SILVIO CESAR LIMA RIBEIRO

O uso do Lidar aerotransportado para obtenção de métricas de ocupação em assentamentos precários

2019

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA

SILVIO CESAR LIMA RIBEIRO

O uso do Lidar aerotransportado para obtenção de métricas de ocupação em assentamentos precários

Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutor em Ciências

Área de Concentração:

Engenharia de Transportes

Orientador:

Prof. Dr. JORGE PIMENTEL CINTRA

São Paulo

2019

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 06 de setembro de 2019

Assinatura do autor

Assinatura do orientador

Catalogação-na-publicação

Ribeiro, Silvio Cesar Lima

O uso do Lidar aerotransportado para obtenção de métricas de ocupação em assentamentos precários. S.C.L. Ribeiro – versão corr. São Paulo, 2019.

236p.

Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes.

1. Geoprocessamento 2. Ocupação informal 3. Lidar aerotransportado 4. Cartografia urbana 5. Área construída I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Transportes II.t.

Agradecimentos

Prof. Dr. Jorge Pimentel Cintra não apenas por uma orientação acadêmica perfeita, mas pelo apoio e confiança depositados ao longo de quase 30 anos de idas e vindas.

Prof. Dr. Hans-Gerd Maas da Technische Universität Dresden e Prof. Dra. Malgorzata Jarzabek-Rychard da Technische Universität Berlin, pelo suporte e disponibilidade ao longo do período de estágio.

Prof. Dra. Flávia da Fonseca Feitosa e Prof. Dr. Jorge Luiz Alves Trabanco, pelas valiosas sugestões no exame de qualificação.

Prof. Dra. Ana Clara Mourão Moura, Prof. Dr. Alex Abiko, Prof. Dr. Marcelo Nero e Prof. Dr. Diogenes Cortijo Costa, pelas valiosas sugestões na banca de defesa da tese.

Prof. Dra. Mariana Abrantes Giannotti, pela troca de ideias e valiosas sugestões.

Dr. Jefferson Rocco, da Prefeitura de Campinas pelos dados disponibilizados.

Luiz Roberto Arueira da Silva do Instituto Pereira Passos do Rio de Janeiro (IPP-RJ) pelos dados disponibilizados.

Luciana Pascarelli Santos, da Secretaria de Desenvolvimento Urbano do Município de São Paulo, pelo apoio pessoal e garantia do suporte institucional.

Alexandra Aguiar Pedro, da Secretaria de Habitação do Município de São Paulo, pelas brilhantes sugestões e apoio em todas etapas do trabalho.

Sandra Maria Lima Ribeiro, pelo suporte em todos os momentos.

Isabela Ramos Ribeiro, pelo apoio e amor incondicional.

Resumo

Esta tese avalia a aplicabilidade de dados provenientes de sensores Lidar aerotransportados (*airborne laser scanners* - ALS) para mapeamento de assentamentos urbanos precários. O aspecto geométrico da ocupação informal/precária/subnormal do solo urbano é analisado especialmente à luz das peculiaridades do caso: verticalidade, densidade construída, acesso viário às edificações e relevo. A pesquisa contribui com uma proposta metodológica inovadora de classificação de tipo-morfologias de ocupação dos assentamentos precários, com ênfase na sua verticalização das edificações. A qualidade dos resultados foi avaliada em termos de integridade e acurácia tomando como referência dados obtidos a escalas e precisão maior para controle de qualidade. Os resultados demonstraram o bom potencial dos dados Lidar em termos de precisão posicional, atingindo padrões de exatidão cartográfica altimétrica de produtos cartográficos digitais classe A, segundo os padrões do CONCAR-IBGE, e nível de qualidade em torno de 70% em termos de classificação das edificações segundo critério de sobreposição de áreas.

Palavras-chave: Geoprocessamento, ocupação informal, Lidar aerotransportado, cartografia urbana, área construída.

Abstract

This thesis evaluates the Airborne Laser Scanners (ALS) data applicability to informal settlements mapping. The urban occupation geometry is analysed by the specific aspects aiming to extract patterns related to informal/precarious/subnormal occupation: verticalization, built density, street access to buildings and relief. The research contributes with an innovative method proposal to classify typo-morphology of the precarious settlements, emphasizing their building verticalization. The quality of the results was evaluated by completeness and accuracy using reference data at higher scale and precision as control. The results show the good potential of the Lidar data considering the positional patterns by national standards and quality level about 70% considering building classification per-area criteria.

Keywords: Geoprocessing, informal settlements, Airborne Laser System – ALS, urban cartography, built area.

LISTA DE QUADROS

Quadro 1.1 - Estrutura do projeto de pesquisa 21
Quadro 2.1 - Características morfológicas e identificação em imagens. 29
Quadro 3.2 - Acurácia típica de diferentes fontes para geração de DEMs. 38
Quadro 3.3 - Indicadores para análise de assentamentos informais 44
Quadro 3.4 - Variáveis espaciais de áreas informais 47
Quadro 3.5 - Resumo do desempenho e quantitativo dos resultados 58
Quadro 6.6 - Estatística do vizinho mais próximo para a grade de 1 m das edificações 147
Quadro 6.7 - Comparação de índices/métricas entre os assentamentos 189

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 -Aglomerado subnormal com predomínio de construções de dois ou mais pavimentos sem espaçamento entre si no Rio de Janeiro (RJ) 32
Figura 2.2 - Aglomerado subnormal em área plana com predomínio de construções de um pavimento e vias que permitem a circulação de carros e caminhões de Macapá (AP) 33
Figura 2.3 - Beco em aglomerado subnormal de Cubatão (SP) 34
Figura 2.4 - Padrões de ocupação 36
Figura 3.5 - Padrão de ocupação de assentamento precário em área de proteção aos mananciais - São Paulo - SP. 41
Figura 3.6 - Cobertura do solo em áreas precárias da cidade de São Paulo. 42
Figura 3.7 - Verticalização dos assentamentos informais - São Paulo - SP. 43
Figura 3.8 - Índices métricos - Expansão urbana, periferização e bordas 47
Figura 3.9 - Métricas associadas aos assentamentos formais e informais 48
Figura 3.10 - Campinas -SP. Imagens originais (acima); Imagens binarizadas (centro); Dimensão Fractal (gráficos). 49
Figura 3.11 - Campinas -SP. Imagens de Alta resolução (acima); Imagens binarizadas (centro); Gráfico de lacunaridade (abaixo): Variação entre escalas de assentamentos formais e informais. 52
Figura 3.12 - Imagens resultantes da classificação dos pontos Lidar 54
Figura 3.13 - Solução de edição semi-automática para modelagem do sistema viário. 55
Figura 3.14 - Biblioteca de objetos para identificação. 56
Figura 3.15 - Dados originais (esquerda), edificações 3D reconstruídas (direita) e sobreposição de ambos (centro). 57
Figura 3.16 - Reconstrução automática (imagem à esquerda) de edificações aglomeradas 57
Figura 3.17 - (a) TIN original; (b) TIN simplificada; (c) Resultado após ajuste da TIN segmentada. 61
Figura 4.18. - Reflectância espectral de materiais a diferentes comprimentos de onda 66
Figura 4.19 - Mecanismos de varredura Laser: (a) disco poliédrico rotatório com único canal; (b) espelho oscilante com duplo canal; (c) disco poliédrico rotatório com duplo canal. 67
Figura 4.20 - Pulsos *fullwave* e resposta dos diferentes alvos a diferentes posições. 68
Figura 4.21 - Padrão zig-zag de recobrimento. 69
Figura 4.22 - Relação entre altura geoidal e altitude ortométrica 71
Figura 4.23 - Comparação de altimetria Lidar com centróide da edificação restituída 72
Figura 4.24 - Ondulação geoidal e transformação de altura geométrica para altitude ortométrica 73
Figura 4.25 - Impacto do Ângulo de Incidência na distribuição da potência do pulso. 74
Figura 4.26 - Diferença entre Retorno Discreto e Retorno Contínuo 75
Figura 4.27 - Reflexão múltipla dos pulsos Laser (múltiplos retornos). 75
Figura 4.28 - Resposta em único (a) e múltiplos (b) retornos 77
Figura 4.29 - Nuvem de pontos com atributo de retorno: amarelo (único retorno), azul (2º retorno), ciano (3º retorno) e vermelho (1º retorno) 78
Figura 4.30 - Aquisição e pós-processamento de dados de retorno contínuo. 80
Figura 4.31 - Imagens de intensidade do retorno 82
Figura 4.32 - Módulos do CityGML versão 1.0.0. 85

Figura 4.33 - Cinco Níveis de Detalhe (LODs - Levels-Of-Detail) definidos pelo padrão CityGML. 86
Figura 4.34 - Exemplos de densidade de varredura Lidar: (a) 20 ppm^2; (b) 10 ppm^2; (c) 1 ppm^2. 87
Figura 4.35 - Diferença entre delineamento de edificações para áreas com maior densidade, devido à sobreposição de faixas. 89
Figura 4.36 - Problemas de classificação automática 93
Figura 4.37 - Algoritmo de Axelsson 95
Figura 4.38 - Dois dos resultados de Axelsson: Perfil antes e depois da filtragem 95
Figura 4.39 - Verificação topológica e parâmetro K-vizinho mais próximo 99
Figura 4.40 - Edição manual com base na ortofotos do mesmo voo para revisão da classe vegetação decorrente da confusão com edificação pela 100
Figura 5.41 - Fluxograma geral da metodologia proposta planaridade 105
Figura 5.42 - Diagrama da metodologia com ênfase nas edificações 107
Figura 5.43 - Fluxograma do procedimento adotado 109
Figura 5.44 - Os tijolos são a referência para amostra da altura da edificação. 114
Figura 5.45 - Exemplo de LEPAC 119
Figura 5.46 - Dados de checagem provenientes da restituição de Campinas - SP. Em vermelho o limite da área de estudo com ocupação irregular não mapeada 120
Figura 5.47 - Ortofoto Rio de Janeiro 120
Figura 6.48 - Aglomerados de setores subnormais selecionados em Campinas - SP 123
Figura 6.49 - Aglomerados de setores subnormais selecionados no Rio de Janeiro - RJ 124
Figura 6.50 - Assentamentos precários selecionados em São Paulo - SP 127
Figura 6.51 - Mapas de favelas (amarelo) e loteamentos irregulares (rosa e laranja) segundo o cadastro da Secretaria Municipal de Habitação (disponível no Geosampa) 128
Figura 6.52 - Aglomerado subnormal “Buraco do Sapo”. Cada setor é identificado pelo “Número do Setor Censitário” (superior) e do “Aglomerado Subnormal” (inferior) 132
Figura 6.53 - Tipologia construtiva do aglomerado “Buraco do Sapo” 132
Figura 6.54 - Aglomerado (2010) sobre ortofoto (2014) 133
Figura 6.55 - Aglomerado subnormal “Buraco do Sapo”. Imagem colorida pelo número de retornos: amarelo (único retorno), azul (3º retorno), verde (2º retorno) e vermelho (1º retorno) 134
Figura 6.56 - Modelo Digital da Superfície Normalizado - MDSn. Mapa hipsométrico das alturas em relação ao solo 136
Figura 6.57 - Resultado da classificação (comando lasclassify) 137
Figura 6.58 - Declividade do terreno em pontos da grade (5 x 5 m) e na média por setor 138
Figura 6.59 - Sobreposição dos aglomerados ao mapa de declividade. Conjuntos de mais de quatro pontos da grade de valor maior que 30% contidos em aglomerados são considerados “risco” 139
Figura 6.60 - Resultado do delineamento das edificações com parâmetro de concavidade 1,5m 141
Figura 6.61 - Pontos de edificação classificados por altura (os números na legenda indicam a quantidade de pontos em cada intervalo de altura). Pontos de vegetação classificados erroneamente como edificação aparecem em laranja e vermelho (setas indicando a localização) 142
Figura 6.62 - Delineamento de edificações com altura calculada pela moda 143
Figura 6.63 - Aglomerados de edificações com número de pavimentos 144
Figura 6.64 - Número de pavimentos em grade de 1m 145
Figura 6.65 - Mapa da densidade construída - a partir dos centroides 148
Figura 6.66 - Mapa da densidade construída - a partir da grade 1m 149
Figura 6.67 - Vias de acesso 150
Figura 6.68 - Tipo-morfologia do aglomerado 151
Figura 6.69 - Aglomerado Subnormal “Parque Vila Isabel” (parcial - área sul). 153
Figura 6.70 - Aglomerado “Pq. Vila Isabel” (2010) sobre imagem Google (2016) 153
Figura 6.71 - Imagem intensidade com diferentes contrastes nas tonalidades 155
Figura 6.72 - Arquivo 2013 bruto. Imagem colorida pelo número de retornos 156
Figura 6.73 - MDSn: As cores representam alturas em relação ao solo 156
Figura 6.74 - Resultado da classificação 157
Figura 6.75 - Declividade na grade 5 x 5 m e média por setor 159

