadro 1 apresenta uma síntese de trabalhos que convergem com o tema da pesquisa.

quadro 1 - Trabalhos acadêmicos do PPTG relacionados

Ano	Autor	Título	Tipo
2020	Meurer, Silvia Aparecida	Estudo da aplicação da Lei Federal nº 13.465/2017 – REURB e seus decretos no município de Florianópolis – SC.	D ¹
2019	Fernandes Desegrini, Micael Etelvino	A Reurb como instrumento de regularização fundiária para as comunidades do maciço central em Florianópolis - SC.	D
2020	Pires, Glaucia Vieira	Análise territorial dos conflitos de uso e ocupação do solo no município de Santa Maria – RS.	D
2017	Cravo, Leandro José de Almeida	Políticas públicas de uso e ocupação do solo urbano: os planos diretores e a estruturação do bairro do Itacorubi, em Florianópolis - SC.	D
2020	Mastella, André Fabiano Meller	Diagnóstico sobre a inter-relação do cadastro territorial e os instrumentos de política urbana: estudo de caso para o município de Nova Veneza - SC.	D
2018	Rosolem, Gabriel Phelipe Nascimento	Análise da vulnerabilidade a deslizamentos da ocupação urbana na bacia do Rio Comprido – Joinville - SC	D
2018	Mello, Michely Marcia Martins	Análise da vulnerabilidade em áreas suscetíveis a deslizamentos do bairro Colônia Santana – São José utilizando indicadores socioambientais.	D

¹ Dissertação

2019	Zimmermann, Diogo Marcelo	Mapeamento das áreas suscetíveis a deslizamento da bacia hidrográfica do Rio Cachoeira e do Rio da Prata – Joinville - SC	D
2019	Merêncio, Ivan	Detecção de conglomerados de focos de <i>Aedes aegypti</i> em Joinville através da estatística de varredura espaço-temporal.	D

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho é organizado em cinco capítulos, de modo a explicitar o percurso metodológico adotado na avaliação de métodos automáticos aplicados a dados LiDAR para a geração de uma base geométrica, suficiente para a estruturação de um SIG em área de favela, à luz da abordagem FFP. Busca-se explorar o potencial dos dados disponíveis para reduzir lacunas informacionais, contribuindo para a identificação territorial e para a compreensão das características desses espaços. Nesse processo, reconhecem-se as limitações inerentes ao método, ao contexto e à complexidade morfológica das áreas analisadas.

O Capítulo 1 apresenta o problema da invisibilidade territorial das favelas e os objetivos que norteiam o estudo. O Capítulo 2 reúne o referencial teórico que sustenta a pesquisa, abrangendo literatura sobre urbanização, favelas, modelos cadastrais contemporâneos e fundamentos da tecnologia LiDAR. O Capítulo 3 descreve a metodologia adotada, detalhando os procedimentos necessários para extrair, de modo automatizado, uma aproximação dos *footprints*. No Capítulo 4, esse método foi aplicado em uma quadra da favela de Heliópolis, permitindo observar seu desempenho em um cenário urbano real. Por fim, o Capítulo 5 apresenta considerações e conclusão sobre o potencial e os limites da abordagem.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 URBANIZAÇÃO E FAVELAS NO BRASIL

De acordo com (Octaviano, 2010) a urbanização brasileira intensificou-se a partir da década de 1950, acompanhando o avanço da industrialização e as transformações no campo. A chamada Revolução Verde modernizou a agricultura por meio da mecanização, do uso de fertilizantes e de sementes melhoradas, mas também acentuou a concentração fundiária e a exclusão social, de modo que a fome persistiu mesmo com o aumento da produtividade. Essa modernização priorizou grandes produtores e marginalizou agricultores familiares, resultando em um êxodo rural em larga escala que direcionou milhões de pessoas para as cidades (ZAMBENEDETTI et al., 2021).

No meio urbano, a população migrante não foi plenamente absorvida pelo mercado formal de trabalho, configurando um processo de proletarização urbana associado à industrialização (Santos, 1993). A ausência de políticas habitacionais consistentes contribuiu para a ocupação de áreas periféricas e ambientalmente frágeis. Nesse contexto, Maricato (2002) interpreta a cidade brasileira a partir da coexistência entre a “cidade legal” e a “cidade real”, enquanto Rolnik (2011) analisa esse processo como parte de um modelo de urbanização excludente, no qual o acesso à moradia se estrutura segundo as dinâmicas do mercado imobiliário.

Como resposta à insuficiência de renda e à omissão estatal, consolidou-se a autoconstrução como mecanismo de permanência urbana. Diante da ausência de políticas habitacionais, as famílias das camadas populares passaram a construir e adaptar suas moradias por conta própria, assegurando estabilidade habitacional mesmo sob normas urbanísticas incompatíveis com sua realidade (MARICATO, 2011). Essa prática evidencia simultaneamente a resiliência social e a produção coletiva do espaço urbano (SILVA et al., 2009; MARICATO, 2011; ROLNIK, 2019).

Desse modo, a expansão das favelas deve ser entendida como resultado histórico articulado à modernização agrária excludente, ao êxodo rural, à industrialização seletiva e à ausência de políticas públicas adequadas, e não como desvio urbano. As favelas emergem, portanto, como expressão das contradições estruturais da urbanização brasileira (SANTOS, 1993; MARICATO, 2002; ROLNIK, 2011; OCTAVIANO, 2010; ZAMBENEDETTI et al., 2021).

A partir das últimas décadas, transformações econômicas e institucionais passaram a influenciar mais intensamente a dinâmica urbana brasileira. Rolnik e Klink (2011) demonstram que a ampliação do crédito e dos subsídios à produção habitacional impulsionou um ciclo de crescimento imobiliário sem superar as desigualdades socioespaciais históricas.

Nesse cenário, o desenvolvimento urbano passou a articular-se mais diretamente à lógica de mercado, mantendo padrões de acesso à moradia marcados pela exclusão territorial. Tal dinâmica favoreceu processos de valorização imobiliária que deslocam populações de baixa renda para áreas mais periféricas, fenômeno associado à gentrificação (ROLNIK, 2015). Assim, o Estado não atua apenas pela ausência, mas também como agente estruturador da financeirização do espaço urbano ao orientar políticas e instrumentos de planejamento em consonância com interesses do capital.

Paralelamente, manteve-se a autoconstrução como principal forma de acesso à moradia para as camadas populares. Mesmo diante da expansão do crédito imobiliário, famílias continuaram a erguer suas casas com recursos próprios e redes locais de solidariedade.

Segundo Noronha (2018), a urbanização brasileira recente caracteriza-se por contradições internas entre diferentes formas de produção do espaço. Enquanto o mercado formal opera pela valorização econômica, nos territórios populares emergem práticas de autoconstrução e organização comunitária articuladas ao próprio funcionamento urbano. A cidade, portanto, não se divide rigidamente entre formal e informal, configurando relações híbridas e tensionadas.

A definição conceitual de favela permanece um desafio teórico e político. O Observatório de Favelas (2009) propõe romper com definições negativas baseadas apenas na ausência de infraestrutura, defendendo uma leitura afirmativa que reconheça sua especificidade socioespacial. Silva (2009) interpreta a favela como fenômeno histórico e processual, criticando abordagens centradas exclusivamente na carência. Burgos (2009) complementa ao indicar que a favela constitui forma própria de organização social e urbana, não podendo ser compreendida apenas como negação da cidade formal.

Silva, Barbosa, Biteti e Fernandes (2009) aprofundam essa discussão ao reunir contribuições interdisciplinares que questionam a redução da favela à informalidade. No mesmo volume, Cavallieri destaca o papel do Cadastro das Favelas do Instituto Pereira Passos (1982) no reconhecimento institucional desses territórios. A declaração final do seminário reafirma a favela como território de autoconstrução e produção social do espaço urbano, reivindicando reconhecimento político e estatístico (OBSERVATÓRIO DE FAVELAS, 2009).

Essa interpretação é reforçada por Loureiro (2017), que analisou 120 favelas por meio da Sintaxe Espacial. Os resultados indicam que, apesar da aparência irregular, esses assentamentos seguem padrões auto-organizados comparáveis a tecidos urbanos históricos, evidenciando racionalidade espacial própria.

Souza e Silva (2009) alertam que políticas públicas homogêneas tornam-se ineficazes ao ignorar a diversidade interna das favelas. Evidências empíricas do IPEA (2016) confirmam essa heterogeneidade quanto à consolidação, regularização e acesso a serviços. França, Guerreiro e Mello (2020) reforçam essa leitura ao propor uma tipologia multidimensional da precariedade urbana.

Em conjunto, esses estudos indicam que a favela não constitui categoria estática, mas conjunto diverso de formas de produção do espaço com trajetórias e racionalidades próprias. Essa pluralidade evidencia desigualdades estruturais, mas também capacidade criadora das populações que transformam continuamente esses territórios.

A produção cartográfica possui papel central nesse processo de reconhecimento. Para Santos (1988), os mapas são instrumentos historicamente produzidos por referenciais sociais específicos, influenciando quais territórios se tornam visíveis institucionalmente. O domínio da representação espacial define, portanto, não apenas a leitura do espaço urbano, mas também sua legitimação política.

2.1.1 Favelas e territórios urbanos no mapa

A ausência de mapeamento oficial não é neutra, mas parte de um processo histórico de negação simbólica e institucional. Conforme discute Loureiro (2017), assentamentos informais frequentemente permanecem invisíveis nos mapas oficiais em razão de sua condição de irregularidade jurídica, o que contribui para sua marginalização no planejamento urbano. Nessa perspectiva, a invisibilidade cartográfica corresponde também a uma invisibilidade política, pois o reconhecimento territorial constitui etapa fundamental para a integração desses espaços à cidade.

Assim, não figurar no mapa significa não ser plenamente reconhecido como parte do espaço urbano. Embora a favela exista material e socialmente, sua ausência nos registros oficiais limita sua consideração nas políticas públicas e no ordenamento territorial. O mapeamento, portanto, ultrapassa a dimensão técnica: representa um ato de reconhecimento, capaz de inserir esses territórios no campo institucional da cidade.

Desse modo, a representação cartográfica das favelas torna-se instrumento de inclusão territorial, ao permitir que espaços historicamente ignorados passem a ser considerados na gestão urbana e no planejamento estatal.

2.1.2 Definição de Favela

Enquanto a literatura crítica propunha novas formas de compreender a favela, o debate institucional passou a girar em torno das definições oficiais e das classificações estatísticas. O trabalho de Queiroz Filho (2017) oferece uma análise sobre o tema ao comparar as categorias de *slums*², utilizadas pela ONU-Habitat, e favelas, definidas pelo IBGE. O autor identificou duas diferenças fundamentais:

(i) a primeira diz respeito ao objeto da descrição, enquanto a ONU privilegia a área, o IBGE focaliza a edificação;

(ii) a segunda refere-se aos critérios utilizados, que vão desde aspectos legais e padrões construtivos até deficiências de infraestrutura e posse da terra.

Essa diversidade de qualificações compromete a comparabilidade internacional e revela que as categorias estatísticas são também construções políticas, que moldam as formas de reconhecimento institucional das comunidades urbanas.

A dimensão política das classificações é examinada em profundidade por Motta (2019), em “Resistência aos números: a favela como realidade (in)quantificável”. A autora reconstrói a trajetória das classificações censitárias do IBGE, mostrando que, em 1950, a favela foi reconhecida com base em um “consenso social de definição”, enquanto, em 1991, passou a ser enquadrada na categoria “aglomerado subnormal³”, denominação mantida até o Censo 2010. Essa substituição semântica representou uma tentativa de normatizar o conceito, associando-o à ideia de desordem e ilegalidade da ocupação. Motta demonstra que a favela resiste à quantificação estatal, tanto por sua complexidade empírica quanto pela politização de sua representação. Essa resistência manifesta-se, por exemplo, nas iniciativas de autorrecenseamento, como a realizada na Maré, em que a própria comunidade produziu dados

²**Slum**, conforme definido pela **ONU-Habitat**, é uma área urbana onde os moradores vivem em condições inadequadas de moradia, enfrentando privações como falta de infraestrutura durável, acesso limitado à água potável e saneamento, superlotação e insegurança quanto à posse da terra. Essa definição orienta políticas públicas voltadas à melhoria das condições de vida em assentamentos informais e vulneráveis.

³ Um conjunto constituído de, no mínimo 51 unidades habitacionais (barracos, casas etc.), que ocupam ou tenham ocupado, até período recente, terreno de propriedade alheia (pública ou particular), estando dispostas, em geral, de forma desordenada e densa, e carentes, em sua maioria, de serviços públicos essenciais.”

para disputar recursos públicos. A autora sintetiza essa crítica na afirmação de que “menos população” em um território significa, na prática, menos investimento público (Motta, 2019).

Essas reflexões convergem com as mudanças recentes implementadas pelo IBGE (2024), que substituiu a nomenclatura “aglomerados subnormais” por “favelas e comunidades urbanas”. O documento metodológico do Censo explicita que a alteração busca superar o estigma histórico associado à antiga categoria e alinhar-se ao direito à moradia e às formas de nomeação empregadas pelos próprios moradores. Embora os critérios técnicos permaneçam semelhantes, mínimo de 51 domicílios, ocupação de terreno de terceiro e carência de serviços básicos, o novo termo representa um avanço simbólico e político. O reconhecimento oficial das comunidades pelo nome socialmente utilizado reconfigura a relação entre estatística e cidadania, deslocando a favela do campo da anomia para o campo dos direitos urbanos (IBGE, 2024).

Integrando essas contribuições, Queiroz Filho (2017), Motta (2019) e IBGE (2024) indicam que a definição de favela constitui um campo de disputas conceituais e institucionais. Conforme Queiroz Filho (2017), as categorias utilizadas para nomear esses territórios variam historicamente e refletem diferentes perspectivas de intervenção estatal. Motta (2019) demonstra que os processos de classificação e quantificação não apenas descrevem a favela, mas participam da sua própria produção como objeto de conhecimento e de ação governamental. Já o IBGE (2024) evidencia que a identificação e delimitação dessas áreas subsidiam políticas públicas e a atuação do Estado. Compreender a favela, portanto, requer analisar simultaneamente sua organização socioespacial e os processos pelos quais ela é reconhecida, delimitada e contabilizada institucionalmente.

2.1.3 Produção do IPEA sobre Favelas

O Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA) tem papel relevante na produção de conhecimento empírico sobre assentamentos precários no Brasil, especialmente pela elaboração de metodologias de mensuração e instrumentos aplicados à formulação de políticas públicas. A coletânea organizada por Moraes, Krause e Lima Neto (2016) reúne estudos voltados à identificação e caracterização desses assentamentos em diferentes cidades brasileiras, com base em dados censitários e registros administrativos.

No campo da mensuração estatística, Ferreira et al. (2016) aplicaram análise discriminante aos dados do Censo Demográfico de 2000 para identificar setores censitários com características semelhantes às dos aglomerados subnormais. O estudo demonstrou que a

precariedade urbana ultrapassa os limites delimitados pelas categorias censitárias oficiais, evidenciando o caráter operacional dessas classificações.

Na dimensão morfológica e territorial, Barros, Medeiros e Morais (2016) utilizaram a Sintaxe Espacial para analisar assentamentos precários em diferentes cidades brasileiras, verificando que a acessibilidade viária e a integração urbana influenciam a inserção desses territórios na estrutura da cidade, contribuindo para a compreensão dos padrões de segregação socioespacial.

Além da caracterização territorial, a produção do IPEA também investigou dinâmicas específicas associadas à vida urbana nesses espaços. Rodrigues e Rivero (2012) analisaram o georreferenciamento de homicídios no município do Rio de Janeiro entre 2002 e 2006 e identificaram Áreas de Concentração de Vítimas associadas a setores subnormais. O estudo mostrou que parte dos registros não pôde ser localizada devido à inexistência de endereços formais em diversas favelas, limitando a precisão das estatísticas e evidenciando restrições cadastrais na representação desses territórios.

No campo da gestão pública, Herling (2016) examinou o sistema Habisp⁴, desenvolvido para integrar informações urbanísticas, fundiárias e socioeconômicas em assentamentos precários, demonstrando que o cruzamento de bases administrativas permite orientar a priorização de investimentos habitacionais.

Em conjunto, esses trabalhos indicam três eixos principais na produção do IPEA sobre favelas: (i) aprimoramento da mensuração estatística da precariedade urbana (Ferreira et al., 2016); (ii) análise territorial baseada na configuração urbana e registros administrativos (Barros; Medeiros; Morais, 2016; Rodrigues; Rivero, 2012); e (iii) desenvolvimento de instrumentos de gestão pública apoiados em informação integrada (Herling, 2016). Dessa forma, a contribuição do IPEA concentra-se na construção de ferramentas operacionais de identificação, classificação e apoio à formulação de políticas públicas para assentamentos precários (Morais; Krause; Lima Neto, 2016).

2.2 LADM, FIT-FOR-PURPOSE E O CTM BRASILEIRO

A trajetória dos modelos cadastrais contemporâneos reflete um processo evolutivo de transformação conceitual e institucional na administração da terra. Em escala internacional, a

⁴ A HABISP é a plataforma de informações habitacionais da Secretaria Municipal de Habitação (SEHAB) da Prefeitura do Município de São Paulo, destinada ao cadastro, monitoramento e gestão das áreas de assentamentos precários e políticas habitacionais.

consolidação do LADM, estabelecido como norma ISO 19152:2012, representou um marco fundamental na busca pela padronização e interoperabilidade dos sistemas cadastrais. Desenvolvido sob a coordenação da Federação Internacional dos Geômetras (FIG), o LADM propôs uma estrutura conceitual capaz de harmonizar a linguagem entre diferentes sistemas de administração fundiária, assegurando consistência semântica e compatibilidade institucional (ISO, 2012; EKWUNIFE; EGOLUM; EMOH, 2024).