Figura 6.76 - Sobreposição das edificações ao mapa de declividade 159
Figura 6.77 - Resultado do delineamento das edificações com parâmetro de concavidade 1m (concavity) 160
Figura 6.78 - Pontos de edificação categorizados por altura 161
Figura 6.79 - Centroide da edificação hipotética com altura calculada a partir dos pontos Lidar 162
Figura 6.80 - Número de pavimentos 163
Figura 6.81 - Mapa de densidade construída 165
Figura 6.82 - Vias de acesso, polígonos e centroides de edificação 166
Figura 6.83 - Tipo-morfologia nas seis áreas 168
Figura 6.84 - Setores censitários e LEPACs das seis áreas de São Paulo 172
Figura 6.85 - Imagem colorida pelo número de retornos 174
Figura 6.86 - Modelo Digital da Superfície Normalizado - MDSn. 176
Figura 6.87 - Resultado da classificação 178
Figura 6.88 - Segmentos obtidos nas seis áreas de estudo de São Paulo 179
Figura 6.89 - Declividade do terreno em pontos da grade (5 x 5 m) e na média por setor 180
Figura 6.90 - Sobreposição das edificações ao mapa de declividade 181
Figura 6.91 - Comparação dos resultados com LEPACs 182
Figura 6.92 - Mapas de densidade construída 185
Figura 6.93 - Vias de acesso e edificações 187
Figura 6.94 - Distribuição dos pontos de controle 192
Figura 6.95 - Localização dos pontos de controle e respectivas ondulações do geoide 196
Figura 6.96 - Sobreposição das edificações delineada à ortofotos - Rio de Janeiro - RJ 197
Figura 6.97 - Avaliação da qualidade por área em edificação única (relação referência: resultado = 1:1) 198
Figura 6.98 - Avaliação da qualidade por área em edificações aglomeradas 200
Figura 6.99 - Diferenças entre altitudes da restituição e de aglomerados - Campinas - SP 201

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Codificação LAS 83
Tabela 4.2 - Relação densidade e espaçamento 88
Tabela 6.3 - Características geométricas das áreas e pontos 129
Tabela 6.4. Características dos dados de referência para edificações dos assentamentos - LEPACs 129
Tabela 6.5 - Estatística dos atributos de vias de acesso 151
Tabela 6.6 - Estatísticas de Vizinhança (Vizinho Mais Próximo) dos centroides de edificações por setor e para o total do aglomerado. 164
Tabela 6.7 - Estatística dos atributos de vias de acesso 167
Tabela 6.8 - Parâmetros para segmentação 179
Tabela 6.9 - Resultado da área construída em 2017 184
Tabela 6.10 - CA e crescimento da área construída 184
Tabela 6.11 - Estatísticas de Vizinhança (Vizinho Mais Próximo) dos centroides de edificações por área de estudo 185
Tabela 6.12 - Estatística dos atributos de vias de acesso 188
Tabela 6.13 - Listagem das coordenadas e erros altimétricos nos pontos de controle próximos às áreas de estudo - São Paulo - SP 191
Tabela 6.14 - Verificação da densidade pontos 194
Tabela 6.15 - Coordenadas e erros altimétricos nos pontos de controle no entorno do assentamento “Buraco do Sapo” - Campinas - SP 195
Tabela 6.16 - Integridade, acurácia e qualidade nas áreas de São Paulo- SP 199
Tabela 6.17 - Integridade, acurácia e qualidade na área de Campinas - SP 199
Tabela 6.18 - Resultado estatístico das diferenças entre altitudes da restituição e de aglomerados - Campinas - SP 201

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 4.1 - Relação densidade e espaçamento 88

Sumário

I APRESENTAÇÃO	12
1. Introdução	12
1.1. Contexto	12
1.2. Objetivos	17
1.3. Justificativa	18
1.4. Síntese do trabalho	21
II REVISÃO DA LITERATURA	24
2. Morfologia Urbana	25
2.1. Conceitos e aplicações	26
2.2. Morfologia de assentamentos precários	31
2.2.1. Topografia e declividade	34
2.2.2. Circulação e acesso	35
2.2.3. Espaçamento e densidade	36
3. Sensoriamento Remoto em Áreas Urbanas	39
3.1. Detecção e mapeamento de assentamentos precários - favelas	41
3.1.1. Lacunaridade	50
3.2. Identificação e dimensionamento de edificações	55
3.3. Densidade urbana	63
4. Sistema Lidar aerotransportado: Princípios e aplicações	67
4.1. Princípio de funcionamento	67
4.2. Componentes do sistema Lidar	71
4.2.1. Laser scanner	71
4.2.2. GNSS e navegação inercial	71
4.3. Característica dos dados Lidar	76
4.3.1. Retorno discreto	77
4.3.2. Retorno contínuo	81
4.3.3. Intensidade do retorno	83
4.3.4. Formato e resolução	85
4.4. Processamento de Dados	92
4.4.1. Filtragem	94
4.4.2. Segmentação	100
4.4.3. Delineamento	101
4.4.4. Edição	102
4.4.5. Controle de qualidade	104
III METODOLOGIA E ESTUDOS DE CASO	107
5. Metodologia	107
5.1. Pré-processamento	113
5.2. Classificação	114

5.3. Segmentação 114
5.4. Delineamento 115
5.5. Cálculo da altura 116
5.6. Cálculo da declividade do terreno 118
5.7. Traçado do sistema viário 120
5.8. Cálculo de índices (métricas) 120
5.9. Geração da base de dados geográficos 121
5.10. Controle de qualidade 121
6. Estudos de Caso 126
6.1. Áreas de Estudo 126
6.2. Características de análise 134
6.3. Resultados: Campinas - SP 136
6.3.1. Classificação 138
6.3.2. Topografia - Declividade do terreno 142
6.3.3. Verticalização - Altura das edificações 144
6.3.4. Espaçamento - Área construída 150
6.3.5. Circulação e acesso 154
6.4. Resultados: Rio de Janeiro - RJ 155
6.4.1. Classificação 158
6.4.2. Topografia - Declividade do terreno 162
6.4.3. Verticalização - Altura das edificações 164
6.4.4. Espaçamento - Área construída 168
6.4.5. Circulação e acesso 170
6.5. Resultados: São Paulo - SP 171
6.5.1. Classificação 178
6.5.2. Segmentação das edificações 182
6.5.3. Topografia - Declividade do terreno 184
6.5.4. Verticalização - Altura das edificações e crescimento da área construída 185
6.5.5. Espaçamento - Área construída 188
6.5.6. Circulação e acesso 191
6.6. Comparação de áreas amostrais 192
6.7. Avaliação da qualidade 195
6.7.1. Precisão posicional 195
6.7.2. Nível de detalhe da edificação 202
6.7.3. Nível de detalhe da quadra / aglomerado 203
7. Discussão 206
7.1. Respostas às questões da pesquisa 208
8. Conclusão 212
9. Referências 215
ANEXO I - Sintaxe de comandos *lastools* 235

I APRESENTAÇÃO

Capítulo 1. Introdução

1.1. O contexto da pesquisa

O foco do presente trabalho é a análise de imagens derivadas do Lidar, especialmente em amostras das cidades de São Paulo, Campinas e Rio de Janeiro, na busca pela tipo-morfologia dos assentamentos precários, sejam aqueles definidos pelo IBGE (2010) por ocasião do censo demográfico, ou definidos pelo município em seus programas habitacionais ou zoneamento. Ou seja, a aplicação da tecnologia na solução de um problema real.

Há uma crescente disponibilidade de tecnologias para aquisição de dados geográficos em campo, aeronave ou satélite, bem como para seu processamento. No sensoriamento remoto a integração de diversas fontes e sensores é tão necessária quanto o desenvolvimento específico de uma delas, pois não há uma "tecnologia salvadora" que supere todas as iniciativas existentes. É sempre produtivo adotar soluções baseadas em uma análise de problemas (*problem driven*).

A crescente concentração populacional evidencia a demanda por habitação, o que cria desafios sociais, econômicos e ambientais. A situação brasileira neste cenário é crítica. O censo IBGE (2010) já estimava em 11.425.644 habitantes a população residente em aglomerados subnormais[1], representando 6% do total do país na época de 190.732.694 pessoas.

O presente trabalho procura analisar o uso de dados da tecnologia Lidar, através de proposta de seu *processamento*, visando resultados úteis para o planejamento e desenvolvimento urbano. Assim, o potencial de aplicação dos dados Lidar é avaliado para o mapeamento de regiões urbanas homogêneas, com maior atenção para os assentamentos

[1] Aglomerado subnormal é um conjunto constituído de, no mínimo, 51 unidades habitacionais (barracos, casas, etc.) carentes, em sua maioria de serviços públicos essenciais, ocupando ou tendo ocupado, até período recente, terreno de propriedade alheia (pública ou particular) e estando dispostas, em geral, de forma desordenada e/ou densa. Os aglomerados subnormais podem se enquadrar, observados os critérios de padrões de urbanização e/ou de precariedade de serviços públicos essenciais, nas seguintes categorias: invasão, loteamento irregular ou clandestino, áreas invadidas, loteamentos irregulares e clandestinos regularizados em período recente. (IBGE, 2010b)

precários e suas peculiaridades tipo-morfológicas caracterizadas por ocasião do Levantamento de Informações Territoriais - LIT[2] realizado pelo IBGE.

Há uma lacuna entre o potencial da geotecnologia e seu uso efetivo, sobretudo na gestão pública. Por outro lado, é necessário o conhecimento específico da tecnologia por parte do usuário urbanista, uma vez que soluções certamente emergirão com base em dados provenientes de sensores de alta resolução.

Os aspectos geométricos e os padrões da ocupação do solo urbano são as características buscadas no processamento dos dados Lidar, sob peculiaridades do relevo, do sistema viário, da vegetação, e especialmente da verticalidade das edificações (altura das edificações acima do solo circundante).

A escala ou região intraurbana, entendida como aquela de conteúdo cadastral essencial para o planejamento e gestão municipal do território, também é fundamental na gestão pública e estudos demográficos, associados aos dados censitários. Villaça (2001) adota o termo “espaço intraurbano” para designar os elementos do arranjo interno do território, e se mostra adequado para analisar a configuração tipológica e morfologicamente homogênea de setores censitários e seus aglomerados considerados subnormais.

Há demanda pelo mapeamento em escalas grandes (1:1.000 a 1:5.000) não só pelos municípios, mas nos níveis metropolitano, estadual e federal, revelando a necessidade de parceria entre as diferentes esferas de governo em nosso país. A generalização dos dados territoriais a partir de levantamentos locais torna-se cada vez mais viável em vista da padronização de intercâmbio e compartilhamento de dados, evitando assim fontes redundantes e contraditórias. Um exemplo concreto que nos afeta, é a conexão via *Web Services* entre Infraestruturas de Dados Espaciais - IDEs federais,

[2] O LIT foi uma pesquisa de campo executado pelas equipes responsáveis pela base territorial do Censo Demográfico 2010 em cerca de 30.000 setores censitários classificados nos Censos de 2000 e 2007como aglomerados subnormais, com similaridade socioeconômica àqueles do Censo de 2000, cujas áreas foram indicadas através de imagens de satélite similares a aglomerados subnormais constantes em planos diretores, ou ainda outras áreas indicadas pelas equipes do IBGE nos estados. (IBGE, 2010b)

metropolitanas e municipais, respectivamente gerenciadas pelo IBGE (https://portaldemapas.ibge.gov.br/portal.php#homepage), secretaria estadual do meio ambiente (DataGeo - http://datageo.ambiente.sp.gov.br/app/?ctx=DATAGEO) e o município de São Paulo (Geosampa - http://geosampa.prefeitura.sp.gov.br/PaginasPublicas/_SBC.aspx). Na prática isso significa que há tecnologia disponível para compartilhamento em tempo real de dados geográficos via internet, evitando o recorrente problema da duplicação de recursos e levantamentos para produção de dados espaciais.

É desejável que as ações de gestão sobre o espaço ocupado pelo homem sejam baseadas em diagnósticos precisos e completos. O espaço urbano, foco das ações sobre as maiores concentrações humanas, carece de formas de representação adequadas a planos e projetos. A representação 2D do espaço urbano, ainda que represente 100% dos casos de mapeamento voltado à gestão urbana no Brasil, subutiliza diversas possibilidades que as geotecnologias oferecem em termos de análise e diagnóstico. Através do mapeamento 3D do espaço edificado das cidades, uma visão qualificada e precisa da realidade torna-se viável e adequada aos problemas na sua gestão (van Oosterom et al, 2018). A experiência recente de revisão da lei de zoneamento na cidade de São Paulo (São Paulo, 2016), por exemplo, revelou a necessidade de combinar tecnologias em determinadas regiões, de tal forma que um cadastro 3D possibilitasse a definição de comércio em pavimentos térreos e mezaninos, e residências em pavimentos superiores, ou seja, o uso e ocupação do solo definido com maior precisão e consequente melhoria da gestão fiscal.

A Lei de Regularização Fundiária, n. 13.456 de 2017, trata de aspectos correlatos a moradia adequada como medida ambiental e social. Com isso, busca a efetiva regularização dos núcleos urbanos informais.

O desafio da legislação e das políticas de gestão territorial assimilarem informações 3D em sua prática ainda é grande; entretanto já se mostram factíveis o armazenamento, a representação e a mensuração do espaço urbano com as geotecnologias (Erba, 2012; Carneiro et al, 2012; Silva et al, 2016). Nesse contexto os dados Lidar podem ser considerados como um complemento importante na fase da coleta de dados 3D, sobretudo se forem

classificadas as feições edificadas. Na prática, as prefeituras especificam esse tipo de levantamento nos editais de mapeamento das cidades, ainda que não se tenha uma ideia precisa dos múltiplos usos que podem ter.

Especialmente nas grandes cidades brasileiras, o mapeamento dos assentamentos precários passou a ser essencial para a gestão pública municipal e ao mesmo tempo para estudos demográficos e socioeconômicos regionais e nacionais. As demandas de mapeamento são evidentes nas áreas de habitação e desenvolvimento urbano, especificamente na aplicação de políticas públicas aos assentamentos com projetos de urbanização e outras intervenções.

O planejamento do censo demográfico de 10 em 10 anos, conta com a cooperação dos municípios, sobretudo aqueles das regiões metropolitanas, e tem sido realizado e beneficiado pelas geotecnologias. No censo 2010 já foi possível o mapeamento de alguns aglomerados subnormais existentes e não detectados em anos anteriores, tendo em conta o uso de imagens de alta resolução (IBGE, 2010b).

Os critérios adotados pelo IBGE para o Levantamento das Informações Territoriais (IBGE, 2010b) são utilizados neste trabalho. A caracterização dos assentamentos foi efetuada pelas equipes de campo desse órgão, que registraram entre outras características, quatro variáveis fundamentais: verticalidade, declividade, densidade e circulação/acesso.

A possibilidade da caracterização da tipo-morfologia urbana[3] a partir de dados Lidar aerotransportados é uma hipótese pesquisada e comprovada, dentro de certas condições, no presente trabalho. A população ocupa o espaço urbano predominantemente em edifícios. Seja qual for a finalidade desses espaços e a dinâmica de sua ocupação, existe a

[3] Tipo-morfologia aqui está diretamente relacionada à forma geométrica dos elementos estruturantes do território urbano, sobretudo edificações, lotes, quadras, vias, vegetação e bairros. A tipologia como método de categorização comum aos estudos sistemáticos, caracteriza-se pelo estudo de tipos elementares que podem constituir uma regra; pode referir-se ao estudo da composição dos edifícios (como na disposição das unidades de habitação e circulação) ou ainda nas regras inerentes à composição urbanística (orientação dos edifícios, quarteirões clássicos, bairros verdes, etc). O termo é utilizado em Space, Density and Urban Form (Pont & Haupt, 2009)

necessidade permanente do diagnóstico da ocupação do espaço ocupado para inferência da situação dos moradores em um dado momento.

A morfologia urbana foi caracterizada em imagens de alta resolução com análise baseada em objetos com vista aos padrões informais de ocupação (Gonçalves et al., 2006; Nobrega, 2007; Brito, 2010), e ainda que não utilizando Lidar, esses trabalhos mencionam o potencial da sua contribuição nas diversas aplicações urbanas analisadas.

A estimativa do número de pavimentos das edificações foi obtida por Lidar em Tsukuba City – Japão (Lwin & Murayama, 2009; Xu et al., 2014) e a partir disso a Taxa de Ocupação e o Coeficiente de Aproveitamento[4] puderam ser calculados considerando a base cadastral de lotes (Yu et al., 2010; González-Aguilera et al., 2013).

Biljecki et al. (2016) estimaram a população para diferentes níveis de detalhe (LoD)[5] para toda a Holanda baseados no volume construído, além de atributos cadastrais, e dentre suas conclusões há uma evidente contribuição da tecnologia Lidar.

Países inteiros têm sido mapeados com sensores Lidar, sendo que no Brasil há iniciativas, sobretudo por parte dos governos municipais, constatando-se a existência de especificações distintas para aplicações cadastrais semelhantes, o que aponta para a necessidade de estudos e recomendações.

Há programas de integração das Agências de Mapeamento Européias com apoio da organização EuroSDR 3D SIG (*European Spatial Data Research 3D Special Interest Group*) que realiza projetos em doze países,

---

[4] A *taxa de ocupação* (TO) é a porcentagem do terreno que pode ser ocupado pela projeção da edificação e o *coeficiente de aproveitamento* (CA) é a relação entre a área total construída e a área do terreno.

[5] Level of Detail (LoD) no padrão *CityGML,* refere-se aos diferentes conteúdos das bases de dados conforme a escala de análise; o *CityGML* é adotado pelo *Open Geospatial Consortium* (OGC) (Kolbe, 2009). GML - *Geography Markup Language* - é o formato aberto de intercâmbio de dados geográficos proposto pelo OGC.

como por exemplo, na Holanda num mapeamento com densidade[6] de 10 ppm^2 (Bilijecki, 2016), na Polônia com 4 a 12 ppm^2 e na Espanha com 0,5 ppm^2 (IGN, 2015). Foram colhidas experiências valiosas desses projetos, que serão apresentadas no sentido de responder a algumas questões:

> "Quais aplicações terão valor agregado com o 3D? Quais são os dados 3D necessários para essas aplicações? Qual a recomendação de densidade de pontos? Quais custos e benefícios para coletar e manter esses dados no nível nacional?" (baseado em Stoter et al., 2016)

A diversidade de experiências ao redor do mundo, certamente contribui para o amadurecimento no uso dessa tecnologia no Brasil, onde a academia cumpre um papel importante neste momento de múltiplas ofertas, ainda que haja pouca demanda efetiva por parte dos usuários urbanistas, talvez por falta de resultados que comprovem os benefícios efetivos de sua utilização.

1.2. Objetivos

O trabalho tem como objetivo geral analisar o potencial da tecnologia Lidar, principalmente para análise das edificações ainda não dimensionadas em função de sua informalidade, sobretudo os componentes geométricos 3D relacionados ao volume e área construída pelo uso residencial, para que sirvam de referência para classes/categorias de ocupação, bem como de indicadores das condições de habitação em assentamentos precários. Assim, as unidades de observação do presente trabalho são os assentamentos precários, sejam derivados da análise territorial do IBGE, em função do censo, sejam derivados das políticas habitacionais municipais.

As questões que norteiam a presente pesquisa e definem seus objetivos específicos são: Quais as potencialidades e limitações da tecnologia Lidar para caracterização da tipo-morfologia urbana? As características territoriais dos assentamentos precários são detectáveis através dos dados

[6] A resolução do levantamento Lidar é dada pela densidade de pontos por metro quadrado, abreviada aqui por "ppm^2", e depende principalmente da frequência de pulsos do sensor, da altura e velocidade de voo.

Lidar? Qual o número de pavimentos das edificações e qual a densidade construída? Qual a dificuldade de acesso às edificações em função das vias e do terreno? Há índices/métricas de ocupação territorial (declividade, densidade construída e circulação/acesso) comparáveis e passíveis de serem obtidos a partir de pontos Lidar? Qual o nível de qualidade dos resultados?

A hipótese decorrente dessas questões, apresentada e respondida neste trabalho é que os dados Lidar fornecem produtos suficientes para: (a) Definir padrões de ocupação e estimar a área construída em ambiente intraurbano, especialmente assentamentos precários; (b) Produzir estimativas de área construída através de feições simples (polígonos / pontos 3D / 2,5D) sendo o atributo sua altura em relação ao solo; (c) Comparar a ocupação de diferentes assentamentos.

Em síntese, a principal questão de pesquisa é:

Dados Lidar fornecem informação suficiente em assentamentos precários para mapear edificações e gerar índices e métricas comparáveis além de produtos cartográficos de apoio a análise e diagnóstico de projetos de intervenção?

A tese foi comprovada através de casos de aplicação de uma metodologia voltada a responder essa questão, de tal forma que os resultados da avaliação de qualidade comprovaram a validade da proposta.

1.3. Justificativa

A verticalização, devidamente mensurada e categorizada segundo as tipologias de uso, é um indicador direto e relevante da área construída, e indireto da população residente.

A aquisição de dados tridimensionais da ocupação urbana através de sensores Lidar é uma realidade a ser explorada nesse contexto. As características de precisão geométrica, categorização de objetos a partir da intensidade do sinal, reconhecimento de padrões geométricos na nuvem de pontos, são alguns dos benefícios diretos que justificam o seu uso no mapeamento urbano.

Este trabalho apresenta critérios de validação da qualidade do produto cartográfico para a finalidade específica, sem a pretensão de gerar uma base multifinalitária tradicional, como cartas em escalas cadastrais 1:1.000, por exemplo. Ainda que as principais referências consideradas na aferição dos resultados sejam produtos cartográficos de escala 1:500, a análise da acurácia geométrica é tratada com menor ênfase, situando-a no seu contexto.

Muitos dos aerolevantamentos realizados no Brasil já contam com produtos Lidar, o que entretanto não representa seu uso intensivo por parte dos contratantes, sobretudo as prefeituras e órgãos de planejamento urbano e regional. Muitas cidades brasileiras como Rio de Janeiro (6.320.446 habitantes), Salvador (2.675.656 habitantes), Belo Horizonte (2.375.151 habitantes) e Campinas (1.091.946 habitantes) contrataram mapeamento Lidar[7]; entretanto não há relatos da efetiva aplicação dos seus produtos na aplicação estudada, muito provavelmente por desconhecimento do potencial e ainda da falta de metodologia e disseminação de ferramentas para o seu processamento.

A carência desse tipo de dado territorial especialmente sobre os assentamentos precários ocasiona problemas na gestão pública, sobretudo em países onde a desigualdade socioeconômica é norteadora das intervenções urbanas:

1. Assentamentos precários, principalmente as favelas, não fazem parte do cadastro fiscal urbano. No mapeamento da cidade de São Paulo por exemplo, realizado entre 2004 e 2007, algumas das áreas consideradas “favelizadas” figuram como vazios no mapa, ou permanecem com a situação cadastral formal no mapa, mesmo não correspondendo com a realidade.

[7] https://www.defesa.gov.br/aerolevantamento/perguntas-frequentes-cartografia-e-aerolevantamento/114-aerolevantamento

2. O planejamento de levantamentos populacionais[8], como censos, demanda uma estimativa do número de domicílios, principalmente em aglomerados subnormais.

3. A ausência de mapeamento representa uma lacuna para a elaboração de políticas públicas e consequentemente prejuízo aos cidadãos, principalmente os grupos sociais menos favorecidos socioeconomicamente.

4. “Informações mais precisas sobre cada um dos setores subnormais são insumos para a atuação do poder público no sentido de fazer frente às suas demandas mais prementes”, inclusive com sua categorização adequada em favelas, núcleos habitacionais e loteamentos irregulares (IBGE b, 2010).

Com base nas referências mencionadas na revisão da literatura apresentada no próximo capítulo, pelo processamento dos pontos Lidar pode-se:

1. Classificar automaticamente os pontos 3D, no mínimo, nas categorias edificação, vias, vegetação e solo.

2. Delinear pontos de edificações segundo dois principais níveis de detalhe/escalas (*LoD*) com atributos de altura/verticalização: (a) edificações/unidades habitacionais e (b) quadras/aglomerados.

Dessa forma, o conhecimento pode ser aplicado na redução do tempo e do custo do mapeamento, e oferecer bases de dados voltadas para aplicações específicas, em níveis adequados de simplificação geométrica.

As principais contribuições deste trabalho são:

- Mostrar a viabilidade dessa aplicação específica para dados Lidar;

- Desenvolver uma metodologia para produção de cartografia de assentamentos precários;

- Produzir uma estimativa da área construída das edificações em assentamentos precários;

[8] O planejamento da base territorial consiste em processos de análise dos mapas e cadastros alfanuméricos que registram todo o histórico das malhas setoriais dos Censos Demográficos anteriores e dimensionam os setores a adotar. (IBGE b, 2010)

- Produzir índices/métricas comparáveis de assentamentos precários com base em dados Lidar.

São apontados como riscos na aplicação genérica desta metodologia em áreas similares:

- a indisponibilidade dos dados;

- a limitação de processamento computacional;

- a indisponibilidade de dados precisos para controle de qualidade.

1.4. Síntese do trabalho

O quadro a seguir sintetiza a estrutura do trabalho:

Quadro 1.1 - Estrutura do projeto de pesquisa

Objetivos	Questões	Métodos	Recursos
Explorar o Lidar aéreo	Quais potenciais e limitações da tecnologia?	Revisão da literatura. Avaliação de resultados e metodologia através de sua aplicação a dados disponíveis.	Referências: artigos, livros, eventos, profissionais e pesquisadores Dados Lidar Software Lidar
Segregar / Agrupar feições com padrões de ocupação semelhantes	Quais características territoriais de assentamentos precários são detectáveis através dos dados Lidar?	Seleção de áreas de estudo sob critérios específicos. Caracterização das áreas com base em dados cartográficos, demográficos e socioeconômicos	Dados Lidar Dados censitários Mapas, Imagens multiespectrais e ortofotos Software SIG
Analisar / Diagnosticar a distribuição espacial da ocupação urbana, através de: declividade, circulação/acesso, densidade e verticalidade	Qual o número de pavimentos e a área construída? Qual a dificuldade de acesso em função das vias e do terreno?	Comparar parâmetros para diferentes morfologias em assentamentos precários	Dados Lidar Base Cartográfica Digital Software Lidar e SIG
Produzir representação geométrica simplificada de relevo, viário e edificações	Qual a geometria mínima para estimar declividade, densidade construída e circulação/acesso?	Poligonalizar e simplificar pontos Lidar com base na classificação	Dados Lidar Software Lidar e SIG
Checar a qualidade dos resultados	Qual nível de qualidade dos resultados?	Seleção de feições de controle Análise visual	Polígonos de edificações restituídas, Ortofotos, StreetView

Os materiais e métodos experimentais são apresentados para oito áreas de estudo: um aglomerado de Campinas - SP e outro do Rio de Janeiro - RJ e seis assentamentos no município de São Paulo - SP.