O LADM se estrutura em três dimensões interdependentes, espacial, legal e institucional.

- A dimensão espacial compreende a geometria e a topologia das unidades territoriais;
- a dimensão legal define os direitos, restrições e responsabilidades (RRR); e
- a dimensão institucional refere-se aos atores e às normas que regulam o sistema (VAN OOSTEROM et al., 2012; ISO, 2012).

Assim, o modelo define-se conceitualmente por três entidades fundamentais: a unidade espacial (LA_SpatialUnit), a pessoa ou grupo (LA_Party) e os direitos, restrições e responsabilidades (LA_RRR), assegurando consistência semântica e interoperabilidade entre sistemas distintos (ISO, 2012; EKWUNIFE; EGOLUM; EMOH, 2024). Essa tríade tornou-se a base da governança fundiária moderna, inspirando a formulação de diversos modelos nacionais, entre eles, o Cadastro Territorial Multifinalitário (CTM) brasileiro.

Contudo, como assinalam Ekwunife, Egolum e Emoh (2024), a adoção do LADM em países emergentes enfrentou obstáculos significativos, como limitações técnicas, escassez de recursos financeiros e baixa interoperabilidade institucional. Ademais, estimativas indicam que cerca de 75% da população mundial não possui registro formal de seus direitos à terra, o que reforça a necessidade de sistemas mais acessíveis e adequados às realidades locais (ENEMARK et al., 2014; FARIAS; CARNEIRO, 2018).

2.2.1 STDM e Fit-for-Purpose

As limitações dos sistemas cadastrais convencionais, tradicionalmente baseados na titulação formal e na representação geométrica precisa das parcelas, motivaram o desenvolvimento de instrumentos capazes de registrar relações legítimas com a terra mesmo na ausência de propriedade legal (UN-HABITAT; GLTN, 2016). Nesse contexto foi desenvolvido o Social Tenure Domain Model (STDM), concebido no âmbito da Global Land Tool Network

como uma especialização social do Land Administration Domain Model – LADM (LEMMEN et al., 2007).

O STDM permite registrar relações entre pessoas e terra independentemente da formalização jurídica, reconhecendo ocupações consuetudinárias, informais ou comunitárias como vínculos territorialmente válidos (LEMMEN et al., 2007). O modelo operacionaliza o conceito de Continuum of Land Rights, segundo o qual diferentes formas de posse coexistem e possuem legitimidade social ainda que não estejam formalmente tituladas (UN-HABITAT, 2008). Ao estruturar a informação territorial a partir dessas relações sociais, torna-se possível integrar registros comunitários a sistemas cadastrais oficiais, ampliando a capacidade de representação territorial em assentamentos informais e áreas de pobreza urbana e rural (UN-HABITAT; GLTN, 2016).

A experiência acumulada com o STDM contribuiu para a formulação da abordagem FFP Land Administration, proposta por Enemark e colaboradores como alternativa ao paradigma cadastral tradicional (ENEMARK et al., 2014). A abordagem prioriza cobertura territorial completa, inclusão social e rapidez de implementação em vez da precisão geométrica imediata, permitindo que a segurança da posse seja estabelecida antes do refinamento cartográfico e jurídico (ENEMARK et al., 2014; UN-HABITAT; GLTN, 2016).

O FFP organiza-se em três dimensões interdependentes (espacial, legal e institucional) que devem operar de forma equilibrada para garantir funcionalidade administrativa e legitimidade social (ENEMARK et al., 2014). A dimensão espacial admite níveis de precisão compatíveis com a finalidade do levantamento; a dimensão legal incorpora direitos formais e informais conforme o Continuum de Direitos à Terra; e a dimensão institucional privilegia arranjos administrativos participativos e interoperáveis (UN-HABITAT, 2008; ENEMARK et al., 2014). Dessa forma, a lógica do cadastro tradicional é invertida: em vez de mapear com exatidão para depois incluir, passa-se a incluir primeiro e aperfeiçoar progressivamente ao longo do tempo (ENEMARK et al., 2014).

No contexto brasileiro, caracterizado por forte informalidade fundiária e limitações institucionais, a aplicação da abordagem FFP exige adaptação operacional. Farias e Carneiro (2018) argumentam que a implantação de sistemas cadastrais não deve ser condicionada inicialmente à elevada precisão técnica dos levantamentos, mas sim à capacidade administrativa de registrar relações territoriais e manter os dados atualizados ao longo do tempo. Assim, a ampliação da cobertura cadastral pode ocorrer antes do refinamento geométrico, permitindo evolução progressiva do sistema informacional conforme as demandas de gestão territorial.

Nessa perspectiva, a formalização passa a ser compreendida como um processo incremental, alinhado ao princípio de adequação ao propósito proposto por Enemark et al. (2014), no qual a qualidade da informação é ajustada ao uso pretendido. O cadastro, portanto, deixa de desempenhar exclusivamente função cartográfica-registral e assume papel de instrumento de governança territorial, viabilizando o reconhecimento gradual de direitos em contextos de informalidade fundiária.

2.2.2 O FFP em prática: experiências internacionais

A literatura internacional registra a aplicação do FFP Land Administration em países caracterizados por elevada informalidade fundiária e baixa capacidade operacional dos sistemas cadastrais convencionais. Enemark, McLaren e Lemmen (2016) descrevem que programas nacionais de administração da terra adotaram levantamentos baseados em limites físicos identificáveis e validação comunitária, possibilitando registrar parcelas em larga escala com custos reduzidos e prazos significativamente inferiores aos métodos tradicionais.

Segundo esses autores, a abordagem foi implementada em países asiáticos como China, Vietnã, Indonésia e Nepal, nos quais a prioridade inicial consistiu em garantir cobertura territorial e segurança da posse, sendo o refinamento geométrico realizado posteriormente (ENEMARK; MCLAREN; LEMMEN, 2016). De modo semelhante, em países africanos como Uganda e Moçambique, a identificação das parcelas ocorreu por reconhecimento social e evidências físicas no terreno, permitindo ampliar rapidamente a formalização territorial sem depender de levantamentos cadastrais de alta precisão.

Na América Latina, experiências conduzidas na Colômbia e no Equador demonstraram a utilização do modelo para estruturar sistemas capazes de integrar territórios anteriormente não registrados ao sistema oficial, evidenciando o potencial da abordagem para contextos de informalidade urbana (ENEMARK; MCLAREN; LEMMEN, 2016). Os autores também registram projetos piloto em Gana, Quênia, Zâmbia e Namíbia, indicando que a estratégia de implementação progressiva, reconhecimento inicial seguido de aperfeiçoamento técnico, constitui característica central do modelo.

Em conjunto, essas experiências mostram que a aplicação internacional do FFP ocorre por meio de uma lógica incremental: primeiro assegura-se o reconhecimento territorial em larga escala e, posteriormente, aprimoram-se a precisão geométrica e a formalização jurídica do cadastro (ENEMARK; MCLAREN; LEMMEN, 2016).

Apesar das evidências internacionais, a adoção do modelo depende das condições institucionais de cada país. No contexto brasileiro, caracterizado por forte tradição cartorial e elevada informalidade territorial, a abordagem não foi implementada em escala nacional, mas analisada quanto à sua viabilidade operacional. Farias e Carneiro (2018) argumentam que a efetividade de um cadastro não depende inicialmente da precisão geométrica do levantamento, mas da legitimidade administrativa do registro e da capacidade institucional de atualização contínua da informação territorial.

As autoras indicam que a formalização progressiva da posse deve anteceder o refinamento técnico do levantamento, permitindo ampliar a cobertura cadastral antes da consolidação cartográfica. Nessa perspectiva, o cadastro deixa de atuar apenas como instrumento cartográfico-registral e passa a constituir mecanismo de inclusão territorial, possibilitando o reconhecimento gradual dos direitos à terra em contextos de informalidade (FARIAS; CARNEIRO, 2018).

Assim, enquanto as experiências internacionais demonstram a viabilidade empírica do FFP em larga escala, a literatura brasileira evidencia sua pertinência conceitual e institucional para enfrentar a exclusão territorial, estabelecendo a base teórica para aplicações adaptadas às condições nacionais.

2.2.3 A evolução cadastral no contexto brasileiro

A formação do Cadastro Territorial Multifinalitário (CTM) no Brasil decorre de uma transformação progressiva do papel do cadastro na administração pública. Historicamente, o cadastro municipal desenvolveu-se com finalidade predominantemente fiscal, voltado à arrecadação tributária, enquanto o registro de imóveis concentrava a dimensão jurídica da propriedade. Essa separação institucional produziu representações territoriais distintas e frequentemente inconsistentes do mesmo imóvel, comprometendo a confiabilidade da informação territorial (LOCH; ERBA, 2007).

A literatura cadastral brasileira passou então a defender a integração entre cadastro e registro imobiliário como condição para segurança jurídica e eficiência administrativa. No contexto do CTM, essa integração é ampliada: além da dimensão jurídica, passam a ser incorporadas informações urbanísticas, ambientais, sociais e fiscais em uma mesma base territorial (SILVA, 2023).

Nesse processo, a parcela territorial deixa de ser apenas unidade tributária e passa a constituir elemento estruturante da informação espacial municipal, permitindo a organização

integrada das políticas públicas (CUNHA; ERBA, 2010; SILVA, 2023). O cadastro passa a ser entendido como infraestrutura de informação territorial compartilhada entre instituições.

A Portaria nº 511/2009 representa o primeiro esforço institucional para estruturar essa concepção no país ao definir a parcela como unidade básica do sistema cadastral e promover sua vinculação ao registro imobiliário (BRASIL, 2009). Contudo, sua implementação foi limitada, pois exigia elevado nível de precisão geométrica e capacidade técnica municipal, restringindo a adesão (CUNHA; ERBA, 2010; SILVA, 2023).

A evolução posterior do CTM brasileiro decorre da mudança de paradigma: a prioridade desloca-se da precisão cartográfica inicial para a cobertura territorial completa. O cadastro passa a admitir diferentes níveis de qualificação da informação e atualização progressiva ao longo do tempo, configurando-se como sistema informacional de gestão territorial (SILVA, 2023).

Essa transformação institucional é consolidada pela Portaria nº 3.242/2022, que reconhece a necessidade de representação de todo o território municipal, incluindo áreas não regularizadas (BRASIL, 2022). Tal mudança normativa formaliza uma concepção já presente na literatura técnica: a existência da informação territorial é mais relevante que sua precisão inicial absoluta (SILVA, 2023).

Dessa forma, o CTM passa a constituir infraestrutura de dados espaciais municipal, articulando planejamento urbano, política fiscal, regularização fundiária e gestão ambiental em uma base territorial comum. A multifinalidade deixa de representar apenas múltiplos usos do cadastro e passa a caracterizar sua função estruturante na governança territorial (SILVA, 2023).

Assim, a evolução cadastral brasileira pode ser compreendida em três etapas: o cadastro fiscal fragmentado, a tentativa de integração jurídico-geométrica promovida pelas diretrizes nacionais e a consolidação do cadastro como sistema de informação territorial voltado à gestão municipal (SILVA, 2023).

2.3 A EVOLUÇÃO LIDAR

Segundo Ferreira (2019), a tecnologia LiDAR constitui uma das inovações mais transformadoras das ciências cartográficas e do sensoriamento remoto no final do século XX. Seu desenvolvimento está diretamente relacionado à evolução dos sistemas ativos de varredura a laser, que possibilitaram a aquisição direta e massiva de dados tridimensionais da superfície terrestre. Até meados da década de 1990, os Modelos Digitais de Terreno (MDT) eram gerados predominantemente por técnicas fotogramétricas e levantamentos topográficos convencionais,

caracterizados por baixa densidade de amostragem e custos elevados. A introdução do perfilamento a laser aerotransportado modificou esse paradigma ao permitir a obtenção de milhões de pontos em alta resolução e com precisão altimétrica compatível a padrões cartográficos rigorosos, redefinindo os métodos de mapeamento e representação do relevo.

Ferreira (2019) registra que, entre os primeiros trabalhos que fundamentaram a aplicação científica do LiDAR, destaca-se Baltsavias (1999), cuja pesquisa foi essencial para formalizar as relações matemáticas entre a densidade de pontos, o ângulo de varredura e a precisão dos retornos, criando a base teórica da tecnologia. Wehr e Lohr (1999) aprofundaram a compreensão das propriedades físicas da varredura a laser, evidenciando sua não dependência da iluminação natural e o potencial de uso em qualquer horário ou estação do ano. Ainda segundo Ferreira (2019), esses estudos consolidaram o LiDAR como uma ferramenta de mensuração ativa confiável, lançando as bases para a sua aplicação em mapeamentos oficiais e estudos ambientais.

A partir desse momento, o desafio deixou de ser apenas adquirir dados confiáveis, passando a concentrar-se na extração do relevo a partir da grande quantidade de pontos gerados.

Axelsson (2000) propôs um método para geração de Modelos Digitais de Terreno baseado em uma rede irregular de triângulos (TIN) construída progressivamente. O algoritmo inicia com pontos mínimos de terreno e, de forma iterativa, adiciona novos pontos que atendem a critérios geométricos de distância e ângulo em relação à superfície estimada, rejeitando implicitamente pontos pertencentes a edificações e vegetação. Esse procedimento, conhecido como densificação progressiva do TIN, produz superfícies contínuas e consistentes do terreno.

A década de 2000 foi marcada pela diversificação de métodos de filtragem e classificação. Sithole (2001) aplicou e avaliou filtros baseados em declividade originalmente propostos por Vosselman (2000), sendo posteriormente realizada uma comparação sistemática entre diferentes estratégias de filtragem em Sithole e Vosselman (2004) e Elmqvist (2002) utilizou Active Shape Models para estimar a superfície do terreno a partir de dados LiDAR, ajustando um modelo deformável aos pontos do solo. A comparação entre algoritmos conduzida por Sithole e Vosselman (2004) demonstrou que o desempenho dos métodos varia conforme a densidade de pontos e a complexidade do relevo, evidenciando a inexistência de uma solução universal para a filtragem de terreno.

Com a consolidação das técnicas de filtragem, o foco da pesquisa passou gradualmente da obtenção do terreno para a identificação das próprias estruturas presentes na cena.

Rabbani, van den Heuvel e Vosselman (2006) apresentaram um método de segmentação de nuvens de pontos baseado em restrições de suavidade e crescimento de regiões, capaz de

agrupar pontos pertencentes à mesma superfície plana. Essa abordagem permite identificar automaticamente planos estruturais de edificações, constituindo base para etapas posteriores de reconstrução geométrica.

Com o amadurecimento das técnicas de filtragem, Ferreira (2019) observa que as pesquisas passaram a concentrar-se na reconstrução tridimensional de edificações. A literatura internacional passou então a explorar a capacidade dos dados LiDAR na identificação de superfícies geométricas urbanas e na modelagem de estruturas construídas, frequentemente associando informações geométricas e radiométricas para melhorar a representação do ambiente urbano. Nesse contexto, o LiDAR deixou de ser utilizado apenas para geração de modelos de terreno, passando também a apoiar a modelagem tridimensional de elementos urbanos.

A integração entre dados LiDAR e imagens aéreas ganhou protagonismo nas pesquisas de modelagem urbana. Susaki (2013) apresentou um método baseado em conhecimento que integra dados LiDAR aerotransportados e imagens aéreas de alta resolução para modelagem de edificações em áreas urbanas densas. O algoritmo classifica telhados em tipologias gable, hip, flat e slant e emprega regras para separar edificações adjacentes, melhorando a segmentação em comparação a abordagens baseadas apenas em altura. Os resultados evidenciam o potencial da integração entre informações geométricas e radiométricas na representação tridimensional do ambiente urbano.

Xu, Vosselman e Oude Elberink (2013) propuseram um método para detecção e classificação automática de mudanças em edificações a partir de dados ALS multitemporais, com aplicação na identificação de construções ilegais. A abordagem baseia-se na geração de um *Surface Separation Map tridimensional* (SSM), que registra a distância entre superfícies correspondentes nas duas épocas. Alterações superiores a 10 cm e com área maior que 4 m² são consideradas mudanças válidas. Os resultados indicaram que praticamente todas as mudanças foram detectadas e aproximadamente 80% classificadas corretamente por inspeção manual.

Yan, Shan e Jiang (2014) propuseram uma abordagem de otimização global para a segmentação de telhados a partir de nuvens de pontos LiDAR aerotransportados, utilizando técnicas de ajuste de planos e minimização de energia global.

Awrangjeb e Fraser (2014) apresentaram um método de extração automática de telhados diretamente da nuvem de pontos, aplicando regras de coplanaridade e vizinhança para

segmentar superfícies e separar vegetação e edificações. O método é data-driven⁵, utilizando apenas dados LiDAR, e separa pontos de solo e não-solo para formar uma máscara de edifício que é usada para agrupar os pontos de não-solo.

O avanço metodológico internacional repercutiu na pesquisa brasileira. Fazan (2014) apresentou um método semiautomático para a extração de contornos de telhados de edifícios com base na combinação de imagens aéreas de alta resolução e dados de varredura a *laser* aerotransportada. O trabalho utilizou o modelo de contorno ativo *Snake*⁶, otimizado por Programação Dinâmica (PD), para ajustar polígonos tridimensionais às bordas detectadas, integrando as informações tridimensionais do LiDAR e as radiométricas das imagens. Essa proposta introduziu técnicas de otimização global na modelagem de superfícies urbanas complexas (FAZAN, 2014).