Os procedimentos metodológicos, são baseados no software LasTools (Isenburg, 2016), e nos recursos de análise geográfica em GIS, principalmente no software livre Qgis, visando obter a tipo-morfologia de assentamentos precários segundo indicadores/métricas da topografia, da densidade construída habitacional/residencial (altura e espaçamento das edificações residenciais) e da circulação/acesso viário.

Esses procedimentos são detalhados em capítulo específico e podem ser resumidos nas etapas de: a) separação das edificações do solo; b) delineamento dessas feições; c) associação aos polígonos das edificações o

atributo de altura, c) associação ao sistema viário do atributo de largura e d) ao terreno associação da declividade. De posse desses atributos, que são considerados índices/métricas, os setores são categorizados segundo os critérios do LIT-IBGE.

O controle de qualidade do produto cartográfico, é realizado quanto ao aspecto posicional levando em conta pontos de controle, e quanto ao aspecto da classificação, de tal forma que polígonos das edificações com suas alturas em relação ao solo, são comparados aos polígonos previamente restituídos por métodos convencionais em escalas cadastrais (1:500, 1:1.000 e 1:2.000), considerados como padrão.

II REVISÃO DA LITERATURA

A revisão de literatura foi dividida em três capítulos.

No capítulo 2 são apresentados conceitos e aplicações da morfologia urbana, buscando associá-la às características dos assentamentos precários definidos e delimitados pelo IBGE como setores censitários especiais de aglomerados subnormais.

O capítulo 3 é uma revisão do sensoriamento remoto para áreas urbanas enfatizando as referências voltadas para mapeamento de assentamentos precários como aplicação e não tanto para a tecnologia.

Os conceitos envolvidos no uso de sensores Laser/Lidar são apresentados e as principais metodologias de processamento dos dados exemplificadas visando a extração de edificações da nuvem de pontos adquirida em plataformas aéreas, no capítulo 4.

Ao longo do texto os termos “informal”, “subnormal” e “precário” são utilizados em diferentes circunstâncias, e por isso explicados a seguir nesta introdução à revisão bibliográfica.

Os termos formal e informal têm sido adotados para diferenciar a ocupação do território segundo a legislação, o que, entretanto, não significa um consenso quanto a sua adequação, mas são adotados aqui para fins de classificação genérica dos padrões geométricos de ocupação. É importante, inclusive, não vincular a informalidade à pobreza, uma vez que há inúmeros casos de condomínios fechados de alto padrão que não possuem regularização, ou formalização jurídica[9]. Por outro lado, na literatura internacional está consolidado o termo “*informal settlement*”, inclusive com vários trabalhos tratando de metodologias de comparação numérica entre ocupações *formais* e *informais*, como forma de análise da precariedade. Exceto quando mencionados explicitamente, o termo considerado adequado aqui é o “assentamento precário”, que por ser genérico, engloba variações tanto no aspecto jurídico, quanto no aspecto tipo-morfológico. Já o termo “subnormal” tem caráter específico quando trata dos setores censitários classificados pelo

[9]. http://www.oei.es/historico/divulgacioncientifica/reportajes_106.htm Acesso em 25/09/2016

IBGE e que definem critérios de pesquisa pré-censo, mas também definem características tipo-morfológicas passíveis de quantificação.

Além disso os termos “aglomerado” e “assentamento” também são passíveis de confusão e merecem esclarecimento para leitura do texto. Novamente por conta do uso pelo IBGE, o “aglomerado subnormal” define um conjunto de setores subnormais que devem ser analisados em conjunto, e portanto são um assentamento de características peculiares já mencionadas. Assim um “assentamento” é uma definição genérica da ocupação territorial que deve ser descrita por características particulares como urbano, rural, formal, informal, etc. O termo “aglomerado” tem também seu uso específico neste trabalho quando trata da disposição geométrica das edificações, de tal forma que o espaçamento entre elas é mínimo ou inexistente e se torna imperceptível nas imagens aéreas.

Capítulo 2. Morfologia Urbana

Os conceitos da tipo-morfologia são apresentados aqui como embasamento para a análise das edificações e da ocupação do solo, que conforme se verá adiante, caracterizam padrões identificáveis para diferentes escalas ou níveis de detalhe do ambiente urbano.

Segundo Pereira (2012) “a estrutura urbana é composta pelos seguintes elementos: o traçado viário, o quarteirão, o lote, o edifício. Um estudo morfológico é válido quando além de descrever estes elementos, investiga sua interdependência, [...] o conceito de tipo adquire então valor instrumental no sentido de indicar a origem dos edifícios e suas relações com os outros elementos operantes na forma urbana”.

Rossi (1977) conceituava que “a morfologia urbana é o estudo das formas da cidade. A tipologia construtiva é o estudo dos tipos de construção.” Tanto morfologia como tipologia, estudam duas ordens de fatos homogêneos; além disso, os tipos construtivos que se concretizam nos edifícios constituem fisicamente a cidade.

Tipologias de construção e de ocupação compõem padrões morfológicos, que normalmente surgem ou são planejados para áreas de

características socioeconômicas e culturais semelhantes associados aos eventos sucessivos no tempo.

A definição de Pereira (2012) vale aqui como ressalva: “Um percurso histórico demonstra que não existe uma única definição de tipologia construtiva, ao contrário, tal conceito é redefinido sempre em função das investigações que se pretende realizar: o tipo é, portanto, um instrumento e não uma categoria”.

A parte visível do fenômeno “cidade” é a morfologia urbana. Sendo o fenômeno urbano, em si, resultante do processo social, sua forma seguiria a mesma causalidade. “Analisar forma urbana na micro escala é mais assertivo que na macro, devido à complexidade da profusão de projetos que há em metrópoles heterogêneas como São Paulo, Rio de Janeiro e Campinas” (Krafta, 2014, p.33).

Há uma relação da densidade urbana com a morfologia que surge neste trabalho com a exploração dos dados Lidar, e que resulta no dimensionamento da área construída. Estudos demográficos que eventualmente utilizarem os resultados deste trabalho, poderão fazer uso desses dados para estimativas mais precisas da população.

2.1. Conceitos e aplicações

Ye & van Nes (2014) apresentam a modelagem espacial utilizando sistemas de informação geográfica para combinar três elementos constituintes da morfologia urbana reconhecidos por Conzen[10], e produzir um sistema de classificação para tipologias de áreas urbanas, e inferir sua avaliação socioeconômica. O método proposto utiliza conceitos como “sintaxe espacial”, “matriz-espaço” e “índice de uso misto” para medir a integração da rede viária, a densidade construída e o uso do solo, bem como sua interdependência. A validação foi realizada pelo mapeamento das condições socioeconômicas da população de três cidades antigas e uma cidade nova na Holanda. Os resultados mostraram que cidades europeias mais antigas possuem valores maiores para integração viária, densidade construída e

[10] A escola conzeniana (M.R.G. Conzen) surgiu a partir de trabalhos de Schlüter (1899), Fritz (1894) e Geisler (1918) no final do século 19 e início do século 20 em Berlim (Whitehand, 2001).

mistura de usos. O método mostrou-se adequado como ferramenta para o diagnóstico e consequente intervenção no desempenho socioeconômico das áreas urbanas, de forma a revelar, por exemplo, a falta de uso do espaço público por parte da população, problema comum nas novas cidades.

Oliveira (2013) apresenta uma metodologia para avaliação da forma física de áreas urbanas, denominada “morpho” que considera os elementos fundamentais: vias, lotes e edificações. A avaliação é realizada por meio de sete critérios: um para cada elemento; um para cada relação entre pares de elementos; e finalmente, um ligando forma e função. A aplicação da metodologia proporciona uma avaliação quantitativa das “bases morfológicas” de uma área urbana, identificando suas vantagens e desvantagens.

Barros F° e Sobreira (2005, p.2) em sua aplicação de ferramentas de análise geográfica, apresentaram sua maneira de entender a questão:

> “Para entender a cidade [...] necessitamos inicialmente simplificar as relações complexas que existem no ambiente urbano, através da cuidadosa seleção dos elementos relevantes para determinada abordagem, preservando apenas o que é essencial na perspectiva da morfologia [...] que é definida por métodos e conceitos através da forma e do espaço.” [...] “A compreensão dos diferentes padrões morfológicos em favelas parece ser uma maneira de melhorar a gestão e o planejamento dessas áreas.”

Antonucci (2005) realizou uma análise das escolas que influenciam os estudos de morfologia urbana, de onde é possível destacar o seguinte trecho:

> “Morfologia urbana é o estudo dos aspectos exteriores do espaço urbano (o sistema viário, a tipologia de quadras, lotes e edifícios, praças e parques) e as suas relações recíprocas (espaços abertos e construídos), definindo e explicando a paisagem urbana e a sua estrutura. Vias, edificações e monumentos estão entre os principais elementos de análise propostos pela morfologia urbana.” (Antonucci, 2005, p.40)

Aldo Rossi em seu livro “A Arquitetura da Cidade” define dois elementos básicos da cidade (Rossi, 1995):

a) os monumentos, edifícios e espaços públicos, como feições pontuais de influência;
b) as áreas residenciais, a habitação, e suas tipologias arquitetônicas como feições poligonais, que configuram o tecido básico da cidade e produzidas sob a lógica da repetição.

Solà-Morales (1997) *apud* Antonucci (2005, p.85), entende a forma urbana, em toda a sua variedade, como resultado de ideias e projetos sobre as formas de Urbanização, Parcelamento e Edificação (U+P+E), com ritmos de execução, momentos de origens e escalas diferentes. Assim, cinco tipologias básicas “estruturais” são destacadas:

a) os polígonos ou conjuntos habitacionais;
b) as “franjas”[11], que correspondem ao crescimento horizontal ordenado a partir de um núcleo histórico, com predefinição do tecido urbano;
c) o crescimento suburbano com base em loteamentos e casas unifamiliares com seus tipos de lotes e tipos construtivos dos edifícios;
d) a urbanização marginal ou loteamento irregular e favelas, com as casas e demais edifícios para comércio e serviços em geral autoconstruídos (pelo próprio morador, sem a participação de profissionais técnicos);
e) bairros formados de acordo com a tradição do movimento pelas “cidades jardins”.

Del Rio (1991) *apud* Antonucci (2005, p.94) utilizou os seguintes conceitos de morfologia urbana em seu trabalho que consistiu em proposta de desenho urbano visando a urbanização da Favela da Maré, no Rio de Janeiro:

[11] Adota-se o termo como uma tradução livre de "ensanche" (palavra de origem espanhola) que é um terreno de expansão urbana, normalmente planejado, dedicado a novas construções distantes do centro ou fora de uma região ou bairro.

a) Crescimento - modos, intensidades, direções; elementos geradores e reguladores, limites e sua superação, modificação de estruturas e pontos de cristalização;
b) Traçado e parcelamento - ordenadores do espaço, estrutura fundiária, relações, distâncias, circulação e acessibilidade;
c) Tipologias dos elementos urbanos - inventário e categorização de tipologias edilícias (residência, comércio), de lotes e sua ocupação, de praças e de esquinas;
d) Articulações - relações entre elementos, hierarquias, domínios do público e do privado, densidades, relações entre cheios e vazios.

Segundo a *International Seminar on Urban Form* - ISUF (http://www.urbanform.org/):

a) a forma urbana é definida por três elementos físicos fundamentais: *edifícios* e sua relação com os espaços abertos, parcelas ou *lotes* e *ruas*;
b) a forma urbana pode ser entendida em quatro níveis de resolução. Normalmente, os níveis correspondem a: edificação/lote; rua/quadra; cidade; e região;
c) a forma urbana só pode ser analisada historicamente tendo em conta que seus elementos constituintes sofrem contínua transformação e substituição.

Antonucci (2005, p.105) exemplifica a produção de mapas temáticos que permitem visualizar a evolução dos diferentes tecidos urbanos que formam a cidade. Estes mapas apresentam as manchas definidoras dos padrões urbanos mais ou menos homogêneos e quadras-tipo a serem escolhidas para análise. As quadras-tipo são escolhidas em função do grau de permanência das tipologias arquitetônicas e urbanísticas e são apresentadas em pormenor, tendo como fundo a tipologia de ocupação: divisão de lotes; uso e ocupação do solo; gabaritos de altura.

Brito (2010) em sua revisão como fundamento teórico da análise de imagens baseada em objetos, visando a identificação de parâmetros urbanos relacionados à ocorrência de doenças, apresenta os seguintes conceitos:

> “A forma urbana precisa ser estudada em diferentes escalas. Os elementos morfológicos percebidos em uma escala se articulam e estruturam novas formas observadas em outras escalas. Assim, em uma escala regional, o estudo da cidade pode ser realizado por meio da leitura de padrões de expansão, forma dos limites urbanos, da rede viária, p.ex., e a forma de um bairro será composta pela disposição das ruas, distribuição das praças, afastamento entre edificações, etc.” (Brito, 2010, p.27) [...] “Na escala intraurbana, a morfologia também permite realizar a leitura de particularidades de determinado padrão urbano, reconhecendo semelhanças e diferenças entre cidades e dentro da própria cidade. Cidades maiores, principalmente as metrópoles, são caracterizadas pela complexidade espacial, que, ao mesmo tempo que lhe dá identidade enquanto cidade, a compõe como um mosaico de subculturas”. (Brito, 2010, p.28)

Lamas (2004) *apud* Brito (2010, p.27) destaca os elementos cuja presença, disposição, composição e demais características costumam revelar a morfologia do espaço urbano investigado. Algumas dessas características analisadas em imagens de sensoriamento remoto podem revelar funções e estruturas socioeconômicas, além da existência de outros elementos vinculados a estes. O quadro 2.1, adaptado dessa obra, é apresentado a seguir destacando com itálico os elementos que mais interessam à presente pesquisa, ou seja, aqueles com potencial a ser explorado pelos dados Lidar, especialmente pelas características geométricas: Edifício, Quadra, Via e Vegetação.

Quadro 2.1- - Características morfológicas e identificação em imagens.

Elemento	Característica	Identificação em imagem aérea/orbital
Solo	impermeabilização, cobertura	Sim
Pavimento	material, estado de conservação	Sim
Edifício	material, estado de conservação, tamanho, organização, *afastamento, adensamento, verticalidade*	Sim
Lote	tamanho, propriedade: público/privado	Sim/Não
Quadra	organização	Sim
Logradouro/Via	organização/forma, largura	Sim
Praça	ocupação, propriedade	Sim/Não
Fachada	aspecto, estado de conservação	Não
Monumentos	estado de conservação, verticalidade	Sim
Vegetação	*tamanho, adensamento*, organização, *verticalidade,* impermeabilização	Sim
Mobiliário (lixeira, banco, telefone, sinalização)	estado de conservação	Não
Equipamentos	cadastro - uso, tamanho, estado de conservação	Não
Água	estado de conservação, organização - natural/artificial, público/privado - piscinas	Sim/Não

Fonte: Lamas (2004) *apud* Brito (2010, p.27)

2.2. Morfologia de assentamentos precários

Para avaliar a metodologia proposta neste trabalho foi estabelecido inicialmente o recorte territorial dos setores especiais de aglomerados subnormais, definidos pelo IBGE por ocasião do censo demográfico. No censo de 2010 foram identificados como setores subnormais 15.868 do total de 316.574 ao longo do país, ou seja, cerca de 5 % do território nacional foi considerado assentamento precário.

O Setor Censitário[12] é a unidade de coleta do Censo Demográfico e apresenta nas áreas urbanizadas cerca de 300 domicílios para que o trabalho de campo possa ser dimensionado adequadamente. Uma unidade espacial de informação é importante também na implementação de políticas públicas e

[12] Os 316.574 setores foram utilizados pelo IBGE no censo 2010 em 5.565 municípios, que contabilizaram 67.569.688 domicílios. IBGE. Manual da Base Territorial. Rio de Janeiro, 2ª.ed. 2014.

normalmente é agregado segundo diferentes recortes territoriais maiores, como por exemplo, Áreas de Ponderação ou outros limites administrativos. Nesse contexto é relevante a definição a seguir:

> "O Aglomerado Subnormal é um conjunto de unidades habitacionais, localizadas em áreas urbanas, de ocupação ilegal da terra, no período atual ou recente, e que apresenta pelo menos uma das seguintes características: *padrão urbanístico assimétrico das vias de circulação e do tamanho e da forma dos lotes* (grifo nosso), carência de serviços públicos essenciais, como rede de esgoto, rede de água, energia elétrica e iluminação pública". "O aglomerado subnormal com mais de 51 domicílios obrigatoriamente será isolado em setor(es) censitário(s)". (IBGE, 2014)

O IBGE realizou o Levantamento de Informações Territoriais - LIT ao longo do país e teve como universo todos os setores censitários, nos quais "observou uma variedade muito grande nos aspectos dos aglomerados subnormais, daí a necessidade de melhor qualificá-los" de tal forma que foram registradas apenas as características predominantes em cada um deles. (IBGE b, 2010)

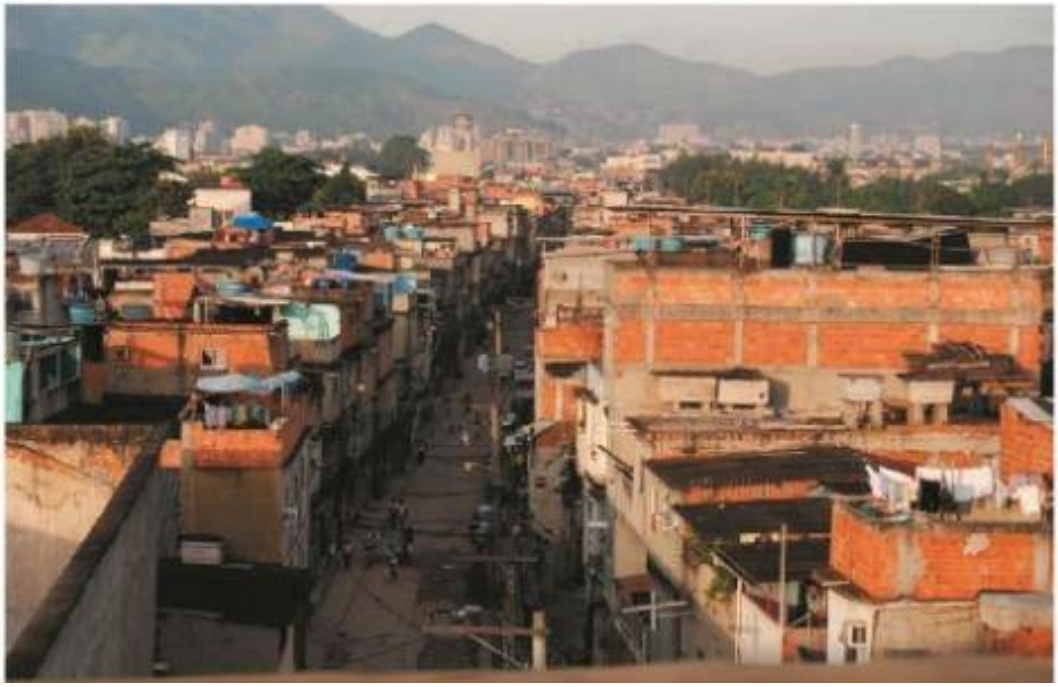
Os índices obtidos a partir dos dados Lidar, devem refletir as características tipo-morfológicas apresentadas no levantamento do IBGE. Uma vez que esta é a principal hipótese deste trabalho, as constatações desse LIT são transcritas a seguir.

> "Os aspectos espaciais dessas áreas se configuram de maneira diversa ao longo do país, de acordo com os aspectos específicos de cada cidade e com os processos socioespaciais que lhe deram origem, distinguindo-se entre si tanto em termos de localização no espaço urbano quanto em relação a aspectos mais específicos, como topografia, padrões urbanísticos, densidade e características de sítio" (IBGE b, 2010).

A combinação das características resulta na tipo-morfologia de cada assentamento. As variáveis observadas nos aglomerados subnormais foram classificadas, no LIT, de acordo com sua existência (presente em pelo menos 10% dos domicílios) e sua predominância (maior número de domicílios em determinada situação).

> “Nos aglomerados subnormais em áreas com predomínio de aclives/declives moderados/acidentados, por sua vez, observou-se forte correlação com a predominância no padrão de construções com mais de um pavimento, baixa presença de arruamento, com predomínio de locomoção através de bicicletas/a pé ou motocicletas e de edificações sem espaçamento. Na Região Metropolitana do Rio de Janeiro (figura 2.1), foram identificados muitos exemplos de aglomerados subnormais que reuniram tais características” (IBGE b, 2010).

Figura 2.1- -Aglomerado subnormal com predomínio de construções de dois ou mais pavimentos sem espaçamento entre si no Rio de Janeiro (RJ)



Fonte: IBGE (2010b).

> “Nos aglomerados subnormais com predomínio de áreas planas, observou-se uma significativa predominância de construções de

um pavimento, quadras com lotes regulares e vias de circulação que permitiam a passagem de caminhões e carros. Este padrão de aglomerado subnormal é o mais característico, por exemplo, no Município de Macapá (figura 2.2) que possui também grande espaçamento entre as construções". (IBGE b, 2010)

Figura 2.2- - Aglomerado subnormal em área plana com predomínio de construções de um pavimento e vias que permitem a circulação de carros e caminhões de Macapá (AP)

Fonte: IBGE (2010b).

2.2.1. Topografia e declividade

A produção do Modelo Digital do Terreno (MDT) é obviamente uma das atividades mais usuais com os dados Lidar. Consequentemente a análise das características topográficas é simples e direta.

"A topografia, influencia a acessibilidade, seus padrões de arruamento e a densidade das construções. Os aglomerados subnormais são distribuídos em áreas de diferentes características topográficas, classificadas conforme o valor da

declividade como *planas* (até 5%), de aclive/declive *moderado* (entre 5 e 30%) ou de aclive/declive *acentuado* (mais de 30%)".(IBGE b, 2010)

2.2.2. Circulação e acesso

"O conhecimento das condições locais de *acessibilidade*[13] reflete fortemente as condições básicas de infraestrutura e serviços no aglomerado subnormal, tais como o acesso a serviços de transporte público e segurança, além de outros serviços públicos importantes. Foram consideradas como vias de circulação interna nos aglomerados subnormais tendo em conta a largura mínima e o tipo de tráfego possível: as ruas e avenidas (mínimo 4m para carros), becos e travessas (menos de 4m; figura 2.3), escadarias, rampas, passarelas, pinguelas e trilhas (sem pavimentação). Registrou-se, ainda, a ocorrência de situações em que predominantemente não havia nenhuma via de circulação interna nas áreas". (IBGE b, 2010)

Figura 2.3- - Beco em aglomerado subnormal de Cubatão (SP)

Fonte: IBGE (2010b).

[13] Embora o IBGE adote este termo, entende-se que a análise que foi realizada é melhor expressa por capilaridade do sistema viário, cuja métrica é apresentada no capítulo de metodologia.

2.2.3. Espaçamento e densidade

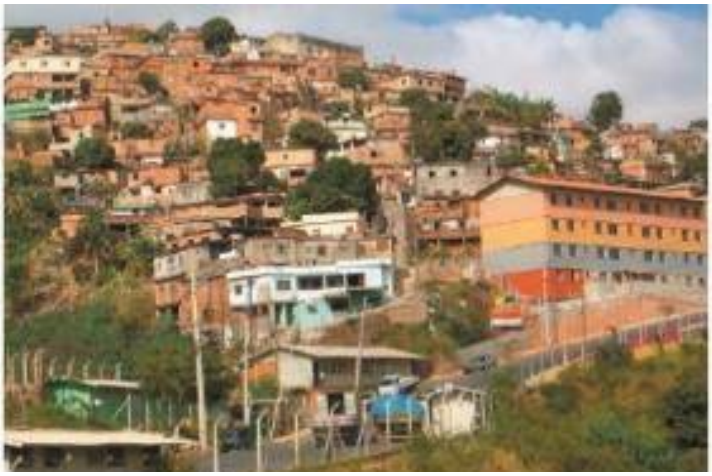
> “A *verticalização* das construções (três classes para o indicador quantidade de pavimentos: um, dois e três ou mais) e o *espaçamento* entre elas (nulo, médio ou grande) são características associadas à escassez e ao preço do solo urbano. Áreas mais nobres da cidade e com melhor oferta de trabalho e serviços públicos possuirão maior valor de solo, inclusive em aglomerados subnormais. Por essa razão, há uma tendência de que os aglomerados subnormais situados nestas áreas sejam mais *densos*, o que se reflete espacialmente em domicílios mais verticalizados e com menor espaçamento entre si”.

> “As Regiões Nordeste e Sudeste, por sua vez, foram as que apresentaram maiores percentuais de domicílios predominantemente *sem espaçamento* entre si e com *verticalização* predominante de dois ou mais pavimentos. Exemplos desse padrão de ocupação foram encontrados nas Regiões Metropolitanas de São Paulo (SP), Belo Horizonte (MG) e Salvador (BA). Estas regiões apresentaram uma expressiva quantidade de setores de aglomerados subnormais em áreas não propícias à urbanização regular, como encostas, em locais onde o solo possui menor valorização”.

Figura 2.4- - Padrões de ocupação

Região metropolitana de São Paulo (SP)

Região metropolitana de Belo Horizonte (MG)



Região metropolitana de Salvador (BA)

Fonte: IBGE (2010b).

A forma e tamanho dos *lotes* também são considerados no LIT, mas como dependem da sua demarcação, não foram contabilizados como índices/métricas válidos no presente trabalho, que analisa a edificação.

Capítulo 3. Sensoriamento Remoto em Áreas Urbanas

Aerolevantamentos têm sido usados desde os anos 30 (haja vista o levantamento da Sara Brasil em escala 1:5.000) como fonte de dados, extraindo diversos tipos de mapas e informações, inclusive características socioeconômicas e culturais dos habitantes e sua interação com o ambiente, interesse específico deste trabalho. A aplicação de modelos empíricos para estimativas de variáveis biofísicas, demográficas e socioeconômicas foi relatada como um dos cinco temas mais pesquisados na aplicação do sensoriamento remoto em ambientes urbanos (PATINO & DUQUE, 2013).