Fernandes (2016) propôs um método totalmente automático de extração de contornos de telhados, integrando dados LiDAR e imagens aéreas de alta resolução por meio de Campos Aleatórios de Markov⁷(MRF) otimizados com Algoritmo Genético (AG). A formulação permitiu incorporar dependências espaciais e relacionamentos contextuais, alcançando índices de completeza de 90,96% e correção de 98,99% (Fernandes, 2016). Essa pesquisa demonstrou a viabilidade de técnicas probabilísticas e evolutivas para lidar com a variabilidade estrutural de ambientes urbanos.

Santos *et al.* (2018) aprofundaram a análise sobre o impacto do parâmetro alfa (α) na qualidade dos contornos extraídos pelo algoritmo *alpha-shape*, técnica utilizada para a delimitação de edificações a partir de nuvens de pontos LiDAR. O estudo buscou determinar a relação ideal entre o valor de α e a densidade dos pontos, introduzindo uma formulação adaptativa baseada no espaçamento médio entre vizinhos (Savg). Essa variável representa a distância média entre cada ponto da nuvem e seus vizinhos imediatos, permitindo ajustar o parâmetro α de acordo com a resolução local dos dados. Os autores testaram diferentes fatores

⁵ Dependência Exclusiva dos Dados: Significa que o algoritmo de segmentação e extração de telhados utiliza apenas a nuvem de pontos LiDAR bruta como entrada. Ele não depende de informações externas, como imagens aéreas (dados ópticos) ou mapas cadastrais preexistentes. A forma e a geometria do telhado são inferidas diretamente das coordenadas e intensidades dos pontos de laser.

⁶ O termo "Snake" no contexto de processamento de imagens e dados LiDAR refere-se a um tipo de modelo de contorno ativo (Active Contour Model - ACM). É uma técnica de visão computacional usada para delinear o contorno de um objeto em uma imagem ou, no caso do LiDAR, em um modelo de superfície.

⁷ Campo Aleatório de Markov (MRF) é um modelo probabilístico que representa variáveis distribuídas espacialmente, em que o estado de cada ponto depende apenas dos estados de seus vizinhos imediatos (KINDERMAN; SNELL, 1980, apud FERNANDES, 2016).

multiplicadores e observaram que o uso de $\alpha=2*\text{Savg}$ proporcionou os melhores resultados, com precisão (F-score) médio de 95,1% e completeza de 92%, demonstrando elevada precisão geométrica na definição dos contornos. Essa abordagem revelou que a adaptação do α em função da densidade da nuvem melhora significativamente a regularidade e a fidelidade dos polígonos resultantes, tornando o *alpha-shape* um método robusto e eficiente para a vetorização automatizada de edificações em ambientes urbanos complexos.

Carrilho et al. (2019) apresentaram uma abordagem para extração automática de contornos de edificações a partir de dados LiDAR, avaliando a compatibilidade dos erros com a Lei nº 10.406/2002 (Carrilho et al., 2019). Foram comparados o *lasboundary*⁸ do LAStools e o *alpha-shape* com parâmetro dinâmico, e o segundo apresentou resultados superiores, com 94,4% das áreas dentro do limite de erro de 5% (CARRILHO et al., 2019).

Ribeiro (2019) aplicou a tecnologia LiDAR no mapeamento de assentamentos precários, demonstrando seu potencial para caracterizar verticalização, densidade construída e acessibilidade viária. O estudo obteve índice de qualidade de 70% na reconstrução de edificações e precisão compatível com a classe A do Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais – PEC-PCD (Ribeiro, 2019).

Santos (2019) tratou da regularização e modelagem de contornos no espaço tridimensional por meio da CD-Spline⁹ que permite modelar contornos com diferentes níveis de complexidade, alcançando F-score médio de 95,8%.

Ywata (2019) desenvolveu uma metodologia para extração automática de contornos de telhados no espaço-objeto tridimensional¹⁰, integrando estéreo pares de imagens aéreas de alta resolução e modelos tridimensionais derivados de varredura a laser (Ywata, 2019). A autora aplicou o contorno ativo *Snake* com parâmetros adaptativos e utilizou a Programação Dinâmica para otimização global, obtendo resultados superiores a 90% de completeza e correção.

Na África do Sul, Gibson et al. (2021) utilizaram métricas espaciais derivadas de telhados obtidos por LiDAR para avaliar o potencial de propagação de incêndios no

⁸ é o utilitário que lê pontos LiDAR (LAS/LAZ/ASCII) e gera um polígono de contorno para esse conjunto de pontos.

⁹ é um modelo de interpolação paramétrica que permite a variação do grau da spline ao longo de seu traçado, ajustando o nível de suavidade ou detalhamento conforme a complexidade geométrica da forma. Essa formulação foi originalmente proposta por Huang e Ma (2005) e aplicada por Santos (2019) à regularização de contornos tridimensionais em dados LiDAR (HUANG; MA, 2005, apud SANTOS, 2019).

¹⁰ corresponde ao domínio geométrico real em que as feições do terreno e das edificações são representadas por suas coordenadas métricas (X, Y, Z), distinguindo-se do *espaço-imagem*, definido pelo plano fotográfico e pelas coordenadas da câmara (LUGNANI, 1987, apud YWATA, 2019),

assentamento informal de Imizamo Yethu, na Cidade do Cabo. O estudo empregou indicadores morfométricos como densidade de bordas (Edge Density – ED) e proporção da área edificada (PLAND) para analisar a continuidade estrutural das construções. Os resultados indicaram que padrões de maior conectividade entre edificações estão associados a maior potencial de propagação do fogo. A metodologia foi posteriormente aplicada em outro contexto urbano, apresentando comportamento semelhante. O trabalho evidencia o potencial do LiDAR para análises quantitativas de vulnerabilidade em assentamentos densamente ocupados.

Sánchez-Aparicio et al. (2020) avaliaram a influência da densidade da nuvem de pontos LiDAR (0,5, 1, 2 e 14 pontos/m²) na reconstrução geométrica de telhados aplicada à estimativa de potencial fotovoltaico. Observou-se que a baixa densidade (0,5 ponto/m²) gera erros elevados, especialmente em edificações com área inferior a 200 m², atingindo aproximadamente 25–30% de erro relativo. Verificou-se que densidades intermediárias (1–2 pontos/m²) são suficientes para caracterização geométrica adequada, enquanto densidades elevadas (14 pontos/m²) não apresentam ganho proporcional à elevação do custo computacional.

No Brasil, Salazar-Miranda et al. (2022) desenvolveram o trabalho “Favelas 4D: *Scalable methods for morphology analysis of informal settlements using terrestrial laser scanning data*”, aplicando dados de LiDAR terrestre à favela da Rocinha, no Rio de Janeiro.

O estudo propôs um método escalável de mensuração da forma urbana, com cinco métricas principais – largura de ruas, elevação, heterogeneidade de fachadas, densidade de fachadas e cânion urbano, avaliadas em escalas global e local. Os resultados permitiram diferenciar padrões espaciais entre áreas formalizadas e setores informais da Rocinha, evidenciando contrastes de adensamento, verticalização e acessibilidade, e demonstrando o potencial do LiDAR terrestre para diagnósticos urbanos e gestão de vulnerabilidades socioespaciais.

Henrique (2024) aplicou técnicas de aprendizado profundo (*Deep Learning*) para a segmentação automática de edificações a partir da integração de dados LiDAR e imagens ópticas. O autor propôs a utilização da arquitetura ResUNet-a¹¹, que combina um backbone encoder/decoder UNet com conexões residuais e convoluções atrosas, além de Modelos

¹¹ é uma rede totalmente convolucional para segmentação semântica, estruturada em formato *encoder-decoder* semelhante ao da *U-Net*, porém incorporando blocos residuais modificados (*ResBlock-a*), convoluções dilatadas (*atrous convolutions*) e *pooling* piramidal, o que permite melhor desempenho na identificação de padrões e na classificação de classes desbalanceadas (DIAKOGIANNIS et al., 2020, *apud* HENRIQUE, 2024).

Digitais de Superfície Normalizados (MDSn) e composições de bandas derivadas de informações espectrais (Hue, Intensidade e MDSn (HInDSM)), o que permitiu representar simultaneamente aspectos geométricos e radiométricos das edificações urbanas (Henrique, 2024). A inclusão de camadas residuais e convoluções *atrous* aprimorou a capacidade de generalização do modelo, resultando em um ganho de 1,78% no F1-score em relação ao modelo baseado apenas em bandas RGB, e o modelo alcançou performance de 92.9% F1 score médio no dataset ISPRS 2D Potsdam. Esses resultados demonstram que a combinação de dados LiDAR e ópticos potencializa a acurácia dos modelos de segmentação, reforçando a viabilidade do uso de redes neurais profundas na extração de feições urbanas complexas (HENRIQUE, 2024).

Oliveira et al. (2024) desenvolveram uma metodologia automática para o mapeamento de vielas em favelas utilizando dados LiDAR aerotransportados na favela de Paraisópolis (São Paulo). O método combina filtragem progressiva dos pontos de terreno (ferramenta lasground), operações de morfologia matemática com um filtro de fechamento de 3 m para preencher lacunas, e esqueletização topológica (Lee *et al.*, 1994) para gerar a rede linear das vias. A técnica permitiu identificar vielas não detectadas manualmente, evidenciando o potencial do LiDAR para representar a estrutura viária fina em assentamentos informais, subsidiando o planejamento urbano e a mobilidade em áreas não cadastradas.

Liu et al. (2024) apresentaram o modelo Point2Building, uma arquitetura baseada em Transformers para reconstrução automática de edificações tridimensionais a partir de nuvens de pontos. O modelo utiliza mecanismos de atenção para capturar relações espaciais entre pontos e uma estrutura hierárquica multi-escala para representar a geometria das construções. Os resultados demonstram robustez em diferentes formas de edificações, evidenciando o potencial das arquiteturas baseadas em atenção para a reconstrução automática de modelos urbanos tridimensionais.

Silva Júnior e Candeias (2025) apresentaram uma metodologia de extração automatizada de objetos urbanos a partir de dados LiDAR aerotransportados, com aplicação na atualização cartográfica urbana. O estudo foi desenvolvido no Campus Joaquim Amazonas da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) e utilizou uma abordagem baseada na transformação espectral IHS (*Intensity–Hue–Saturation*) e na classificação não supervisionada por k-médias para segmentação das feições. A avaliação do PEC-PCD alcançou a Classe C na escala 1:1000. Os autores destacam que a geometria de varredura e a direção de voo influenciam diretamente a ocorrência de sombras de borda e a precisão da vetorização, confirmando a

viabilidade do uso de dados LiDAR combinados com transformações espectrais na atualização automática de bases cartográficas urbanas.

A partir dos trabalhos apresentados, infere-se que o LiDAR pode contribuir significativamente para análises voltadas à gestão urbana e à inclusão espacial de territórios tradicionalmente ausentes dos cadastros oficiais, evidenciando sua relevância para a representação morfológica de áreas complexas.

2.3.1 Segmentação de Pontos LiDAR e Extração Vetorial de Perímetros

A segmentação de nuvens de pontos baseia-se inicialmente na extração de propriedades geométricas locais que permitam caracterizar a superfície representada por cada ponto. O cálculo do vetor normal é obtido a partir da matriz de covariância formada pelos pontos vizinhos, sendo o vetor normal associado ao autovetor correspondente ao menor autovalor dessa matriz (SAMPATH; SHAN, 2010). A partir desses autovalores também é possível estimar a curvatura local, definida pela razão entre o menor autovalor e a soma dos três autovalores, parâmetro que permite distinguir regiões planas de superfícies irregulares.

Para garantir a confiabilidade dessas estimativas geométricas, a etapa de pré-processamento torna-se fundamental, pois reduz ruídos e melhora a eficiência computacional do processamento. A Point Cloud Library (PCL), apresentada por Rusu (2011), disponibiliza operadores de filtragem estatística para remoção de outliers e estruturas de busca eficiente de vizinhos baseadas na biblioteca FLANN, além de módulos voltados à segmentação, reconstrução e modelagem de superfícies. Técnicas de subamostragem, como VoxelGrid, são frequentemente empregadas em conjunto com esses procedimentos para estabilizar as análises geométricas.

Uma vez estimadas as características locais da superfície, a literatura de segmentação segue o princípio de “dividir para conquistar”, no qual a nuvem é subdividida em regiões homogêneas segundo critérios de orientação das normais, curvatura e conectividade espacial (SITHOLE; VOSSELMAN, 2004; JOCHEM et al., 2009). Entre os métodos mais difundidos destaca-se o crescimento de regiões (region growing), reconhecido pela simplicidade de implementação e pela eficiência na separação de superfícies coplanares (FERREIRA, 2019; SANTOS, 2019). Kang et al. (2020) aprimoraram esse algoritmo ao introduzir o uso da curvatura Gaussiana e média para seleção do ponto semente, reduzindo a sobresegmentação e

aumentando a estabilidade do processo, abordagem posteriormente explorada também por Shen et al. (2021).

Aplicado ao contexto urbano, esse princípio permite a identificação de planos estruturais de edificações. Sampath e Shan (2010) desenvolveram um método baseado em fuzzy k-means para agrupar pontos LiDAR coplanares considerando orientação das normais, proximidade ponto-ao-plano e conectividade espacial, permitindo separar superfícies de telhados e refinar seus limites geométricos. De forma complementar, Su et al. (2022) combinaram crescimento de regiões com análise das relações geométricas entre vizinhos para identificar interseções entre superfícies, utilizando PCA para estimar normais e curvatura e alcançando F1-score superior a 95% na segmentação de edificações complexas.

Após a identificação dos planos, a delimitação do perímetro das edificações (footprints) é realizada por técnicas de geometria computacional. O método α -shape, introduzido por Edelsbrunner, Kirkpatrick e Seidel (1983), constitui uma generalização do convex hull, permitindo representar bordas convexas e côncavas a partir de um parâmetro de detalhamento α . Fischer (2000) demonstrou que a fronteira do α -shape corresponde à fronteira do α -complex, consolidando sua aplicação na vetorização de superfícies. Em aplicações recentes, a escolha do parâmetro α é calibrada conforme a densidade da nuvem, podendo ser definida adaptativamente como $\alpha = 2 \times \text{Savg}$ (SANTOS et al., 2018), possibilitando capturar com maior fidelidade a geometria dos telhados.

2.3.2 Implementação computacional e bibliotecas utilizadas

As referências apresentadas nesta seção correspondem à documentação técnica e aos artigos de descrição das bibliotecas empregadas no desenvolvimento do script de segmentação e extração automática dos perímetros das edificações para registrar formalmente as ferramentas computacionais utilizadas e as operações que elas implementam, garantindo a reprodutibilidade do procedimento.

A base do processamento numérico é formada pelas bibliotecas NumPy e SciPy, responsáveis pela infraestrutura matemática necessária à manipulação eficiente da nuvem de pontos. A biblioteca NumPy fornece estruturas de arrays multidimensionais e operações vetoriais otimizadas, constituindo a base do ecossistema científico em Python e sendo amplamente utilizada em pipelines de análise de dados científicos (HARRIS et al., 2020). Sobre essa estrutura opera a SciPy, que disponibiliza rotinas numéricas fundamentais, incluindo

álgebra linear, interpolação, otimização e ferramentas de análise espacial (VIRTANEN et al., 2020).

Entre seus módulos destaca-se o `scipy.spatial`, que contém a estrutura `cKDTree`, uma árvore k-dimensional utilizada para busca eficiente de vizinhos mais próximos. Essa estrutura permite indexar espacialmente os pontos e acelerar o cálculo de distâncias em grandes conjuntos de dados, sendo empregada na análise local da nuvem de pontos e nas etapas de crescimento de regiões.

A identificação auxiliar de agrupamentos espaciais é realizada com o algoritmo DBSCAN disponibilizado pela biblioteca `scikit-learn` (PEDREGOSA et al., 2011), que fornece implementações padronizadas de métodos supervisionados e não supervisionados de aprendizado de máquina.

A biblioteca `Shapely` (GILLIES, 2023) é utilizada para manipulação geométrica e geração dos polígonos correspondentes aos contornos das edificações. Baseada no motor GEOS, permite executar operações topológicas e construtivas sobre geometrias no plano cartesiano, possibilitando a construção e tratamento dos footprints derivados da nuvem de pontos.

Para leitura e escrita dos arquivos de nuvem de pontos no formato LAS utiliza-se a biblioteca `LasPy`, responsável por acessar os registros de ponto, cabeçalho e informações auxiliares definidos na especificação do formato. O padrão LAS organiza os dados em três componentes principais, cabeçalho, registros de comprimento variável e registros de pontos, armazenando atributos como coordenadas tridimensionais, intensidade e classificação dos retornos LiDAR (ASPRS, 2019).

A geração dos produtos cartográficos é realizada com a `GeoPandas`, permitindo converter diretamente os polígonos extraídos em camadas geográficas com sistema de referência espacial compatível com softwares de SIG. A biblioteca `Matplotlib` (HUNTER, 2007) é empregada para visualização dos resultados e inspeção gráfica dos segmentos e polígonos gerados.