Os aerolevantamentos no Brasil têm adquirido dados Lidar junto aos produtos usuais, como ortofotos e cartas digitais; embora existam programas de governo[14] para mapear, monitorar e modelar a composição e o crescimento das cidades, a exploração do potencial dos dados do levantamento para escalas intraurbanas ainda pode evoluir muito, tendo em vista a tecnologia e sua adequação às diversas aplicações.

Evidentemente, há uma relação entre a precisão dos dados altimétricos a aplicação almejada. O mapeamento da cobertura do solo intraurbano demanda levantamentos que atendam à padrões de qualidade e produtividade, uma vez que levantamentos de campo em cidades maiores apresentam alto nível de complexidade na execução e consequentemente alto custo.

Hengl et al. (2003) já indicavam a utilidade de diversas tecnologias para produção de dados altimétricos, e já era evidente o potencial do Laser-Lidar para aplicações intraurbanas que exigem uma acurácia melhor que 1 m (quadro 3.2).

Quadro 3.2 - Acurácia típica de diferentes fontes para geração de modelos altimétricos.

Método de coleta	Características principais	Exemplos de sistemas	Acurácia típica
Levantamento de	Melhor acurácia;	DGPS	≤ 1 m

[14] Alguns exemplos são em nível federal o “PRODES” de monitoramento da Amazônia do INPE (http://www.obt.inpe.br/prodes/index.php), em nível regional o “Mapeia São Paulo” da Emplasa (http://www.mapeiasp.sp.gov.br/) e em nível local o “SIURB” da Prefeitura do Rio (http://www.rio.rj.gov.br/web/ipp/siurb)

Campo	densidade pequena (maior espaçamento); alto custo	Taqueometria (estação total)	1 mm - 10 cm
		Nivelamento geométrico	≈ 1 mm
Imagem Estereoscópica	Densidade alta (menor espaçamento); pode ser semi ou totalmente automatizado; problemas em solo recoberto de vegetação	Foto aérea	0,1 m - 1 m
		Imagem Orbital (SPOT, ASTER)	10 - 20 m
Varredura Laser	GPS Integrado; Requer filtragem e reamostragem para o uso; pode penetrar na folhagem da vegetação e registra superfície vegetada, construída e solo	Laser Aerotransportado (Lidar)	0,2 - 1 m
Imagem de Radar (Interferometria)	Menor custo por km^2; necessita apoio de campo; processamento complexo	Radar de Abertura Sintética Aerotransportado (SAR)	0,5 - 2 m
		Plataforma Orbital (ERS, SRTM)	10 - 25 m

Fonte: Hengl et al., 2003

A evolução do sensoriamento remoto para a escala intraurbana tem sido relevante, seja pela alta resolução dos sensores orbitais, seja pelo aprimoramento da tecnologia dos sensores aerotransportados. A alta resolução espacial das imagens orbitais e aéreas tornou possível a identificação individual dos elementos urbanos como edificações, detalhes do sistema viário, parques e praças (SLIUZAS, KUFFER & MASSER, 2010, cap. 5). Jensen et al. (2004), confirmam a relação positiva entre ocorrência de vegetação como variável biofísica e padrões socioeconômicos incluindo o valor das edificações. Tapiador et al. (2011), desenvolveram uma metodologia para derivar regiões de classes socioeconômicas a partir de imagens orbitais de alta resolução, baseados no relacionamento com a morfologia urbana definida por disponibilidade de áreas verdes, acesso a atividades esportivas, piscinas particulares e condições de pavimentação.

Esses estudos demonstram que há correlação entre cobertura do solo e variáveis socioeconômicas em diversas cidades do mundo inteiro, mas a investigação local é sempre necessária para revelar diferenças visando a obtenção de relações mais precisas. “A vantagem óbvia da obtenção dessas relações urbanas é a rapidez e o baixo custo em relação a levantamentos *in loco,* que em geral provém de censos realizados em intervalos de 10 anos.” (Besussi et al., 2010)

Tamanho e densidade das ocupações tendem a ser bons parâmetros indicativos do seu padrão e até do valor das suas edificações, segundo Patino & Duque (2013). Essas variáveis derivadas de imagens de alta resolução compõem modelos interessantes para valoração, seja no mercado imobiliário privado ou no poder público (planta genérica de valores, por exemplo).

3.1. Detecção e mapeamento de assentamentos precários

Uma das expressões físicas da pobreza é a condição de habitação, visível na edificação. Conforme a *United Nations - Habitat* (UN-Habitat), um domicílio favelado é um grupo de indivíduos que ocupam um mesmo teto em área urbana carente de um ou mais dos seguintes itens: habitação de natureza permanente, espaço suficiente - no máximo três pessoas em um mesmo cômodo, acesso direto a água potável a um preço adequado, acesso a sanitário privado ou público desde que compartilhado por número razoável de pessoas, e segurança de posse (UN-Habitat, 2006).

A ocorrência de favelas em uma cidade é um indicador de privação e pobreza, e estima-se que aproximadamente um terço da população urbana nos países em desenvolvimento vive em favelas (UN-Habitat, 2012); por isso pesquisadores estão interessados na identificação e caracterização desses assentamentos precários. A aplicação do sensoriamento remoto na detecção das favelas na malha urbana tem sido explorada há alguns anos. São exemplos disso: Stow et al. (2007), Weeks et al. (2007), Barros Filho (2008), Hofmann et al. (2008) - cap. 6.1, Rhinane (2011), Kohli et al. (2012).

A maioria dos trabalhos de detecção e monitoramento de assentamentos precários no nível global usa sensores orbitais e são motivados principalmente pelas Metas de Desenvolvimento Sustentável (Kuffer et al., 2008). A evolução dos sensores de altíssima resolução impulsiona o desenvolvimento de métodos de automação. No entanto, dados adicionais (população, geomorfologia, infraestrutura e urbanismo) não tem aquisição sistemática nas áreas desses assentamentos. Soma-se a isso a heterogeneidade da tipo-morfologia, o que representa um grande desafio para o mapeamento.

Além da relevância do tema, os padrões geométricos dessas ocupações representam um desafio para as técnicas construtivas disponíveis. As edificações não utilizam apenas um tipo de material, havendo telhados de cimento amianto, telhas cerâmicas e lajes em um mesmo assentamento. O espaçamento viário é reduzido a vielas e caminhos estreitos.

A verticalidade das edificações representa uma tendência, dada a indisponibilidade de terrenos para ocupação. A proximidade à massas verdes e reservatórios também é uma característica peculiar das periferias, sobretudo em megacidades tropicais, especialmente São Paulo (figuras 3.5, 3.6 e 3.7).

Figura 3.5 - Padrão de ocupação de assentamento precário em área de proteção aos mananciais - São Paulo - SP.

Fonte: Fabio Knoll - Prefeitura do Município de São Paulo, 2014

Figura 3.6 - Cobertura do solo em áreas precárias da cidade de São Paulo. Um caso (foto a) na borda da área de proteção ambiental (Vegetação - Solo exposto - Assentamento), e outro caso (foto b) sem vegetação.

a)

Fonte: Nario Barbosa - Prefeitura do Município de São Paulo, 2014

b)

Fonte: Fabio Knoll - Prefeitura do Município de São Paulo, 2014

Figura 3.7 - Verticalização dos assentamentos informais - São Paulo - SP. Na foto está assinalada a quantidade de pavimentos, inclusive em construção.

Fonte: Fabio Knoll - Prefeitura do Município de São Paulo, 2014

A dinâmica de produção das autoconstruções é patente nessas áreas, de tal forma que um levantamento Lidar registra inclusive aquelas edificações em construção, como será apresentado no estudo de caso de São Paulo. A foto da figura 3.7 ilustra essa situação com o 6º pavimento em construção.

Owen & Wong (2013) resumiram em um quadro, adaptado a seguir (quadro 3.3.), os indicadores citados na literatura para análise de assentamentos informais, e buscaram explorar, através de parâmetros empíricos, as propriedades espacialmente explícitas em imagens de alta resolução: edificações, vias e espaços livres. Com esse tratamento as ocupações informais podem ser identificadas a partir de uma análise de índices métricos obtidos automaticamente.

Vale o destaque para os itens 6-Lacunaridade, 11-Forma e 13-Densidade do quadro 3.3, como valores possíveis de obtenção nos dados Lidar buscando a estimativa cadastral, ou a caracterização de determinada área. Acrescenta-se aos indicadores do quadro, os termos “tipologia” e “morfologia” como sendo características da estrutura edificada, e como tal, permitem análise através da associação numérica. Esses aspectos são explorados ao longo deste trabalho.

Quadro 3.3- - Indicadores para análise de assentamentos informais.

INDICADOR	DESCRIÇÃO E VALORES ESPERADOS
1 Vegetação	Falta de vegetação. Ocupações têm tipicamente 5 a 10% de espaço público enquanto loteamentos regulares têm 30%.
2 Tipo de segmento viário e materiais	Menor comprimento, menos segmentos regulares.
3 Acesso viário	Vias muito estreitas para tráfego de veículos. Vias de difícil acesso, grande quantidade de ruas sem saída e poucos cruzamentos.
4 Geomorfologia do terreno	Construções em drenagens/córregos, ravinas, altas declividades, solos instáveis.
5 Textura	Alta entropia, alto contraste, baixa homogeneidade.
6 Lacunaridade das estruturas de habitação - tipologia	Heterogeneidade ou ‘falhas’ de espaços vazios (lacunas) entre estruturas construídas. Há resultados conflitantes na literatura.
7 Proximidade de risco	Risco compreende alagamento, refluxo hídrico (hydrologic setbacks), deslizamento/terremoto, depósito de lixo, emissão de poluentes, aeroportos, linhas de transmissão, grandes corredores de transporte; fluxo de cascalho (debris flows), queda de blocos ou rochas, movimentos de terra.
8 Consistência da orientação das edificações	Os segmentos de linha apresentam grande variação angular e pequenas dimensões.
9 Proximidade ao centro da cidade e a serviços públicos	Análise de redes de distância a serviços, comércio ou centro da cidade, equipamentos de saúde. São esperadas grandes distâncias.
10 Tamanho do domicílio	Média entre 16 e 40 m^2 por domicílio classificados como favela, ainda que na Cidade do Cabo, por exemplo, a média em favelas é 15 m^2.
11 Forma do domicílio - tipologia	Altura dos domicílios medida pela sombra nas imagens, ou Radar/Lidar; simplicidade na forma (4-lados) predomina nos informais.
12 Consistência da orientação dos domicílios; acesso e retorno viário ao domicílio	Localização precária dos domicílios, ausência de retorno viário.
13 Densidade construída e separação de domicílios - morfologia	Menor distância do vizinho mais próximo a partir do centroide do polígono dos domicílios.
14 Material da cobertura	Propriedades espectrais do material da cobertura, a textura da

	cobertura em informais é mais heterogênea.

Fonte: Owen & Wong (2013)

Imagens *Quickbird* de alta resolução foram testadas na detecção de favelas de São Paulo e Rio de Janeiro por classificação orientada a objetos com resultados animadores que podem ser vistos em Hofmann et al. (2008) - cap. 6.1, Kux et al. (2010), Novack & Kux (2010).

Barros F° (2008) testou imagens *Quickbird* e *Ikonos* em Recife e Campinas, por meio de uma abordagem baseada na análise da textura por lacunaridade: dimensão fractal que leva em conta a distribuição dos espaços vazios - lacunas - da imagem[15]. Embora pelos dados do censo, favelas foram identificadas inicialmente por um índice de "desabitação", nessas áreas foram testadas algumas amostras das imagens. O método foi eficiente para distinguir favelas de não-favelas e mostrou nessas últimas, forte correlação entre lacunaridade (muitos espaços vazios) e desabitação. Kit et al. (2012) também adotaram métricas de lacunaridade com sucesso na identificação de favelas em Hyderabad, India, sobre uma imagem *Quickbird.*

De forma geral, com base na comparação entre espaços vazios de assentamentos formais (mais vazios) e informais (menos vazios) é possível classificar tais padrões da imagem.

Pedrassoli (2011) utilizou a análise de imagens baseada em objetos na detecção de favelas em Taboão da Serra - SP e destacou, ainda que não tenha usado, o potencial que os dados Lidar teriam para melhorar o desempenho da classificação automática.

Coutinho Fº. (2014) utilizou dados Lidar combinados com ortofotos também em Taboão da Serra - SP para estimar índices de qualidade ambiental, compostos por vegetação e área construída (edificações e pavimentação).

O padrão das edificações em favelas foi analisado por Kuffer et al. (2008) e Kuffer e Barros (2011) buscando diferenciar a morfologia dos assentamentos; esses trabalhos destacaram características comuns de um

[15] Os conceitos envolvidos e outros estudos de caso da lacunaridade serão apresentados em uma seção específica adiante.

assentamento precário: proximidade à várzea inundável e a área industrial, alta densidade (no mínimo 80% da solo é ocupado), tamanho reduzido da edificação, serviços básicos insuficientes, construções provisórias sem a devida fiscalização, sistema viário desordenado e ausência de áreas verdes públicas. Nas áreas formais ou planejadas são identificados de forma geral: densidade baixa ou moderada, geometria regular (sistema viário segue regras urbanísticas), edificações de tamanho maior e maior ocorrência de áreas verdes públicas.