Bibliotecas de aceleração como `Cython` (BEHNEL et al., 2011) e `Numba` (LAM; PITROU; SEIBERT, 2015) são utilizadas em trechos específicos para otimizar o tempo de processamento em grandes volumes de dados.

Assim, as bibliotecas atuam como suporte computacional às operações geométricas definidas pela metodologia, viabilizando a execução prática das etapas de segmentação e extração automática dos perímetros das edificações.

2.3.3 *Footprints* de edificações a partir de imagens orbitais por *deep learning*

Além das abordagens fundamentadas na geometria tridimensional de nuvens de pontos, a literatura recente apresenta métodos cujo objetivo também consiste na delimitação automática de edificações, porém baseados exclusivamente em informações espectrais provenientes de imagens orbitais de alta resolução. Tais abordagens não buscam reconstruir superfícies no espaço-objeto, mas inferir a presença de construções a partir de padrões radiométricos e texturais observados no plano da imagem.

Nesse contexto, Sirko et al. (2021) propõem um pipeline de detecção de edificações em escala continental utilizando imagens com resolução espacial submétrica. O método fundamenta-se em redes neurais convolucionais do tipo U-Net, responsáveis pela segmentação semântica densa da imagem, em que cada pixel recebe uma probabilidade de pertencimento à classe construção. A partir desse mapa probabilístico, aplica-se um limiar de decisão seguido da identificação de componentes conectados, possibilitando a individualização das estruturas construídas. Em seguida, as regiões segmentadas são vetorizadas por extração de contornos e simplificação geométrica, originando polígonos bidimensionais representativos do footprint das edificações (SIRKO et al., 2021).

Os vetores resultantes dessa metodologia foram posteriormente disponibilizados publicamente por meio da plataforma Google Earth Engine, compondo a base denominada Open Buildings. O conjunto de dados pode ser consultado em: <https://sites.research.google/open-buildings/>

Diferentemente de metodologias geométricas baseadas em descontinuidades espaciais e orientação de superfícies tridimensionais, todo o processo ocorre no domínio bidimensional da imagem, dependendo da interpretação espectral aprendida pelo modelo. Assim, embora compartilhe o mesmo objetivo cartográfico, a obtenção automatizada de footprints, essa abordagem fundamenta-se na aparência radiométrica da superfície, constituindo uma estratégia distinta das técnicas baseadas em dados altimétricos (SIRKO et al., 2021).

3 METODOLOGIA

Este capítulo descreve os procedimentos metodológicos adotados para a obtenção automática do *footprint* das edificações na área de estudo, utilizando dados LiDAR e bibliotecas Python especializadas em processamento espacial. A metodologia foi estruturada nas seguintes etapas: aquisição e preparação dos dados, segmentação e agrupamento de pontos, extração de polígonos com α -shape adaptativo, fusão geométrica dos polígonos e validação dos resultados.

3.1 MATERIAIS

Os dados LiDAR empregados neste estudo são provenientes de levantamento aerofotogramétrico digital e de perfilamento a laser realizado em 2020, conforme registrado no Atestado Técnico da PMSP (Termo de Contrato nº 33/2022). O mapeamento, conduzido na cidade de São Paulo, utilizou o sensor LiDAR ORION H300 (Teledyne Optech), integrado ao Sistema Inercial Applanix POS AV 150 e a receptor GNSS de dupla frequência, assegurando elevada precisão posicional. Esses dados encontram-se disponíveis publicamente no portal GeoSampa (https://geosampa.prefeitura.sp.gov.br/PaginasPublicas/_SBC.aspx). Para a presente pesquisa, entretanto, foi utilizado exclusivamente o recorte correspondente ao arquivo 3325_143.

Os parâmetros utilizados para a aquisição dos dados LiDAR foram:

Área de Cobertura: 1.544,00 km² (município de São Paulo);

Densidade Média de Pontos: 10,0 pontos/m²;

Sobreposição Mínima de Voo: 55%;

Padrão de Exatidão Cartográfica: PEC PCD Classe “A”;

Sistema de Referência Geodésico: SIRGAS 2000;

Altimétrico Imbituba/SC (Mapgeo 2015 - IBGE);

Projeção UTM,

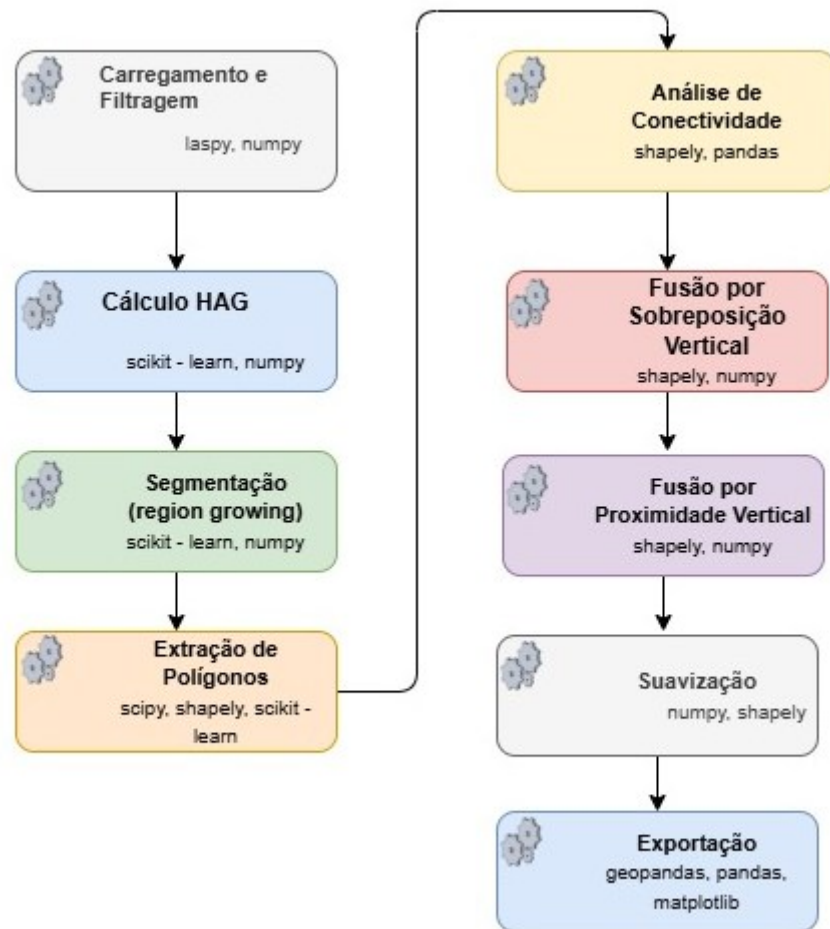
O produto primário e principal insumo para esta pesquisa é a Nuvem de Pontos LiDAR fornecida no formato LAZ. A partir dela, utilizou-se o Modelo Digital de Superfície Normalizado (MDSn), um arquivo *raster* com resolução de 0,50 m (GeoTIFF 32 bits) resultante da subtração MDS - MDT, onde o valor de cada pixel representa a altura dos objetos acima do terreno. Este modelo foi fundamental para isolar as edificações, filtrando-se inicialmente os pontos classificados como “edificação” (classe 6).

Para apoio na interpretação visual e na etapa de validação, utilizaram-se Ortofotos True Ortho com GSD de 10 cm (escala equivalente 1:1.000), geradas a partir de recobrimento com câmera Z/I DMC e fornecidas em JPG2000. Este produto, ortorretificado com correção de viés de perspectiva (posição NADIR), foi crucial para a vetorização manual de referência (ground truth), eliminando oclusões em áreas de edificações verticais.

3.2 FLUXO DO PROCESSAMENTO DA NUVEM DE PONTOS

A Figura 1 apresenta o fluxograma que detalha a sequência dos procedimentos adotados e as respectivas bibliotecas Python empregadas em cada etapa do processamento. Como será descrito a seguir, a integração por meio da qual cada biblioteca especializada contribui com funcionalidades específicas que, em conjunto, possibilitam a extração automatizada de footprints de edificações a partir de nuvens de pontos LiDAR.

Figura 1 - Fluxo de processamento - LiDAR



O processo de extração de footprints de edificações a partir de nuvens de pontos LiDAR adotou uma abordagem baseada em segmentação geométrica e reconstrução vetorial. A metodologia foi implementada em Python, utilizando bibliotecas especializadas para processamento espacial e análise de dados, (scikit-learn, SciPy, LasPy, GeoPandas, Shapely), eliminando o estágio de voxelização¹² comum em fluxo de processamento LiDAR. Esta abordagem preserva a resolução espacial máxima dos dados, permitindo detecção mais precisa de bordas e pequenas estruturas.

O cálculo da Altura Acima do Solo (HAG) constitui etapa fundamental para distinguir objetos elevados da superfície terrestre. Seja um ponto $P = (x, y, z)$ pertencente à nuvem LiDAR. A altura relativa ao terreno é dada pela Equação (3.1):

$$HAG(P) = z - z_{solo}(P) \quad (3.1)$$

¹² Pontos já classificados

Em que: z é a elevação absoluta do ponto P ; $z_{\text{solo}}(P)$ é a elevação do terreno exatamente sob P . A diferença $z - z_{\text{solo}}(P)$ representa a altura real do ponto em relação ao solo, permitindo normalizar o Modelo Digital de Superfície (MDS) pelo Modelo Digital do Terreno (MDT).

A cota do solo $z_{\text{solo}}(P)$ é estimada pela mediana das alturas dos k vizinhos mais próximos de P classificados como "solo", segundo a Equação (3.2):

$$z_{\text{solo}}(P) = \text{median}\{z_j \mid P_j \in V(P, k) \wedge \text{class}(P_j) = \text{"solo"}\} \quad (3.2)$$

onde $V(P, k)$ denota o conjunto dos k vizinhos mais próximos de P no plano XY. O uso da mediana, em vez da média, torna a estimativa robusta a ruídos e outliers, pois reduz a influência de valores extremos.

A estruturação espacial utiliza KD-Trees do scikit-learn para consultas eficientes de vizinhança, otimizando o desempenho das operações de busca espacial.

Após o cálculo da Altura Acima do Solo (HAG), prossegue-se com a segmentação geométrica dos pontos de edificação através do algoritmo Region Growing, que agrupa pontos por similaridade espacial, altimétrica e de orientação de normais.

O cálculo do HAG pela diferença $z - z_{\text{solo}}$ segue a abordagem estabelecida por Sampath e Shan (2010) para reconstrução de telhados. A estimativa robusta da cota do terreno pela mediana dos vizinhos espaciais é compatível com as práticas de processamento espacial descritas por Su et al. (2022).

- Leitura da nuvem com LasPy (sem subamostragem por voxel)
- Cálculo do HAG pelas Equações (3.1) e (3.2)
- Estruturação espacial com KD-Trees para consultas de vizinhança

3.3 SEGMENTAÇÃO POR REGION GROWING COM ÍNDICES

A segmentação da nuvem de pontos foi conduzida pelo algoritmo de crescimento de região (Region Growing) com preservação de índices originais, permitindo rastreabilidade completa dos pontos através das etapas subsequentes do fluxo.

O algoritmo implementa agrupamento progressivo a partir de sementes iniciais, unindo pontos que apresentam proximidade espacial, similaridade altimétrica e orientação compatível das normais. A lógica do algoritmo está representada na Equação (3.3):

$$R_i = \{P_j \in \Omega \mid d_{xy}(P_i, P_j) \leq \theta_{dist} \wedge |HAG(P_i) - HAG(P_j)| \leq \theta_{alt} \wedge \mathbf{n}_i \cdot \mathbf{n}_j \geq \cos(\theta_{ang})\} \quad (3.3)$$

em que:

- R_i é a região em crescimento a partir do ponto-semente P_i ;
- Ω é o conjunto total de pontos da nuvem;
- $d_{xy}(P_i, P_j)$ é a distância euclidiana horizontal entre os pontos P_i e P_j ;
- θ_{dist} é o limiar máximo de distância no plano XY (0,5m);
- $HAG(P)$ é a altura normalizada do ponto em relação ao solo;
- θ_{alt} é o limiar de diferença vertical (0,4m);
- $\mathbf{n}_i \cdot \mathbf{n}_j$ representa o produto escalar entre os vetores normais dos pontos;
- θ_{ang} é o ângulo máximo permitido entre as normais (25°)¹³.

3.3.1 Estimação das Normais por Análise de Componentes Principais (PCA)

A determinação das normais locais é realizada pela Análise de Componentes Principais (PCA) aplicada ao conjunto dos k vizinhos mais próximos de cada ponto ($k = 8$), conforme a Equação (3.4):

$$C_i = (1/k) \Sigma (P_j - P)(P_j - P)^T \quad (3.4)$$

onde:

- C_i é a matriz de covariância associada ao ponto P_i ;
- P_j são os vetores de coordenadas dos vizinhos espaciais;
- $\bar{P}$ é o vetor médio da vizinhança.

A partir da decomposição espectral da matriz C_i , obtêm-se os autovalores $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ e seus respectivos autovetores $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \mathbf{v}_3$. O vetor normal local $\mathbf{n}_i$ é definido como o autovetor correspondente ao menor autovalor (λ_{min}), conforme a Equação (3.5):

13

O critério angular estabelece que pontos cuja diferença entre as normais locais seja inferior ou igual a 25° podem ser agregados ao mesmo plano durante o crescimento de regiões. Esse limite define operacionalmente a continuidade geométrica da superfície, uma vez que pontos espacialmente próximos e com alturas semelhantes podem pertencer a superfícies distintas. Quando o ângulo excede o limiar, a agregação é interrompida, impedindo a fusão de planos com inclinações diferentes, como águas opostas de um telhado, os quais passam a originar novos agrupamentos em etapas subsequentes do processo.

$$\mathbf{n}_i = \mathbf{v}_{\lambda min} \quad (3.5)$$

3.3.2 Critérios de Agrupamento

Durante o processo iterativo, cada ponto P_i é comparado a seus vizinhos imediatos P_j segundo três critérios fundamentais:

Critério de Proximidade Espacial, conforme a Equação (3.6):

$$dxy(P_i, P_j) = \sqrt{[(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2]} \quad (3.6)$$

Critério de Similaridade Altimétrica, conforme a Equação (3.7):

$$\Delta h = |HAG(P_i) - HAG(P_j)| \quad (3.7)$$

Critério de Orientação Angular, conforme a Equação (3.8):

$$\theta_{ij} = \arccos(\mathbf{n}_i \cdot \mathbf{n}_j) \quad (3.8)$$

3.3.3 Expansão e Consolidação de Regiões

O algoritmo implementa crescimento iterativo a partir de sementes ordenadas por altitude decrescente, garantindo priorização de elementos estruturais superiores. Diferentemente de implementações convencionais, esta versão preserva os índices originais dos pontos através das estruturas `kept_idx` e `rotulos_finais`, permitindo rastreabilidade completa durante todo o pipeline de processamento.

Após a expansão regional, aplica-se filtragem por tamanho mínimo de cluster (15 pontos), eliminando agrupamentos insignificantes e preservando apenas regiões estruturalmente relevantes.

As Equações (3.3) a (3.8) e a metodologia de region growing são validadas pelas obras de Kang et al. (2020), que definem o processo iterativo de agrupamento por homogeneidade, e Su et al. (2021), que descrevem o uso de PCA para cálculo de normais.

- Estimativa de normais via PCA com $k = 8$ vizinhos (Equações 3.4 e 3.5)
- Crescimento de região controlado por critérios de distância, altura e orientação (Eqs. 3.7 e 3.8)
- Preservação de índices originais para rastreabilidade
- Filtragem por tamanho mínimo de cluster (15 pontos)

3.4 ESTÁGIO DE RECUPERAÇÃO: FILL + BOOTSTRAP DE CLUSTERS

Para maximizar a cobertura da nuvem de pontos, Implementou-se um mecanismo de recuperação *intra-cluster*, baseado em DBSCAN adaptativo, acionado quando a extração primária por Delaunay falha. Esse processo subdivide clusters irregulares e reconstrói contornos de maneira segmentada.

3.4.1 Preenchimento de Pontos Soltos (Fill)

Pontos não classificados pelo region growing são reassociados a clusters existentes mediante critérios relaxados:

- Distância máxima: 2,8m (vs 0,5m do region growing)
- Diferença de altura: 0,8m (vs 0,4m do region growing)
- Tolerância angular: 38° (vs 25° do region growing)

Esta fase permite recuperar pontos que ficaram marginalizados devido a pequenas descontinuidades locais, completando lacunas geradas por oclusões ou variações de densidade.

3.4.2 Bootstrapping de Novos Clusters

Pontos remanescentes após o fill são processados por DBSCAN com parâmetros adaptativos:

- $\varepsilon = 2,8 \times \text{distância_mediana_vizinhos}$
- $\text{MinPts} = 8$

O DBSCAN identifica automaticamente clusters densos nos pontos não rotulados, formando novas regiões que podem representar edificações não detectadas pelo processo inicial.

A abordagem de múltiplos estágios de agrupamento segue a recomendação de Rusu (2011) para lidar com heterogeneidade em dados LiDAR. Os critérios relaxados do fill refletem

práticas estabelecidas de pós-processamento para recuperação de pontos inicialmente não associados a clusters.

- Fill: integração de pontos isolados com critérios relaxados
- Bootstrap: formação de novos clusters via DBSCAN adaptativo
- Resultado: cobertura máxima da nuvem de pontos

3.5 EXTRAÇÃO HÍBRIDA DE CONTORNOS E PÓS-PROCESSAMENTO

Concluída a segmentação, procede-se à extração dos contornos das edificações através de abordagem híbrida com recuperação, convertendo conjuntos de pontos coplanares em polígonos vetoriais *footprints*.

3.5.1 Abordagem Híbrida de Extração

A estratégia implementada combina múltiplas técnicas:

- Triangulação de Delaunay: inicialmente, aplica-se a triangulação de Delaunay aos pontos do cluster utilizando diferentes configurações do Qhull¹⁴, a fim de mitigar instabilidades decorrentes de degenerações geométricas. As seguintes combinações são testadas de forma hierárquica:

"QJ QbB Qc";

"QJ0.1 QbB Qc";

"QbB Qc".

Quando uma destas configurações gera uma triangulação válida, procede-se à filtragem das arestas, removendo-se conexões cujo comprimento exceda:

$$\alpha = 1,5 \times \text{mediana}(l)$$

onde (l) representa o conjunto dos comprimentos das arestas do cluster.

- Operações Morfológicas: caso a triangulação de Delaunay seja insuficiente para produzir um contorno consistente — situação típica em clusters irregulares ou com densidade variável, aplica-se um processo morfológico baseado em dilatação e erosão.

¹⁴ Qhull é a biblioteca utilizada pelo SciPy para gerar a triangulação de Delaunay. Diferentes configurações de parâmetros são empregadas para lidar com degenerações geométricas e evitar falhas numéricas durante a construção do envelope triangular.

O raio utilizado nas operações é dado por:

$$r = 1,5 \times \text{mediana}(d)$$

onde d denota o conjunto das distâncias entre pontos vizinhos.

A sequência operacional é:

Dilatação (r): expande o suporte espacial do cluster.

Erosão (r): remove irregularidades periféricas, resultando em um contorno mais regular.

Essa etapa constrói um invólucro consistente mesmo quando a geometria interna do cluster apresenta lacunas ou assimetrias.

- Recuperação com DBSCAN: quando ambas as abordagens anteriores falham ou produzem contornos incompletos, adota-se um mecanismo de recuperação intra-cluster baseado no algoritmo DBSCAN adaptativo. Nessa etapa, o cluster é subdividido em subclusters de maior homogeneidade espacial utilizando o parâmetro:

$$\varepsilon = 2,0 \times \text{distância_mediana}.$$

cada subcluster é então processado individualmente pelas etapas anteriores (Delaunay + morfologia), assegurando que até mesmo aglomerados altamente irregulares possam ter seus contornos reconstruídos.

3.5.2 Pós-processamento e suavização

Os contornos resultantes são refinados através de:

- Simplificação Douglas-Peucker (tolerância: 0,10m) para redução de vértices
- Suavização Chaikin (2 iterações, $k=0,25$) para contornos naturais
- Validação geométrica via `make_valid()` para garantir polígonos topologicamente corretos

Os contornos resultantes são suavizados pelo algoritmo de Chaikin (1974) para produção de formas mais naturais. Em cada iteração, o algoritmo gera dois novos pontos entre vértices consecutivos conforme as Equações (3.9 e 3.10):

$$Qi = (1 - k)Pi + kPi + 1 \quad (3.9)$$

$$Ri = kPi + (1 - k)Pi + 1 \quad (3.10)$$

onde $k = 0,25$. Após 2 iterações, o conjunto de pontos resultante substitui o original, produzindo contornos mais regulares.

3.6 FUSÃO POR AGLUTINAÇÃO GEOMÉTRICA

A etapa final implementa estratégias de fusão para consolidação de polígonos que representam a mesma edificação:

3.6.1 Fusão por Sobreposição Vertical

- Critério: Sobreposição $XY \geq 80\%$ e diferença de altura $< 3\text{m}$
- Ação: Aglutinação geométrica via `unary union()` preservando a geometria expandida
- Resultado: Representação da área total da edificação incluindo anexos verticais

3.6.2 Fusão por Proximidade Vertical (Anexos)

- Critério: Distância $XY < 1\text{m}$ e diferença de altura $< 3\text{m}$
- Ação: União de polígonos adjacentes em altura
- Aplicação: Integração de varandas, garagens e extensões

3.6.3 Análise de Conectividade

Implementa análise sistemática de relações espaciais entre polígonos, classificando conectividade como:

- "MUITO PRÓXIMO" ($< 0,2\text{m}$)
- "PRÓXIMO" ($0,2-0,5\text{m}$)
- "PRÓXIMO-MODERADO" ($0,5-1,0\text{m}$)

A fusão por aglutinação segue o princípio fundamental: "*footprints* devem representar a área TOTAL da edificação", consolidando geometricamente elementos arquitetônicos que compõem uma única estrutura. Esta abordagem busca eliminar a fragmentação indevida de edificações complexas, produzindo representações vetoriais que correspondem fielmente à realidade física das construções.

3.7 AVALIAÇÃO QUANTITATIVA:

A avaliação da correspondência entre os polígonos automáticos (PA), extraídos a partir dos dados LiDAR, e os polígonos de referência (PV), vetorizados manualmente a partir de ortofotos *true ortho* com GSD de 10 cm, foi realizada por meio de diferentes métricas quantitativas de similaridade espacial e geométrica.

Entre essas métricas, o Índice de Jaccard (IoU) mede a razão entre a área de interseção e a área de união dos dois polígonos, servindo como indicador da sobreposição e do alinhamento espacial entre as feições correspondentes. Essa métrica é amplamente adotada em estudos de detecção e validação de edificações, sendo considerada satisfatória quando o valor de IoU é superior a 0,5, o que caracteriza uma correspondência espacial correta entre o polígono detectado e o de referência (LI et al., 2019)

A Precisão espacial (Precision) expressa a proporção da área detectada automaticamente (PA) que corresponde efetivamente à área de referência (PV), refletindo a quantidade de elementos corretamente classificados em relação ao total identificado pelo algoritmo.

A Revocação (Recall), por sua vez, avalia a completude da detecção, mensurando a fração da área de referência que foi efetivamente recuperada nos polígonos automáticos. Ambas são tradicionalmente combinadas por meio do F1-Score, calculado como a média harmônica entre Precisão e Revocação, sintetizando em um único valor o equilíbrio entre exatidão e completude (LI et al., 2019)

Para quantificar a fidelidade geométrica dos contornos, foi utilizada a Distância de Hausdorff (HD), métrica que mensura o desvio máximo entre os limites de dois polígonos correspondentes, permitindo identificar discrepâncias locais de geometria e distorções nas bordas (NIROSHAN; CARSWELL, 2025)

Essas métricas, segundo os autores, são essenciais para avaliar a acurácia de forma (*shape accuracy*) de maneira independente do alinhamento posicional, especialmente em contextos onde pequenas variações de borda impactam significativamente a morfologia do objeto mapeado.

A utilização combinada de métricas baseadas em área (IoU, Precisão, Revocação, F1-Score) e contorno (Hausdorff) segue recomendações de *Das e Raghavan (2022)*, que propõem uma estrutura de avaliação multimétrica para aferir simultaneamente a completude, a fidelidade geométrica e a coerência topológica das feições vetoriais derivadas (DAS; RAGHAVAN, 2025)

Assim, além das métricas principais, também foram consideradas as áreas absolutas dos polígonos PA e PV e a área de interseção entre ambos, de modo a quantificar a extensão espacial comum e complementar as análises de correspondência entre os dois conjuntos de dados.

imobiliário informal se interligam de maneira intrincada. A análise da trajetória desse território é fundamental para compreender como os assentamentos populares se desenvolvem e se consolidam no cenário urbano brasileiro.

Segundo Moreira (2013) a origem de Heliópolis data de 1927, período em que a família Penteado iniciou a ocupação da área, edificando 36 residências para aluguel em terrenos de 141 a 697 metros quadrados, o que deu origem ao Residencial Vila Heliópolis. Este local, estrategicamente posicionado próximo ao centro da cidade, permaneceu subutilizado por várias décadas, caracterizado por uma fazenda com árvores frutíferas e duas lagoas alimentadas por nascentes. Em 1942, o Instituto de Aposentadoria e Pensões dos Industriários (IAPI) adquiriu a gleba com o propósito de construir moradias para seus membros. Contudo, Amaral (1991, p. 31) aponta que o IAPI nunca concretizou esse projeto. Posteriormente, em 1966, a gestão da área foi transferida para o Instituto de Administração da Previdência e Assistência Social (IAPAS), após a unificação dos Institutos de Previdência Social pelo decreto de lei nº 72. O IAPAS, por sua vez, construiu o Hospital Heliópolis e o Posto de Assistência Médica (PAM) em 1969, como mencionado por Amaral (1991). É relevante notar que, apesar de o IAPAS ter subdividido a área em glebas menores e edificado os dois equipamentos de saúde, grande parte do terreno permaneceu ociosa, sem ocupação efetiva, segundo (MOREIRA, 2013).

O ano de 1971 marca o início da ocupação habitacional de Heliópolis. Sob a administração do prefeito José Carlos de Figueiredo Ferraz, a Secretaria do Bem Estar Social da Prefeitura Municipal de São Paulo (SEBES) realizou o desadensamento da favela de Vila Prudente, transferindo 150 famílias para Vilas de Habitação Provisória (VHP) em Heliópolis, próximas à Rua Coronel Silva Castro e ao córrego Sacomã, conforme relata Moreira (2013). Essas VHP eram moradias temporárias de madeira com banheiros coletivos, baseadas na premissa equivocada de que os moradores de favelas eram migrantes recém-chegados que encontravam ali sua primeira residência na cidade. No entanto, Taschner e Baltrusis (2003) esclarecem que o fenômeno estava mais ligado ao empobrecimento da população.

Em 1978, novas moradias provisórias foram erguidas para acomodar 60 famílias desalojadas da favela Vergueiro (MOREIRA, 2013). A construção desses alojamentos estimulou a chegada de novos residentes, que construíram barracos de madeira e papelão nas proximidades, incluindo os trabalhadores que atuaram na edificação do Hospital e do PAM, conforme descrito por (AMARAL, 1991). A localização estratégica de Heliópolis foi crucial para sua densa ocupação. Desde as primeiras instalações, o local já se beneficiava de um contexto urbano favorável, estando relativamente próximo ao centro de São Paulo (cerca de 8 quilômetros), a duas estações ferroviárias e a um importante polo industrial, o eixo que

acompanha o Rio Tamanduateí, estendendo-se de São Paulo a Santo André. Além disso, a região contava com uma boa infraestrutura e uma variedade de serviços em seu entorno (AMARAL, 1991).

No final da década de 1970, as ocupações informais em Heliópolis deram origem a uma nova forma de apropriação territorial: a grilagem. De acordo com Amaral (1991), grileiros passaram a disputar terras de forma violenta com os novos ocupantes, especialmente nas ruas Cônego Xavier e Estrada das Lágrimas. Esses grileiros dividiam a terra, abriam ruas, demarcavam e vendiam lotes, controlando a ocupação de Heliópolis por meio de ameaças e violência. Famílias que se instalavam sem a permissão dos grileiros eram forçadas a pagar um valor pela "venda do lote" ou eram expulsas, conforme relatado por (MOREIRA, 2013). O ambiente era de conflito e violência entre os ocupantes e os grileiros, a ponto de, quando o IAPAS percebeu, a ocupação da gleba já era uma realidade consolidada (AMARAL, 1991).

Amaral (1991) argumenta que o poder público, tanto federal (IAPAS, por ter abandonado sua propriedade) quanto municipal (por instalar alojamentos provisórios que se tornaram permanentes), foi o principal responsável pela criação e desenvolvimento da favela Heliópolis/São João Clímaco. As tentativas do IAPAS de reintegrar a posse da área no final dos anos 1970 impulsionaram a organização dos moradores, que se mobilizaram para resistir às remoções e exigir a instalação de serviços básicos como água e luz, que eram precários até então. Em 1979, uma liminar de reintegração de posse foi emitida por um Juiz Federal em São Paulo a favor do IAPAS, e em 1983, a determinação foi cumprida, com a lavratura do auto de reintegração de posse (MOREIRA, 2013).

A intensa mobilização popular dos moradores de Heliópolis resultou, em 1984, em uma articulação entre a prefeitura de São Paulo, o IAPAS e o BNH. Essa parceria viabilizou a transferência da gleba de Heliópolis para o BNH, que, por sua vez, a repassou para a COHAB municipal, com o objetivo de construir moradias para famílias de baixa renda. Essa transferência foi amplamente divulgada, atraindo novos moradores interessados em residir em uma área que seria alvo de intervenção do poder público. Sete anos depois, em 1991, Heliópolis já se consolidava como uma das maiores favelas da cidade, abrigando mais de 40 mil pessoas em 9.711 domicílios. As famílias haviam ocupado praticamente toda a gleba, incluindo as áreas alagadas que formavam as minas de água potável e a lagoa (MOREIRA, 2013).

Em 2010, Heliópolis contava com aproximadamente 65 mil habitantes distribuídos em cerca de 19 mil domicílios. Desse total, mais de 6,5 mil moradias foram construídas ou promovidas pelo Estado, representando quase 40% do conjunto habitacional. A evolução de Heliópolis reflete as diversas abordagens adotadas pelo poder público municipal em relação às

favelas ao longo das décadas. Taschner (2006) categoriza essas estratégias em cinco períodos distintos: na década de 1940, a política habitacional visava exclusivamente à remoção das favelas, vistas como uma "doença" urbana; a partir dos anos 1970, as favelas foram erroneamente consideradas situações temporárias, resultantes da migração, levando à oferta de alojamentos provisórios em Vilas de Habitação Provisória; nos anos 1980, o Município passou a reconhecer a existência das favelas como uma condição habitacional e implementou medidas para reduzir a precariedade; entre 1986 e 1988, a remoção de favelas ressurgiu como ação pública, especialmente em áreas valorizadas; e, a partir de 1989, a urbanização de favelas foi integrada à política municipal.

A literatura acadêmica recente sobre Heliópolis evidencia a persistência de contradições na organização do espaço habitacional. Noronha (2019) aponta a coexistência de lutas sociais por moradia e a formação de um mercado imobiliário adaptado à realidade local, no qual práticas de solidariedade e de mercantilização do espaço se articulam simultaneamente. Nesse contexto, intervenções estatais e melhorias de infraestrutura, associadas a programas públicos, passam a interagir com dinâmicas já existentes, podendo contribuir para processos de valorização do espaço construído e para o aumento dos valores de aluguel, o que tensiona as relações socioeconômicas internas entre moradores. Silva (2018) analisa Heliópolis como expressão das disputas políticas urbanas no Brasil, evidenciando a interação entre classes dominantes, movimentos sociais e Estado na definição das políticas urbanas. O autor demonstra que a produção do espaço urbano resulta de conflitos entre projetos políticos distintos, nos quais, embora haja conquistas dos movimentos sociais, permanecem predominantes interesses associados às classes dominantes. Souza (2023) investiga a desarticulação das políticas públicas na produção do espaço urbano de Heliópolis, observando que os planos habitacionais são implementados de forma fragmentada e descontínua, sujeitos a mudanças de gestão. O autor ressalta que a irregularidade se tornou a norma e que persistem desafios relacionados à titulação fundiária, projetos interrompidos e sobreposição de normas. Souza (2023) analisa a atuação do poder público em Heliópolis e identifica a presença de pendências urbanísticas e desarticulação das ações de urbanização e regularização fundiária, nas quais a titulação dos moradores muitas vezes permanece apenas no plano discursivo.

A formação de Heliópolis exemplifica um caso notável da urbanização brasileira, no qual a intervenção inicial do poder público, por meio de alojamentos provisórios, desencadeou um processo complexo de ocupação territorial, marcado pela resistência popular, disputas fundiárias e ações estatais desarticuladas (SOUZA, 2023). A análise da literatura demonstra que Heliópolis não é um espaço marginal, mas um território onde se manifestam contradições urbanas mais amplas, como a segregação

socioespacial e a mercantilização da vida urbana (NORONHA, 2017; NORONHA, 2018). O caso de Heliópolis ilustra como a favela se configura como um espaço dinâmico e paradoxal, no qual a resistência e a adaptação às lógicas capitalistas se entrelaçam, expressando disputas entre diferentes projetos políticos de cidade (SILVA, 2018). Isso ressalta a importância da organização comunitária na luta por direitos urbanos, ao mesmo tempo em que evidencia as limitações estruturais das políticas públicas habitacionais no enfrentamento das desigualdades urbanas (SOUZA, 2023).