Kuffer et al. (2008) utilizaram o software *Fragstats* (McGarigal et al., 2002) sobre células geradas a partir dos atributos da imagem de forma a estabelecer relações espaciais entre as células e assim determinar padrões passíveis de detecção por parâmetros mensuráveis ou uma lógica métrica (quadro 3.4). A estrutura da paisagem foi quantificada através de níveis de heterogeneidade medidos progressivamente nas escalas de pixel, segmento, classe e paisagem.

Quadro 3.4 - Variáveis espaciais de áreas informais.

Domínio	Indicador	Métrica
Morfologia urbana	Estrutura do assentamento	Padrão de via (por comparação formal e informal)
		Ausência de área verde pública
	Densidade de ocupação	Adensamento de edificações
	Tamanho da edificação	Domicílio de tamanho reduzido
Localização	Aptidão da área	Localização em área de risco (proximidade a grandes vias e rios)
	Distância do centro da cidade	Periferia x centro

Fonte: Kuffer et al. (2008)

A figura 3.8 mostra como é possível estabelecer índices métricos para o comportamento espacial de objetos ou fenômenos. Da Silveira (2014), diferencia esses índices de ocupação em dispersão, fragmentação e compactação. Kuffer et al. (2008) estabeleceram ainda, índices de fragmentação e aglomeração, através da proporção de segmentos adjacentes medindo assim o grau de agregação de cada tipo de segmento. Os resultados encontrados representaram significativamente as diferenças dos parâmetros associados às ocupações formais e informais (figura 3.9 adiante).

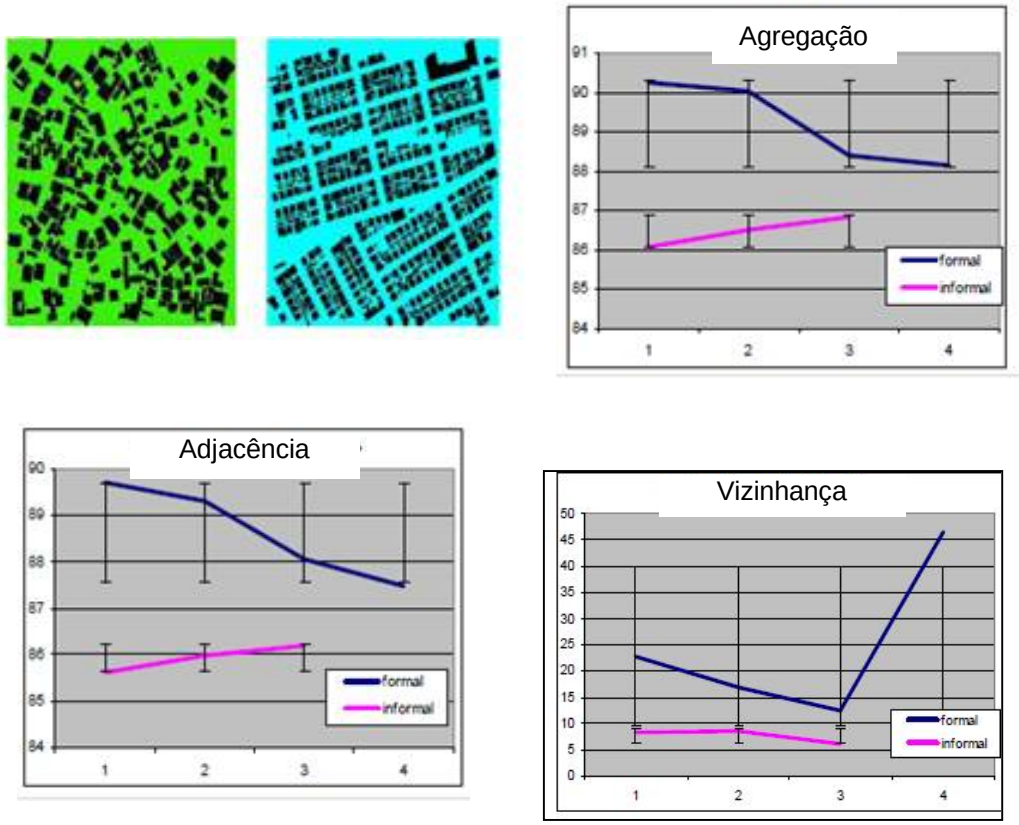
Figura 3.8 - Índices métricos - Expansão urbana, periferização e bordas urbanas.

Fonte: Da Silveira (2014). Disponível em: http://www.vitruvius.com.br/revistas/read/minhacidade/14.164/5106

Na figura 3.9 são apresentados os resultados gráficos para as quatro áreas analisadas por Kuffer et al. (2008) (de 1 a 4 no eixo horizontal). A separação das linhas enfatiza a diferença dos parâmetros de agregação,

adjacência e vizinhança entre áreas formais (linha azul nesses gráficos) e informais (linha magenta). O espaçamento das linhas corresponde aos graus de separação entre as características das áreas urbanas.

Figura 3.9 - Métricas associadas aos assentamentos formais e informais.



Fonte: Kuffer et al. (2008)

Ioannidis et al. (2009) visando monitorar construções informais em áreas suburbanas, compararam dois modelos de superfície (DSMs) da mesma área em duas épocas diferentes. Suas fontes de dados foram ortoimagens de resolução 0,25m e MDTs em grade regular de 1m.

Taubenbock & Kraff (2014) desenharam edificações manualmente por digitalização com base em imagens de altíssima resolução visando a geração de métricas comparáveis para assentamentos precários.

Em dois assentamentos informais, “a flexibilidade da aquisição dos dados e a alta resolução especial” de câmeras RGB a bordo de VANTs motivaram Gevaert et al. (2017) a combinar dados de ortoimagens, DSMs e nuvem de pontos Lidar para processamento no software Pix4D. Os dados

foram usados na extração de feições, inclusive das alturas das edificações calculadas por algoritmos de filtragem (algoritmo *top-hat*). A rapidez e pouca oclusão das imagens foram fatores positivos no uso de VANTs, que, no entanto ainda apresentam argumentos contrários ao uso dessa tecnologia: não possuem legislação consolidada, levantamentos sistemáticos e controle cartográfico pelos órgãos reguladores. Obviamente, esses fatores serão modificados no decorrer do tempo.

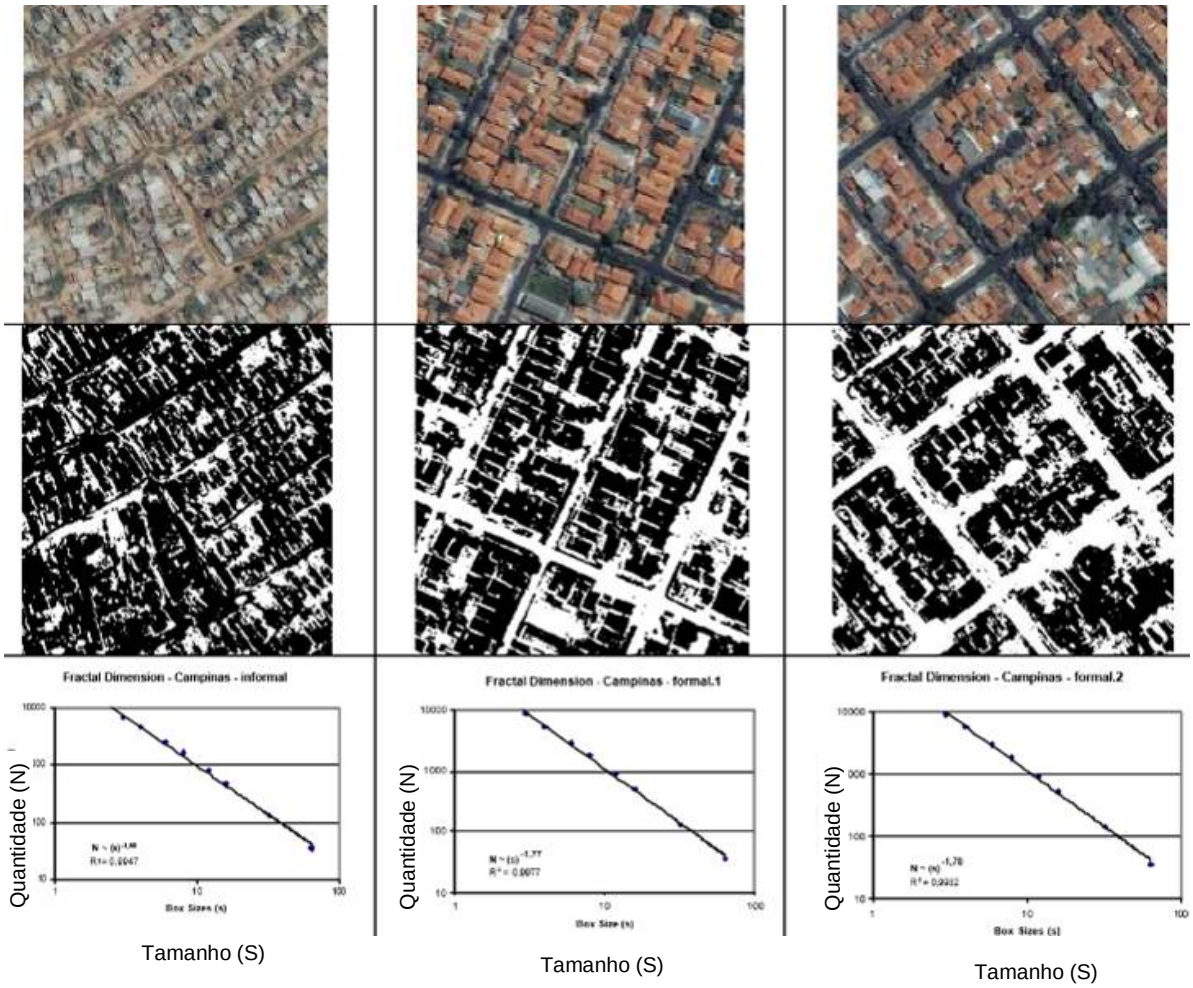
Taubenbock et al. (2018) adotaram o Google Street View (GSV) para contabilizar o número de pavimentos em assentamentos precários (que são denominados pelos autores de “cidades do futuro” em uma tradução livre de “arriving cities”) ao redor do mundo. Uma limitação desse procedimento é a impossibilidade de contabilizar pavimentos que não sejam visíveis ao nível da rua, e outra é que o GSV raramente tem cobertura em áreas mais precárias.

Mahabir et al. (2018) levantaram a necessidade de desenvolver critérios objetivos para detecção e mapeamento de favelas, pelos quais deveriam ser consideradas outras fontes importantes (p. ex. mapeamento voluntário) conjugadas com geotecnologias. Na sua revisão, os autores destacaram os prós e contras do uso de dados censitários e da extração de edificações em três passos básicos: detecção, delineamento e caracterização.

3.1.1. Lacunaridade

Barros F° e Sobreira (2005) procuraram identificar padrões de textura com os software *FracLac* e *ImageJ,* que podem representar níveis distintos de pobreza baseados em conceitos e ferramentas de lacunaridade e fractais, cujos resultados estão na Figura 3.10.

Figura 3.10 - Campinas -SP.
Imagens originais (acima); Imagens binarizadas (centro);
Dimensão Fractal (gráficos).



Fonte: Barros F° e Sobreira (2005)

A geometria fractal surgiu com Benoit Mandelbrot (1983) em seu livro “Geometria da Natureza”, e sua lógica está na observação de um objeto em sucessivas escalas, de tal forma que detalhes só podem ser percebidos se vistos de perto (escala de representação grande), algo bastante comum na ciência cartográfica.

Na figura 3.10 a dimensão fractal é indicada pela inclinação da reta, que representa a relação entre o tamanho das lacunas e a sua quantidade. Aqui também foi enfatizada a diferença dos resultados entre áreas formais e informais, neste caso pela dimensão fractal R^2 de 47 para o padrão informal e 77 e 82 para os padrões formais.

Um padrão semelhante pode ser facilmente observado na cidade: para cada escala de observação uma variedade de detalhes, formas e texturas torna-se visível. Batty & Longley (1994), Frankhauser (1997), Sobreira &

Gomes (2001), confirmam em seus estudos que a cidade é o resultado de uma lógica não linear, cujos padrões podem ser medidos por conceitos e ferramentas da geometria Euclidiana clássica.

A dimensão fractal como uma descrição da textura, pode ser complementada pela métrica da lacunaridade (distribuição de espaços vazios). No caso da análise de textura urbana em imagens aéreas ou orbitais, a lacunaridade por ser multiescalar, o que permite a análise da densidade, compacidade ou dispersão de cada escala de análise. Na prática é uma medida da heterogeneidade, diretamente relacionada a escala, densidade, aglomeração e variância. Pode indicar ainda o nível de permeabilidade de uma estrutura geométrica.