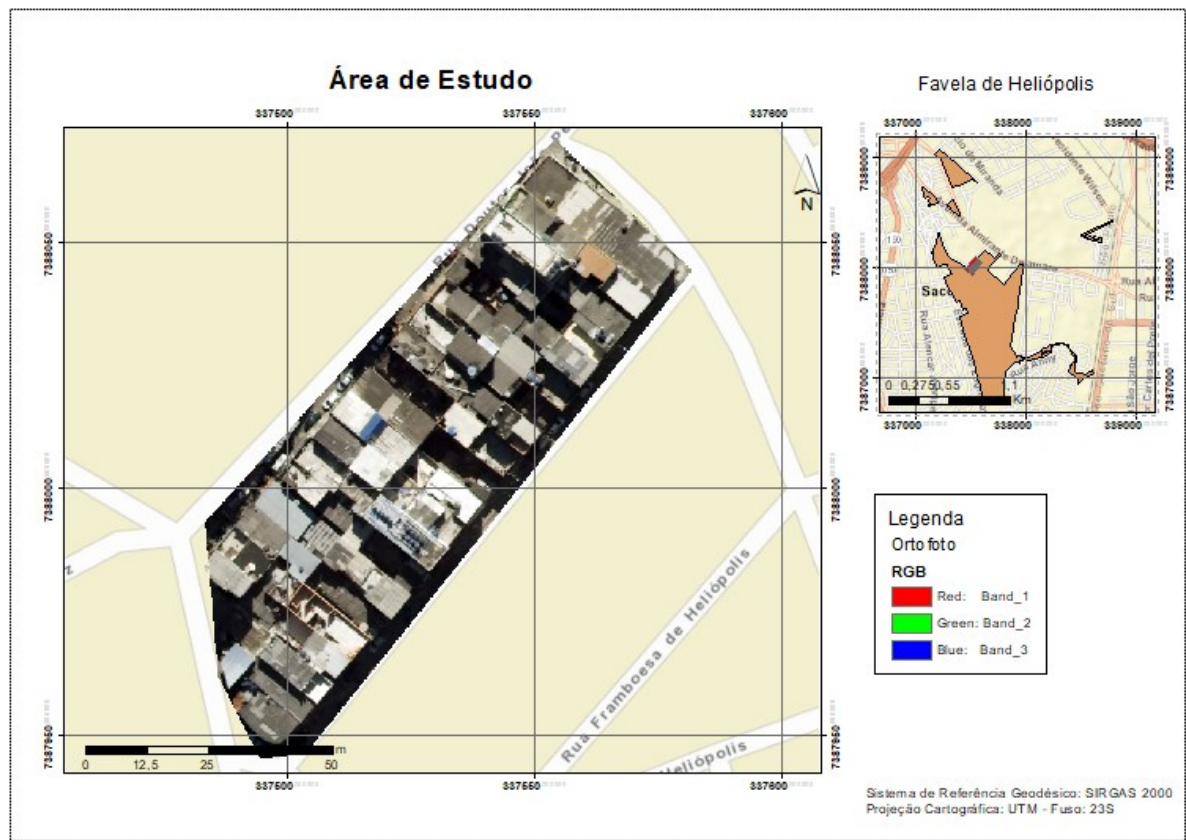
4.1 APLICAÇÃO DO MÉTODO

A aplicação do método sobre a nuvem de pontos resultou na extração dos *footprints* e para ilustrar os resultados, foram produzidas as Figuras de 3 a 6.

A Figura 03 apresenta a área de estudo localizada na Favela de Heliópolis, na zona sudeste do município de São Paulo (SP). A figura central contextualiza a posição exata do recorte analisado em relação ao conjunto da favela, destacando a ortofoto de alta resolução que ilustra a disposição e a morfologia das edificações no interior do assentamento. No canto superior direito, o mapa de localização exibe o perímetro da Favela de Heliópolis, permitindo compreender a inserção da área estudada no contexto urbano mais amplo.

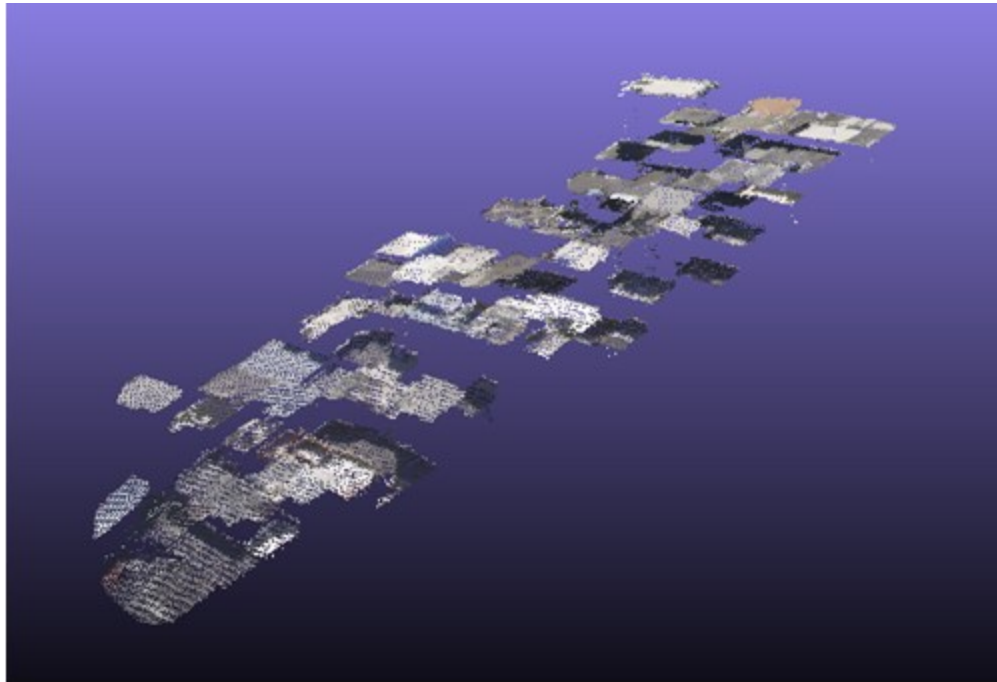
A ortofoto evidencia a irregularidade e a justaposição das construções, características típicas das áreas de favela. Essa complexidade morfológica das edificações demonstra a dificuldade inerente à obtenção automática dos *footprints*, dado o entrelaçamento e a sobreposição das coberturas que desafiam os métodos convencionais de segmentação e vetorização.

Figura 3 - Morfologia das edificações



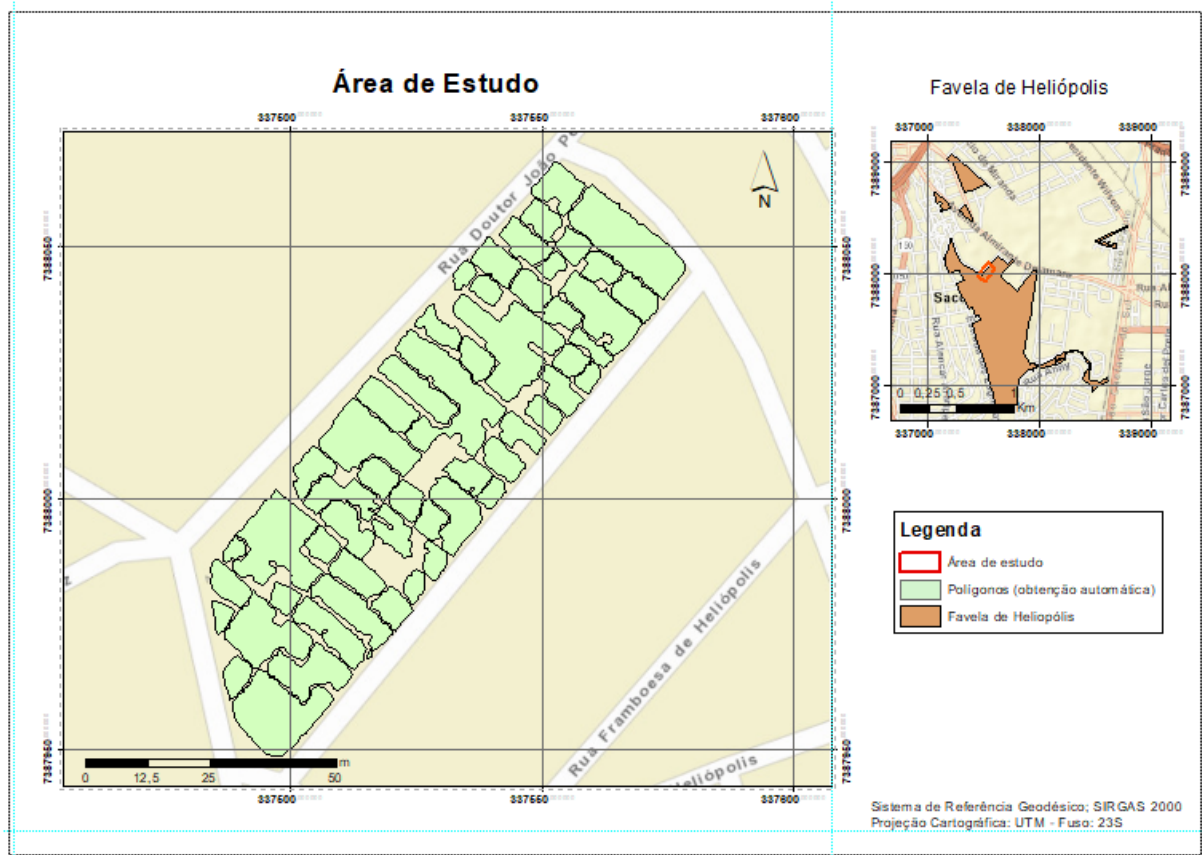
A Figura 04 apresenta a nuvem de pontos LiDAR em três dimensões, ilustrando a disposição espacial dos retornos captados pelo sensor sobre a área de estudo. Essa visualização tridimensional demonstra a capacidade do LiDAR em representar, com elevado nível de detalhe, a morfologia dos telhados e demais elementos da superfície. A distribuição vertical dos pontos evidencia a estrutura volumétrica das construções, permitindo identificar diferenças de altura, formas de cobertura e relações entre os objetos urbanos. Essa representação constitui a base para as etapas subsequentes de segmentação e extração automática dos *footprints*.

Figura 4 - Distribuição 3D dos pontos LiDAR



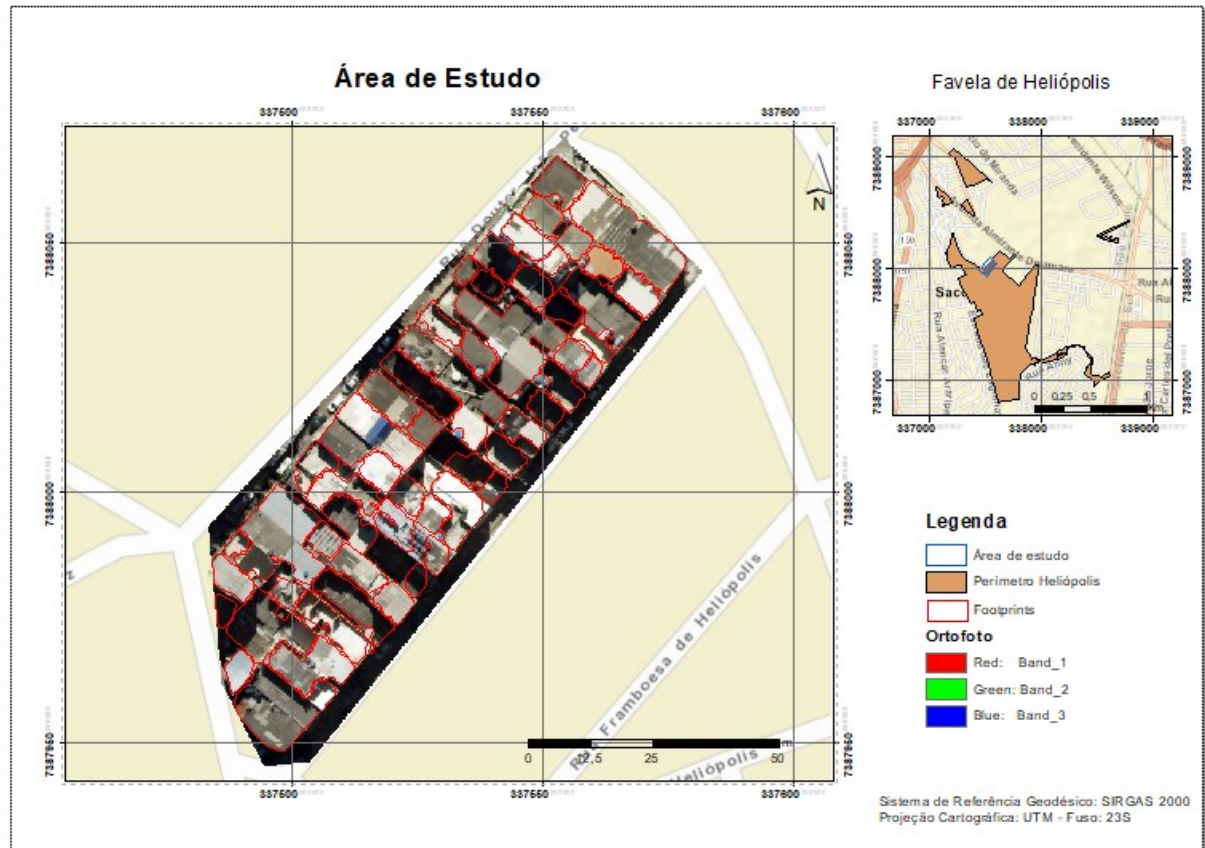
A Figura 05 apresenta os polígonos extraídos automaticamente a partir dos dados LiDAR na área de estudo. A figura central mostra o resultado do processamento baseado na metodologia de crescimento de região e na obtenção híbrida do contorno dos polígonos, representando as projeções horizontais das edificações identificadas pelo algoritmo.

Figura 5 – Polígonos resultantes do processamento dos dados LiDAR



A Figura 06 apresenta a sobreposição dos *footprints* obtidos automaticamente a partir dos dados LiDAR sobre a ortofoto de alta resolução. A figura central oferece uma visão geral da aderência entre os polígonos gerados e as edificações materializadas na imagem, permitindo observar a correspondência espacial entre ambos.

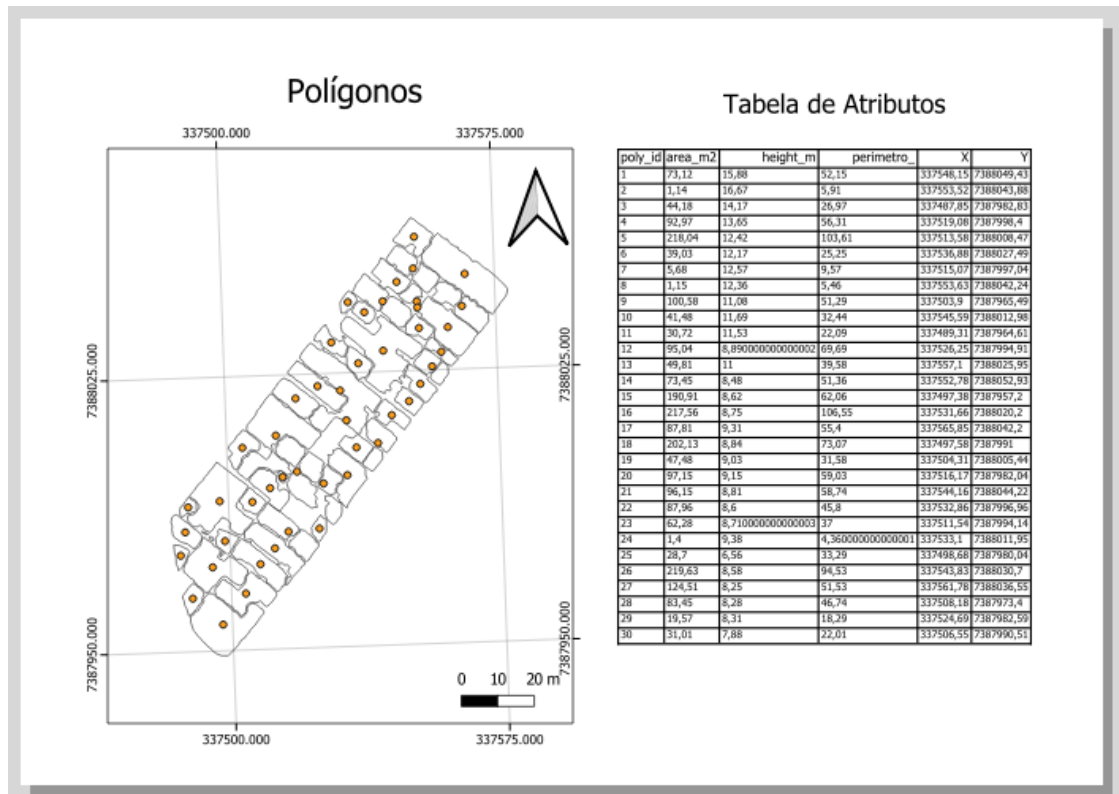
Figura 6 - *Footprints* resultantes da segmentação sobre a ortofoto



A Figura 7 apresenta a base geométrica resultante do processo de extração automática, composta pela projeção bidimensional das edificações e pelos seus respectivos centroides. Essa estrutura constitui a base geométrica fundamental para a elaboração do SIG proposto, que permitirá o armazenamento dos atributos de pessoas e do território de forma georreferenciada.

A tabela de atributos reúne parâmetros como área, perímetro, centroide sistema de referência SIRGAS 2000, evidenciando que a base geométrica dispõe dos requisitos para estruturar SIG interoperáveis, capazes de sustentar análises espaciais e subsidiar o planejamento urbano, especialmente em contextos de favelas, onde a carência sistemática de informações compromete a formulação de políticas públicas. Trata-se, portanto, da consolidação de um produto que alia consistência geométrica e funcionalidade, em conformidade com os princípios da abordagem FFP.

Figura 7 - Base geométrica para elaboração do Banco de Dados



4.2 DISCUSSÃO

A avaliação do método proposto concentrou-se na comparação entre os polígonos automáticos (PA), extraídos a partir do processamento da nuvem de pontos LiDAR, e os polígonos de referência (PV), obtidos por vetorização manual a partir da ortofoto. O conjunto inicial era composto por 47 polígonos automáticos e 38 polígonos de referência. Após o processo de filtragem, correspondência e eliminação de falsos positivos, 45 polígonos automáticos foram efetivamente avaliados, visto que dois não apresentaram correspondência no conjunto de referência, indicando situações de sobre-segmentação, anexos removidos ou, em menor grau, ruído residual da etapa de fusão.

A discussão é estruturada considerando três frentes principais: (i) o comportamento das métricas globais, (ii) a distribuição dos desempenhos por classe de aderência geométrica, e (iii) o impacto direto do estágio de fusão na métrica de Revocação. A interpretação integrada desses elementos permite compreender o desempenho do método quando aplicado a uma favela altamente adensada e morfologicamente irregular como Heliópolis.

4.2.1 Análise das métricas globais

O quadro 2 apresenta as estatísticas globais das métricas de acurácia geométricas obtidas.

quadro 2 - Estatísticas globais das métricas de acurácia geométrica

Métrica	Valor
IoU Médio ¹⁵	0,4203
IoU Mediano ¹⁶	0,3847
F- Score Médio ¹⁷	0,5497
Precisão Média ¹⁸	0,8074
Revocação Média ¹⁹	0,5113
Sobreposição PA Média ²⁰	0,8074
Sobreposição PV Média ²¹	0,5113
Hausdorff Médio ²²	8,6465 m
Diferença de Área Relativa Média ²³	0,4746

O IoU Médio de 0,4203 e o IoU Mediano de 0,3847 indicam que, em média, a sobreposição entre os polígonos automáticos e os de referência está abaixo do limiar de 0,5, frequentemente considerado como satisfatório para a detecção de objetos (LI et al., 2019). No entanto, a análise deve ser contextualizada pela natureza da metodologia e do ambiente de estudo.

A Precisão Média (Precision) de 0,8074 (ou Sobreposição PA Média) sugere que, quando um polígono é extraído, ele tende a ser geometricamente correto em relação à área real da edificação. Em outras palavras, 80,74% da área dos polígonos automáticos corresponde à área dos polígonos de referência. Este resultado é positivo e indica que o processo de extração e o pós-processamento (incluindo a suavização CD-Spline) estão gerando formas com alta fidelidade local.

Por outro lado, a Revocação Média (Recall) de 0,5113 (ou Sobreposição PV Média) é

¹⁵ mede o grau de sobreposição entre o polígono automático (PA) e o polígono de referência (PV). É a razão entre a área de interseção e a área de união dos dois polígonos. Valores próximos a 1,0 indicam forte correspondência geométrica.

¹⁶ representa o valor central (menos sensível a outliers) do IoU calculado para todos os pares PA–PV. Indica o desempenho típico do conjunto, mesmo quando há alguns casos extremos.

¹⁷ média harmônica entre Precisão e Revocação. Resume em um único valor o equilíbrio entre a exatidão da detecção (quantos acertos são realmente corretos) e a completude (quanto do total foi identificado).

¹⁸ proporção das áreas detectadas automaticamente (PA) que correspondem efetivamente a edificações reais (PV). Mede o nível de “acerto” do algoritmo — quanto menor o número de falsos positivos, maior a Precisão.

¹⁹ proporção das áreas reais (PV) que foram corretamente detectadas pelo algoritmo. Mede a completude da detecção, quanto menor o número de falsos negativos, maior a Revocação.

²⁰ indica a fração média da área dos polígonos automáticos (PA) que se sobrepõe às áreas de referência (PV). Mede o quanto de cada polígono detectado coincide com a verdade de campo.

²¹ indica a fração média da área dos polígonos de referência (PV) coberta pelos polígonos automáticos (PA). Complementa a métrica anterior, evidenciando o quanto da área real foi efetivamente mapeada.

²² mede a discrepância máxima entre os contornos dos polígonos PA e PV. Valores menores indicam maior aderência geométrica e fidelidade das bordas.

²³ representa a diferença percentual média entre as áreas de PA e PV. Valores próximos de zero indicam boa correspondência em escala; valores negativos indicam subestimação e positivos, superestimação da área detectada.

significativamente menor. A Revocação mede a completude da detecção, ou seja, a proporção da área dos polígonos de referência que foi coberta pelos polígonos automáticos. Este valor sugere que os polígonos automáticos estão consistentemente subestimando a área total das edificações de referência, o que é um ponto crucial para a discussão.

A Distância de Hausdorff Média de 8,6465 metros é relativamente alta e indica que, em alguns casos, as bordas dos polígonos automáticos estão distantes das bordas dos polígonos de referência, o que pode ser um reflexo da complexidade morfológica das edificações em favelas e da própria subestimação da área.

4.2.2 Classificação da Aderência Geométrica

A classificação dos resultados por categoria de aderência, baseada no Índice de Jaccard (IoU), é apresentada no quadro 4, e a classificação por F1-Score é apresentada no quadro 5. A análise dessas classificações reforça a tendência observada nas métricas globais.

quadro 3 - Classificação dos polígonos por categoria de aderência (IoU)

Categoria de aderência	Quantidade	Percentual (%)
Necessita ajustes	35	77,78
Satisfatória	7	15,56
Alta aderência geométrica	3	6,67

quadro 4 - Classificação dos polígonos por qualidade (F1 - Score)

Qualidade F1-Score	Quantidade	Percentual %
Ruim	17	37,78
Regular	16	35,56
Boa	5	11,11
Excelente	7	15,56

A predominância de polígonos na categoria "Necessita ajustes" (77,78%) e a alta frequência nas categorias "Ruim" (37,78%) e "Regular" (35,56%) para o F1-Score indicam que a metodologia, apesar de ter uma alta Precisão, falha em atingir a completude necessária para a maioria dos polígonos.

4.2.3 O Impacto da Fusão na Revocação

O desequilíbrio entre a alta Precisão (0,8074) e a baixa Revocação (0,5113) é resultado direto da adoção dos critérios de fusão geométrica estabelecidos para consolidar polígonos pertencentes a uma mesma edificação. Conforme descrito na Seção 2.2.5, tais critérios adicionais são um ajuste metodológico intencional na tentativa de que o footprint represente a projeção total da edificação sobre o solo, integrando anexos e volumes secundários. Embora eficazes para preservar a coerência morfológica, esses mecanismos induzem um comportamento conservador do algoritmo, que privilegia a exatidão geométrica em detrimento da completude da área.

É importante destacar que, do ponto de vista geométrico, o algoritmo atua corretamente ao distinguir planos distintos, como lajes em diferentes níveis, varandas abertas ou áreas parcialmente cobertas, uma vez que essas superfícies possuem descontinuidades reais detectáveis nos dados LiDAR. No entanto, essa segmentação rigorosa reduz a aderência do footprint à projeção total da edificação, uma vez que parte das áreas funcionais, embora pertencentes à mesma construção, deixam de ser incorporadas.

Para mitigar esse efeito, foram implementados dois mecanismos de fusão complementares, Vertical Overlap Fusion e Vertical Proximity Fusion, que buscam consolidar polígonos vertical ou lateralmente correlacionados, equilibrando a preservação da coerência geométrica com a necessidade de representar edificações contínuas. Nesse contexto, o desempenho obtido reflete o próprio dilema metodológico da extração automática: quanto maior a precisão geométrica, menor a completude espacial. Assim, a baixa Revocação não representa uma falha do algoritmo, mas sim uma consequência direta da coerência topológica imposta pelos critérios de fusão. No âmbito da abordagem FFP, essa característica é aceitável, uma vez que a prioridade é a confiabilidade da geometria extraída, mesmo que parcialmente subestimada, desde que seja passível de complementação em etapas posteriores, como edição manual ou integração com outras fontes de dados.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÕES

O presente estudo teve como objetivo avaliar a aplicabilidade do método de extração automática de *footprints* de edificações a partir de dados lidar quando aplicado em áreas de favela. A metodologia proposta integrou técnicas de segmentação por Region Growing e extração de contornos por α -shape adaptativo, culminando na implementação de um mecanismo de fusão de polígonos por sobreposição e proximidade vertical.

Os resultados demonstraram que o método extraiu polígonos com Precisão (0,8074), indicando que a área extraída é geometricamente correta e corresponde a uma parte real da edificação. Este é um achado positivo, pois atesta a fidelidade local do processo de extração e pós-processamento.

Entretanto, o estudo revelou um desafio significativo: a baixa Revocação (0,5113) e o IoU Médio abaixo do limiar de 0,5 (0,4203). Este desequilíbrio é uma consequência direta da natureza conservadora do algoritmo de fusão e da complexidade morfológica das edificações em favelas. A metodologia, ao priorizar a precisão, tende a subestimar a área total da edificação de referência, que frequentemente inclui anexos e áreas de cobertura não detectadas pelo LiDAR ou não agrupadas pelo Region Growing. A classificação da aderência geométrica reforça essa conclusão, com a maioria dos polígonos classificados na categoria "Necessita ajustes" (77,78%).

Apesar do IoU médio não atingir o padrão ideal, a alta Precisão alcançada sugere que os *footprints* são confiáveis quanto a localização e forma. Essa confiabilidade é o aspecto mais relevante para a abordagem FFP, onde a base geométrica serve como um ponto de partida para o SIG, permitindo que a subestimação da área seja corrigida em etapas posteriores (ex: edição manual ou integração com outras fontes de dados). Conclui-se, portanto, que a metodologia proposta atende ao princípio FFP, fornecendo uma base geométrica rápida e suficiente, mesmo que incompleta em termos de cobertura total da área.

5.2 RECOMENDAÇÕES

Como trabalhos futuros, sugere-se: (I) a investigação de métodos de Region Growing que incorporem critérios de conectividade vertical mais flexíveis para mitigar a subestimação da área total; (II) a avaliação da integração dos *footprints* extraídos com dados de ortofotos para aprimorar a Revocação, utilizando técnicas de Deep Learning para refinar os contornos em áreas de baixa densidade de pontos LiDAR; (III) a aplicação da metodologia em outras áreas de favela para validar a robustez e a generalização dos resultados.

REFERÊNCIAS

- ASPRS. LAS Specification Version 1.4 — R15. Bethesda: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2019.
- AXELSSON, Peter. DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, [S.l.], v. 33, p. 110–117, 2000.
- BALAS, Marisa; CARRILHO, João; LEMMEN, Christiaan. The Fit-for-Purpose Land Administration Approach—connecting people, processes and technology in Mozambique. *Land*, Basel, v. 10, n. 8, p. 818, ago. 2021. DOI: 10.3390/land10080818.
- BALTSAVIAS, Emmanuel P. Airborne laser scanning: basic relations and formulas. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Amsterdam, v. 54, n. 2–3, p. 199–214, 1999.
- BARROS, Ana Paula Borba Gonçalves; MEDEIROS, Valério Augusto Soares de; MORAIS, Maria da Piedade. A configuração espacial para o diagnóstico dos assentamentos precários no Brasil. In: MORAIS, Maria da Piedade; KRAUSE, Cleandro; LIMA NETO, Vicente Correia (ed.). *Caracterização e tipologia de assentamentos precários: estudos de caso brasileiros*. Brasília: Ipea, 2016. p. 95–125.
- BEHNEL, Stefan; BRADSHAW, Robert; CITRO, Craig; DALCIN, Lisandro; SELJEBOTN, Dag Sverre; SMITH, Kurt. Cython: The Best of Both Worlds. *Computing in Science & Engineering*, Washington, v. 13, n. 2, p. 31–39, 2011.
- BRASIL. Decreto nº 11.208, de 26 de setembro de 2022. Dispõe sobre o Sistema Nacional de Gestão de Informações Territoriais e sobre o Cadastro Imobiliário Brasileiro. Brasília, DF: Presidência da República, 2022.
- BRASIL. Decreto nº 8.764, de 10 de maio de 2016. Institui o Sistema Nacional de Gestão de Informações Territoriais (SINTER). Brasília, DF: Presidência da República, 2016.
- BRASIL. Ministério das Cidades. Portaria nº 511, de 7 de dezembro de 2009. Brasília, DF, 2009.
- BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Portaria nº 3.242, de 9 de novembro de 2022. Brasília, DF, 2022.
- BURGOS, Marcelo Baumann. Favela e luta pela cidade: esboço de um argumento. In: SILVA, Jailson de Souza et al. (org.). *O que é a favela, afinal?* Rio de Janeiro: Observatório de Favelas, 2009.
- CARNEIRO, Andrea Flávia Tenório. Da cartografia cadastral. In: CUNHA, Egláisa Micheline Pontes; ERBA, Diego Alfonso (org.). *Diretrizes para a criação, instituição e atualização do cadastro territorial multifinalitário nos municípios brasileiros: manual de apoio*. Brasília: Ministério das Cidades, 2010. cap. 3, p. 49–64.
- CARRILHO, A. C. Extração e refinamento de contornos de telhados utilizando descritores geométricos e integração de dados LiDAR e imagens aéreas. 2021. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista (Unesp), Presidente Prudente, 2021.
- CAVALLIERI, Fernando; OLIVEIRA, Fabrício Leal de; SALES, Alba Valéria de Souza; SANTOS, Ana Cláudia A.; TAVARES, Ricarda Lucília Domingues. Caracterização e tipologia dos assentamentos precários brasileiros: o caso do Rio de Janeiro. In: MORAIS, Maria da Piedade;

KRAUSE, Cleandro; LIMA NETO, Vicente Correia (ed.). Caracterização e tipologia de assentamentos precários: estudos de caso brasileiros. Brasília: Ipea, 2016. p. 411–464.

CUNHA, Egláisa Micheline Pontes; ERBA, Diego Alfonso (org.). Diretrizes para a criação, instituição e atualização do cadastro territorial multifinalitário nos municípios brasileiros: manual de apoio. Brasília: Ministério das Cidades, 2010. 170 p. ISBN 978-85-7958-018-5.

DAS, Amrutha; RAGHAVAN, Mohan. *A comparative assessment of open-source building footprint data for Indian heritage sites: towards a shape-preserving 3D mapping*. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, v. X-M-2-2025, p. 73-79, 2025. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-X-M-2-2025-73-2025>.

DIAKOGIANNIS, Foivos I.; WALDNER, François; CACCETTA, Peter; WU, Chen. ResUNet-a: a deep learning framework for semantic segmentation of remotely sensed data. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Amsterdam, v. 162, p. 94-114, 2020. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2020.01.013.

EDELSBRUNNER, H.; KIRKPATRICK, D. G.; SEIDEL, R. On the shape of a set of points in the plane. IEEE Transactions on Information Theory, New York, v. 29, n. 4, p. 551-559, 1983.

EKWUNIFE, Chidubem Azie; EGOLUM, Charles Chukwunwike; EMOH, Fidelis Ifeanyi. Issues in the adoption of Land Administration Domain Model in a developing country. Journal of Economics, Finance and Management Studies, Dubai, v. 7, n. 7, p. 3858-3866, jul. 2024. DOI: 10.47191/jefms/v7-i7-03.

ENEMARK, Stig; BELL, Keith Clifford; LEMMEN, Christiaan; MCLAREN, Robin. Fit-For-Purpose Land Administration. Copenhagen: International Federation of Surveyors (FIG), 2014. (FIG Publication, n. 60). Disponível em: <https://www.fig.net/pub/figpub/pub60/figpub60.pdf>. Acesso em: 01 out. 2025.

ENEMARK, Stig; MCLAREN, Robin; LEMMEN, Christiaan. Fit-for-Purpose Land Administration: Providing Secure Land Rights at Scale – Volume 1: Conceptual Innovations. Copenhagen: International Federation of Surveyors (FIG) / World Bank, 2016.

ERBA, Diego Alfonso. Da gestão e do financiamento do cadastro. In: CUNHA, Egláisa Micheline Pontes; ERBA, Diego Alfonso (org.). Diretrizes para a criação, instituição e atualização do cadastro territorial multifinalitário nos municípios brasileiros: manual de apoio. Brasília: Ministério das Cidades, 2010. cap. 4, p. 65-85.

FARIAS, Mirelly de Oliveira; CARNEIRO, Andrea Flávia Tenório. Proposta de implementação Fit-for-Purpose para países em desenvolvimento. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CADASTRO TÉCNICO MULTIFINALITÁRIO (COBRAC), 2018, Florianópolis. Anais [...]. Florianópolis: UFSC, 2018. p. 1-14.

FAZAN, V. Extração de contornos de edificações com snakes e programação dinâmica. 2014. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista (Unesp), Presidente Prudente, 2014.

FERNANDES, V. J. M. Extração de contornos de telhados de edifícios a partir da integração de imagem aérea e dados laser, utilizando campos aleatórios de Markov. 2016. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista (Unesp), Presidente Prudente, 2016.

FERREIRA, Flávia Renata. Propostas para a avaliação da acurácia altimétrica dos dados LiDAR. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

FERREIRA, Maria Paula; MARQUES, Eduardo Cesar Leão; FUSARO, Edgard Rodrigues. Assentamentos precários no Brasil: uma metodologia para estimação e análise. In: MORAIS, Maria da Piedade; KRAUSE, Cleandro; LIMA NETO, Vicente Correia (ed.). Caracterização e tipologia de assentamentos precários: estudos de caso brasileiros. Brasília: Ipea, 2016. p. 53-74.

GIBSON, Lesley; ADELEKE, Adedayo; HADDEN, Rory; RUSH, David. Spatial metrics from LiDAR roof mapping for fire spread risk assessment of informal settlements in Cape Town, South Africa. *Fire Safety Journal*, Amsterdam, v. 120, p. 103053, mar. 2021. DOI: 10.1016/j.firesaf.2020.103053.

GILLIES, S. Shapely Documentation. Release 2.1.1, 2025. Disponível em: <https://shapely.readthedocs.io/>. Acesso em: 03 out. 2025.

GOOGLE. *Open Buildings dataset*. Dataset geoespacial disponibilizado na plataforma Google Earth Engine. Disponível em: <https://sites.research.google/open-buildings/>. 02/08/2025

HARRIS, Charles R.; MILLMAN, K. Jarrod; VAN DER WALT, Stéfan J.; GOMMERS, Ralf; VIRTANEN, Pauli; COUNAPEAU, David; WIESER, Eric; TAYLOR, Julian; BERG, Sebastian; SMITH, Nathaniel J.; KERN, Robert; PICUS, Matti; HOYER, Stephan; VAN KERKWIJK, Marten H.; BRETT, Matthew; HALDANE, Allan; DEL RÍO, Jaime Fernández; WIEBE, Mark; PETERSON, Pearu; GÉRARD-MARCHANT, Pierre; SHEPPARD, Kevin; REDDY, Tyler; WECKESSER, Warren; ABBASI, Hameer; GOHLKE, Christoph; OLIPHANT, Travis E. Array programming with NumPy. *Nature*, London, v. 585, p. 357-362, set. 2020. DOI: 10.1038/s41586-020-2649-2.

HENRIQUE, V. B. Extração de edificações por deep learning com integração de LiDAR e imagens ópticas. 2024. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista (Unesp), Presidente Prudente, 2024.

HERLING, Tereza. Instrumentos de planejamento para a elaboração do Plano Municipal de Habitação de São Paulo: priorizando o investimento em assentamentos precários. In: MORAIS, Maria da Piedade; KRAUSE, Cleandro; LIMA NETO, Vicente Correia (ed.). Caracterização e tipologia de assentamentos precários: estudos de caso brasileiros. Brasília: Ipea, 2016. p. 149-168.

HUNTER, John D. Matplotlib: A 2D Graphics Environment. *Computing in Science & Engineering*, Washington, v. 9, n. 3, p. 90–95, 2007.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Censo Demográfico 2022: Favelas e Comunidades Urbanas. Rio de Janeiro: IBGE, 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Favelas e Comunidades Urbanas: sobre a mudança de Aglomerados Subnormais para Favelas e Comunidades Urbanas (Notas metodológicas n. 01). Rio de Janeiro: IBGE, 2024.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (IPEA). Dinâmica e distribuição de favelas e aglomerados subnormais no Brasil: 1980–2000. Brasília: Ipea, 2003.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (IPEA); PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO (PNUD); FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO (FJP). Atlas do Desenvolvimento Humano no Brasil. Brasília: Ipea; PNUD; FJP, 2003.

KANG, Chuanli; WANG, Fen; ZONG, Mingming; CHENG, Yao; LU, Tuanmeng. Research on improved region growing point cloud algorithm. In: ISPRS CONGRESS, 2020, Nice. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Gottingen: Copernicus Publications, 2020. v. XLIII-B2-2020, p. 153-160. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2020-153-2020.

KURWAKUMIRE, Edward; KUZHAZHA, Shelter; MUCHECHETERE, Paul. Informal cadastres as enabling tools for disaster risk management. *European Journal of Geography*, [S.l.], v. 12, n. 2, p. 52–73, out. 2021. DOI: 10.48088/ejg.e.kur.12.2.052.073. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/355239069>. Acesso em: 01 out. 2025.

LAM, Siu Kwan; PITROU, Antoine; SEIBERT, Stanley. Numba: A LLVM-based Python JIT Compiler. In: *Proceedings of the Second Workshop on the LLVM Compiler Infrastructure in HPC*. Austin: ACM, 2015.

LASPY. What is a LAS file? Documentation, version 2.5.0, 2025. Disponível em: <https://laspy.readthedocs.io/en/latest/>. Acesso em: 3 out. 2025.

LEMMEN, Christiaan; AUGUSTINUS, Clarissa; VAN OOSTEROM, Peter; VAN DER MOLEN, Paul. The Social Tenure Domain Model: design of a first draft model. [S.l.]: FIG / GLTN, 2007.

LIU, Yujia; OBUKHOV, Anton; WEGNER, Jan Dirk; SCHINDLER, Konrad. Point2Building: reconstructing buildings from airborne LiDAR point clouds. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 215, p. 351-368, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2024.07.012>.

LLANO, Lucia Mabel Ganchozo. Slum Mapping toward SDG 11 using urban morphology and topology. 2024. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Department of Aerospace and Geodesy, Technical University of Munich, Munique, 2024.

LI, Weijia; HE, Conghui; FANG, Jiarui; ZHENG, Juepeng; FU, Haohuan; YU, Le. *Semantic segmentation-based building footprint extraction using very high-resolution satellite images and multi-source GIS data*. *Remote Sensing*, v. 11, n. 4, p. 403, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs11040403>. Acesso em: 02 ago. 2025. LOCH, Carlos; ERBA, Diego Alfonso. Cadastro técnico multifinalitário: rural e urbano. Cambridge, MA: Lincoln Institute of Land Policy, 2007. 142 p. ISBN 85-906701-2-0.

LOUREIRO, Vânia Raquel Teles. “Quando a gente não tá no mapa”: a configuração como estratégia para a leitura socioespacial da favela. 2017. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

MARICATO, Ermínia. Erradicar o analfabetismo urbanístico. *Revista da FASE*, Rio de Janeiro, mar. 2002.

MORAIS, Maria da Piedade; KRAUSE, Cleandro; LIMA NETO, Vicente Correia (ed.). *Caracterização e tipologia de assentamentos precários: estudos de caso brasileiros*. Brasília: Ipea, 2016.

MORALES, Javier; LEMMEN, Christiaan; DE BY, Rolf; MOLENDIJK, M.; OOSTERBROEK, E. P.; ORTIZ DÁVILA, Álvaro Enrique. Designing all-inclusive land administration systems: a case study from Colombia. *Land Use Policy*, Amsterdam, v. 119, p. 105617, out. 2021. DOI: 10.1016/j.landusepol.2021.105617. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/353122396>. Acesso em: 01 out. 2025.

MOTTA, Eugênia. Resistência aos números: a favela como realidade (in)quantificável. *Mana*, Rio de Janeiro, v. 25, n. 1, p. 72–94, 2019.

NIROSHAN, Lasith; CARSWELL, James D. *Evaluating GeoAI-Generated Data for Maintaining VGI Maps*. *Land*, v. 14, art. 1978, 2025. DOI: 10.3390/land14101978.

NORONHA, Nayara Silva de. Contradições na organização do espaço habitacional de uma favela paulistana. *Revista de Administração Pública*, Rio de Janeiro, v. 52, n. 4, p. 647-666, jul./ago. 2018.

OCTAVIANO, Carolina. Muito além da tecnologia: os impactos da Revolução Verde. *ComCiência*, Campinas, n. 120, 2010.

OLIVEIRA, Francisco Henrique de. Do cadastro territorial multifinalitário. In: CUNHA, Egláisa Micheline Pontes; ERBA, Diego Alfonso (org.). *Diretrizes para a criação, instituição e atualização do cadastro territorial multifinalitário nos municípios brasileiros: manual de apoio*. Brasília: Ministério das Cidades, 2010. cap. 2, p. 31–48.

OLIVEIRA, Francisco Henrique de; CARNEIRO, Andrea Flávia Tenório; SILVA, Everton da. Parcelas e objetos territoriais. In: SILVA, Everton (org.). *Cadastro Territorial Multifinalitário aplicado à gestão municipal*. Florianópolis: UFSC, 2023.

OLIVEIRA, H. C.; SANTOS, R. C.; BARBOSA, L. A.; LIMA JUNIOR, O. F.; PINTO, J. A.; COSTA, D. C. Mapeamento de vielas em favelas baseado em dados de varredura a laser aerotransportado. In: CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO PARA O PLANEJAMENTO URBANO, REGIONAL, INTEGRADO E SUSTENTÁVEL (PLURIS), 10., 2024, Guimarães. *Anais [...]*. Guimarães: [s.n.], 2024.

PAIXÃO, Silvane K. S.; NICHOLS, Sue; CARNEIRO, Andrea Flávia Tenório. Cadastro territorial multifinalitário: dados e problemas de implementação do convencional ao 3D e 4D. *Boletim de Ciências Geodésicas*, Curitiba, v. 18, n. 1, p. 3–21, 2012.

PEDREGOSA, Fabian; VAROQUAUX, Gaël; GRAMFORT, Alexandre; MICHEL, Vincent; THIRION, Bertrand; GRISEL, Olivier; BRUCHER, Mathieu; PERROT, Matthieu; DUCHESNAY, Edouard. Scikit-learn: machine learning in Python. *Journal of Machine Learning Research*, Cambridge, MA, v. 12, p. 2825-2830, out. 2011.

PNUM 2022. In: ENCONTRO NACIONAL DA ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA EM PLANEJAMENTO URBANO E REGIONAL, 20., 2022, Belém. *Anais [...]*. Belém: ANPUR, 2023.

QUEIROZ FILHO, Alfredo Pereira de. As definições de assentamentos precários e favelas e suas implicações nos dados populacionais: abordagem da análise de conteúdo. *Revista Brasileira de Gestão Urbana*, Curitiba, v. 9, n. 2, p. 340-352, maio/ago. 2017. DOI: 10.1590/2175-3369.009.002.AO12.

RABBANI, T.; VAN DEN HEUVEL, F. A.; VOSSELMAN, George. Segmentation of point clouds using smoothness constraint. In: ISPRS COMMISSION V SYMPOSIUM 'IMAGE ENGINEERING AND VISION METROLOGY', 2006, Dresden. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Dresden: ISPRS, 2006. v. 36, part 5, p. 248-253.

RIBEIRO, S. C. L. O uso do LiDAR aerotransportado para obtenção de métricas de ocupação em assentamentos precários. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

RODRIGUES, Rute Imanishi; RIVERO, Patricia Silveira. Áreas de concentração das vítimas da violência no município do Rio de Janeiro (2002–2006). In: MORAIS, Maria da Piedade; KRAUSE, Cleandro; LIMA NETO, Vicente Correia (ed.). Caracterização e tipologia de assentamentos precários: estudos de caso brasileiros. Brasília: Ipea, 2016. p. 127–148.

ROLNIK, Raquel; KLINK, Jeroen. Crescimento econômico e desenvolvimento urbano: por que nossas cidades continuam tão precárias? *Novos Estudos CEBRAP*, São Paulo, n. 89, p. 89–109, mar. 2011.

RUSU, Radu Bogdan; COUSINS, Steve. 3D is here: Point Cloud Library (PCL). In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION (ICRA), 2011, Shanghai. Proceedings [...]. Shanghai: IEEE, 2011. p. 1–4. DOI: 10.1109/ICRA.2011.5980567.

SANTOS, Boaventura de Sousa. Para uma cartografia simbólica das representações sociais: prolegômenos a uma concepção pós-moderna do direito. *Revista Crítica de Ciências Sociais*, Coimbra, n. 24, p. 139-152, 1988.

SANTOS, Milton. A urbanização brasileira. São Paulo: Hucitec, 1993.

SANTOS, Renato César dos. Extração e regularização de contornos de telhados de edificações a partir de dados LiDAR usando o algoritmo alpha-shape e CD-Spline. 2019. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista (Unesp), Presidente Prudente, 2019.

SÁNCHEZ-APARICIO, Maria; DEL POZO, Susana; MARTIN-JIMENEZ, Jose Antonio; GONZALEZ-GONZALEZ, Enrique; ANDRES-ANAYA, Paula; LAGUELA, Susana. Influence of LiDAR point cloud density in the geometric characterization of rooftops for solar photovoltaic studies in cities. *Remote Sensing*, Basel, v. 12, n. 22, p. 3726, nov. 2020. DOI: 10.3390/rs12223726.

SÃO PAULO (Município). Atestado técnico do aerolevanteamento LiDAR – voo 2020. São Paulo: Prefeitura do Município de São Paulo, 2022. Disponível em: https://metadados.geosampa.prefeitura.sp.gov.br/geonetwork/intranet/api/records/892c862e-f564-4b1c-a3d0-9d28052e5d58/attachments/voo2020_ATESTADO-T%C3%89CNICO_PMSP.pdf. Acesso em: 2 ago. 2025.

SILVA, Hugo Fanton Ribeiro da. O “Caso Heliópolis” e a disputa pela política urbana no Brasil. *Revista de Administração Pública*, Rio de Janeiro, v. 52, n. 6, p. 1073-1089, nov./dez. 2018.

SILVA, Jailson de Souza (org.). O que é a favela, afinal? Rio de Janeiro: Observatório de Favelas do Rio de Janeiro, 2009.

SILVA, Everton da; ERBA, Diego Alfonso; SILVA, Liane Ramos da. Cadastro territorial multifinalitário: questões conceituais. In: SILVA, Everton (org.). Cadastro Territorial Multifinalitário aplicado à gestão municipal. Florianópolis: UFSC, 2023.

SILVA JÚNIOR, Aurélio Lúcio de Melo; CANDEIAS, Ana Lúcia Bezerra. As potencialidades da extração automatizada de objetos oriundos de perfilamento a laser aerotransportado aplicados na atualização cartográfica urbana. *Revista Geografia e Sistemas de Informação Geográfica*, [S.l.], v. 19, n. 9, 2025.

SIRKO, Wojciech et al. Continental-scale building detection from high resolution satellite imagery. *arXiv preprint*, 2021. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2107.12283>. Acesso em: 02/08/2025.

SITHOLE, George; VOSSELMAN, George. Experimental comparison of filter algorithms for bare-Earth extraction. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Amsterdam, v. 59, p. 85–101, 2004.

SOUZA, Rodrigo Carvalho Lopes de. A (des)articulação das políticas públicas na produção do espaço urbano: o caso de Heliópolis. 2023. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) — Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023.

SU, Z.; GAO, Z.; ZHOU, G.; LI, S.; SONG, L.; LU, X.; KANG, N. Building plane segmentation based on point clouds. *Remote Sensing*, Basel, v. 14, n. 1, p. 95, dez. 2021. DOI: 10.3390/rs14010095.

SUSAKI, J. Knowledge-based modeling of buildings in dense urban areas by combining airborne LiDAR data and aerial images. *Remote Sensing*, Basel, v. 5, n. 11, p. 5944–5968, 2013.

TEIXEIRA, Alison Nascimento; RIBEIRO, Mária Bruna Pereira. A urbanização brasileira: reflexões acerca da segregação socioespacial. In: ENCONTRO NACIONAL DE GEÓGRAFOS, 19., 2018, João Pessoa. Anais [...]. João Pessoa: AGB, 2018.

UNITED NATIONS. The Sustainable Development Goals Extended Report 2024. New York: United Nations, 2024.

UNITED NATIONS HUMAN SETTLEMENTS PROGRAMME (UN-HABITAT). Secure Land Rights for All. Nairobi: UN-Habitat, 2008.

VIRTANEN, Pauli; GOMMERS, Ralf; OLIPHANT, Travis E.; HABERLAND, Matt; REDDY, Tyler; COURNAPEAU, David; BUROVSKI, Evgeni; PETERSON, Pearu; WECKESSER, Warren; BRIGHT, Jonathan; VAN DER WALT, Stéfan J.; BRETT, Matthew; WILSON, Joshua; MILLMAN, K. Jarrod; MAYOROV, Nikolay; NELSON, Andrew R. J.; JONES, Eric; KERN, Robert; LARSON, Eric; CAREY, C J; POLAT, İlhan; FENG, Yu; MOORE, Eric W.; VANDERPLAS, Jake; LAXALDE, Denis; PERKTOLD, Josef; CIMRMAN, Robert; HENRIKSEN, Ian; QUINTERO, E. A.; HARRIS, Charles R.; ARCHIBALD, Anne M.; RIBEIRO, Antônio H.; PEDREGOSA, Fabian; VAN MULBREGT, Paul; et al. SciPy 1.0: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python. *Nature Methods*, London, v. 17, p. 261–272, 2020.

VOSSELMAN, George. Building reconstruction using planar faces in very high density height data. In: ISPRS CONGRESS, 19., 2000, Amsterdam. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Amsterdam: ISPRS, 2000. v. 33, part B3, p. 928–935. Disponível em: https://www.isprs.org/proceedings/XXXIII/congress/part3/928_XXXIII-part3.pdf. Acesso em: 2 nov. 2025.

WEHR, Aloysius; LOHR, Uwe. Airborne laser scanning: an introduction and overview. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Amsterdam, v. 54, p. 68–82, 1999.

XU, S.; VOSSELMAN, George; OUDE ELBERINK, S. Detection and classification of changes in buildings from airborne laser scanning data. In: ISPRS WORKSHOP LASER SCANNING 2013, 2013, Antalya. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Gottingen: Copernicus Publications, 2013. v. II-5/W2, p. 343–348. DOI: 10.5194/isprsannals-II-5-W2-343-2013.

YWATA, M. S. Y. Extração automática de contornos de telhados no espaço-objeto integrando estéreo par de imagens aéreas e modelos 3D de telhado. 2019. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista (Unesp), Presidente Prudente, 2019.

ZAMBENEDETTI, Lidiane; OLIVEIRA, Luciane Rosa de; SANTOS, Méroli Saccardo dos; LAZAROTTO, Elizabete Casagrande; MARZALL, Luciana Fighera. Revolução Verde: história e impactos no desenvolvimento agrícola. In: Agricultura e Agroindústria no contexto do desenvolvimento rural sustentável. Santa Maria: Instituto Federal Farroupilha (IFFar), 2021. cap. 25, p. 371-376. DOI: 10.37885/210705219.