Conforme Ben Wu & Sui (2002), a lacunaridade de um retângulo de dimensão “S” será:

$$1 + (var(S)/\mu^2(S)) \qquad (1)$$

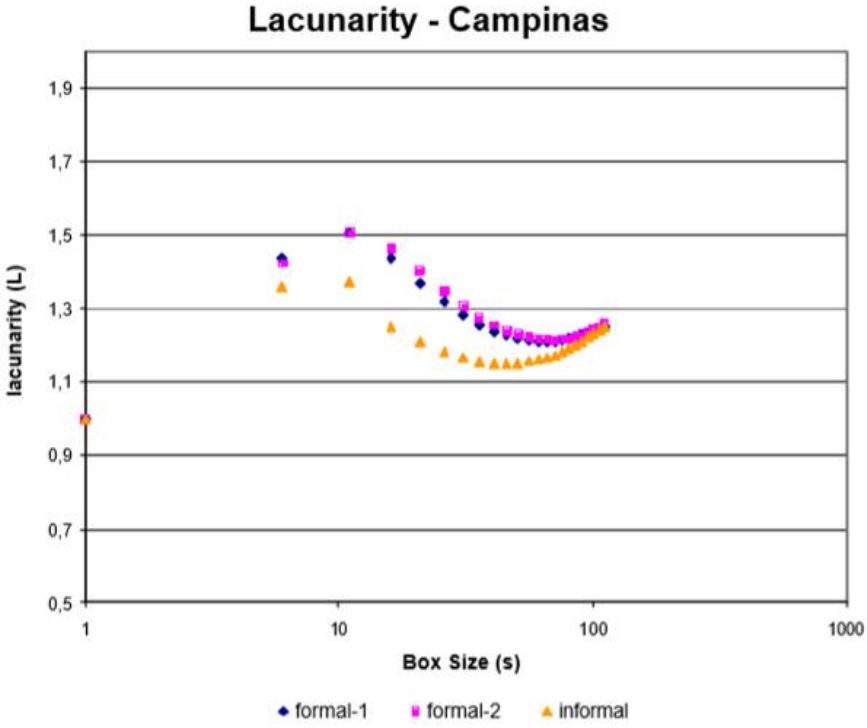
Onde: $\mu(S)$ é a média e $var(S)$ é a variância da massa dos valores dos retângulos de tamanho “S”. Variância é o quadrado do desvio padrão ($var(S) = \sigma(S)^2$).

Um valor baixo de lacunaridade indica homogeneidade, e um valor alto indica heterogeneidade; quanto maior a lacunaridade, maior a variação da distribuição dos pixels da imagem. Em outras palavras, lacunaridade alta significa que os pixels estão agrupados em variados tamanhos de ilhas, cercadas por vazios, indicando um padrão ou textura (figura 3.11).

Figura 3.11 - Campinas -SP.

Imagens de alta resolução; Imagens binarizadas;

gráfico de lacunaridade: Variação entre escalas de assentamentos formais e informais. Escala logarítmica em x



Fonte: Barros F° & Sobreira (2005)

Nota-se a correspondência das duas áreas formais com valores mais altos (azul e magenta), enquanto a área informal resulta em valores de lacunaridade menores (laranja). Assim é possível associar as “lacunas” aos espaços livres associados ao sistema viário que são visivelmente maiores na ocupação formal que na informal.

Na medida que o retângulo de análise (*box size* - s) aumenta, há uma convergência do valor da lacunaridade, pois com uma pior resolução não é possível detectar as diferenças entre cheios e vazios (pretos e brancos da imagem binarizada).

Os autores apontam a dificuldade de obter a imagem binária, cuja qualidade depende da resolução e da ocorrência de elementos perturbadores (nuvem, sombra, vegetação). Os experimentos realizados em imagens da cidade de Campinas indicam que:

(a) Se a dimensão fractal revela similaridades complexas, a lacunaridade complementa a análise revelando diferenças texturais;

(b) É possível distinguir pelos gráficos de lacunaridade, as diferenças texturais de áreas formais e informais, seja pela separação das curvas, seja pelo cálculo do valor para determinado tamanho de caixa (ou box);

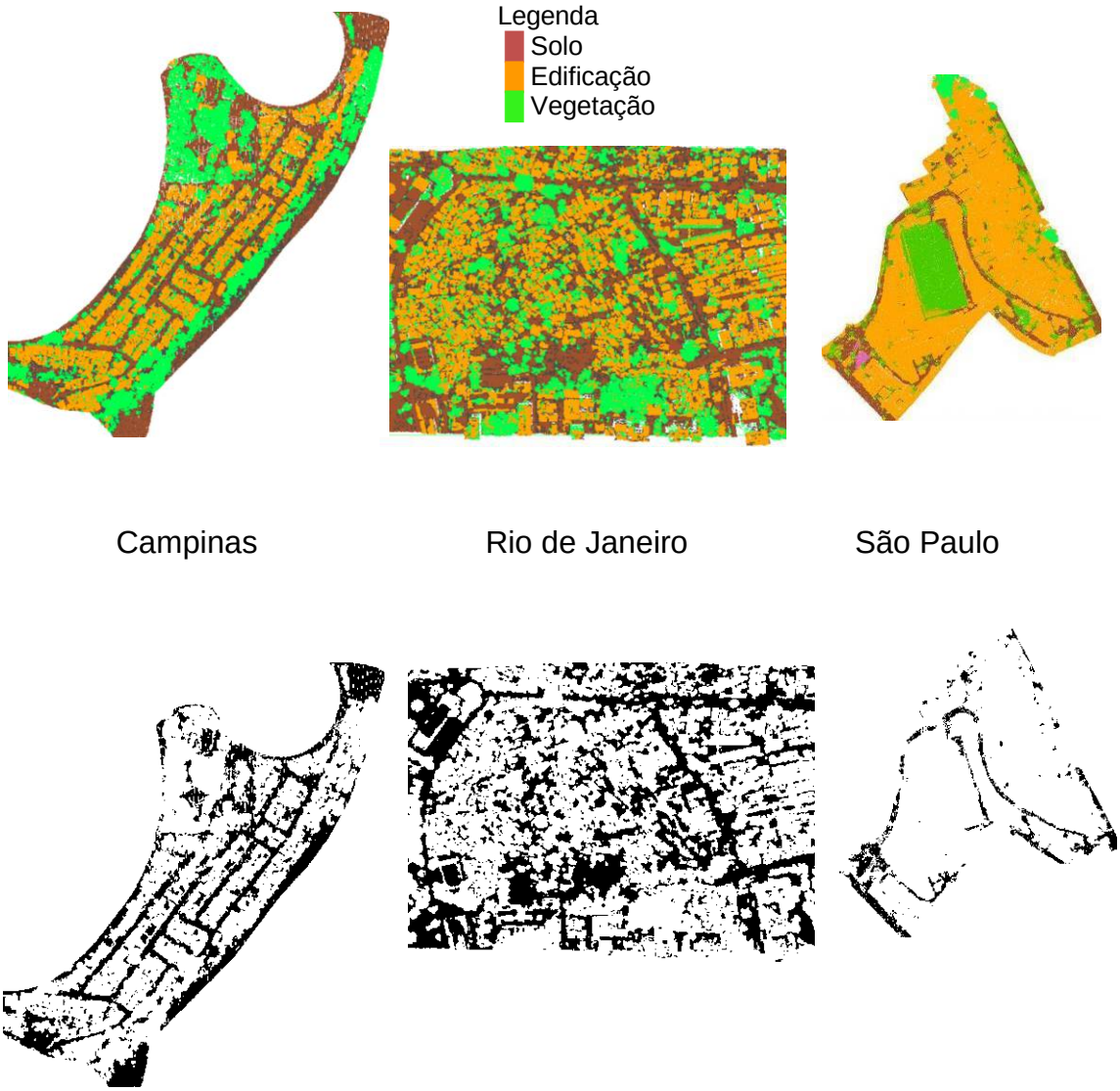
(c) Para os autores, na comparação entre favelas, espera-se ser possível observar as diferenças de densidade, urbanização, parcelamento e níveis de pobreza, através das diferentes texturas que serão reveladas nos padrões de lacunaridade.

Características texturais, morfologia matemática e dimensões fractais associadas à morfologia urbana mostram-se técnicas promissoras ao propósito de mapeamento.

Como exemplo aplicável às áreas de estudo deste trabalho, os dados de entrada para a binarização foram os pontos classificados como “solo” e posteriormente convertidos em malha regular (pixels). Na figura 3.12 os pontos classificados como “solo” aparecem em marrom e os pontos classificados como “não solo” em laranja/verde.

A imagem binária é produzida pela conversão da cor marrom para preto e das cores laranja e verde para branco.

Figura 3.12- - Imagens resultantes da classificação dos pontos Lidar



Fonte: Autor

3.2. Identificação e dimensionamento de edificações

Palmer & Shan (2002) já utilizavam um módulo de edição automática dos dados Lidar, com o software ArcGIS, obtendo resultados satisfatórios em termos de integração da edição ao ambiente SIG 3D, especialmente na modelagem e visualização das edificações na área urbana de Baltimore, Maryland, sendo necessária uma edição manual complementar para a definição precisa da projeção dos edifícios (planta de beiral), bem como

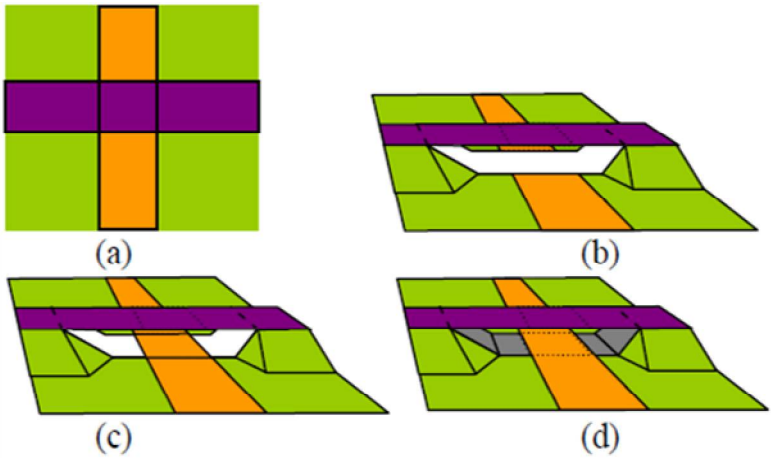
a aplicação de uma filtragem, para produzir o mapa das edificações com suas respectivas alturas.

Entretanto, para uso dos dados Lidar nesse ambiente, foi necessário converter os dados originais (vetoriais) para uma grade matricial das altitudes da superfície, ou seja, um Modelo Digital de Elevação - MDE matricial de espaçamento 3 m. Uma ortofoto de resolução de 0,3 m foi utilizada como principal fonte comparativa de referência da informação cartográfica e semântica, complementada com mapas temáticos (atributos de altura, uso, número de pavimentos) da área urbana. O procedimento automático partiu da vetorização das bordas detectadas na malha DEM generalizada, uma vez que a densidade original Lidar produziu um grande número de polígonos que tornavam o processamento inviável. Por fim o melhor resultado foi alcançado pela combinação dos dois procedimentos, em uma operação de interseção da camada 2D das bordas (beirais) obtidos manualmente com a camada das bordas 3D do DEM, produzindo a separação (filtragem) esperada entre edificações e solo.

A tese de Oude Elberink (2010) procurou, nessa mesma linha de combinação de dados 2D cadastrais e 3D provenientes do Lidar, automatizar com maior eficiência o delineamento das feições estruturantes, edificações e vias, obtendo resultados importantes sintetizados seletivamente a seguir.

Os modelos do sistema viário foram criados combinando dados altimétricos obtidos pelo ajustamento de planos pela vizinhança. O caso das interseções rodoviárias (figura 3.13) ilustra a solução.

Figura 3.13 - Solução de edição semi-automática para modelagem do sistema viário.



Fonte: Oude Elberink (2010)

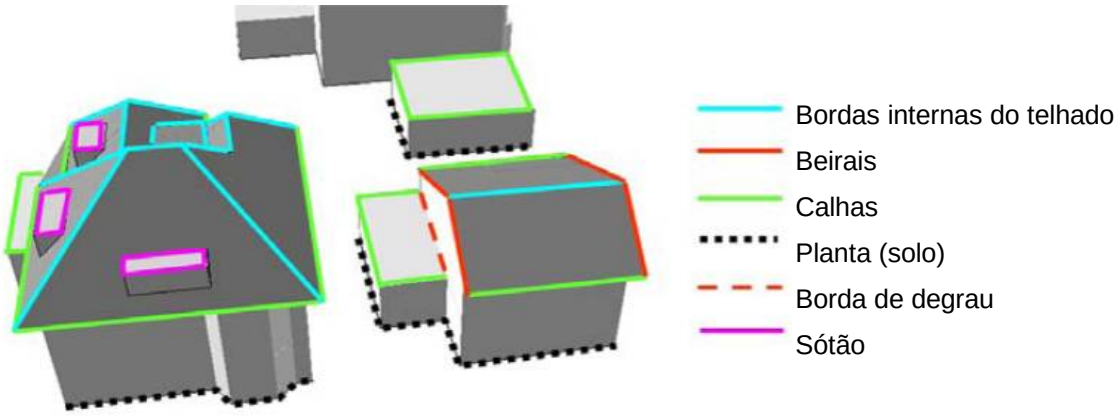
O procedimento seguiu a sequência (figura 3.13): (a) detecção do cruzamento das pistas em 2D; (b) vetorização das margens adicionais de ambas pistas (duplicação das arestas); (c) conexão das bordas inferiores da pista ao terreno em laranja na figura; (d) adição da superfície oculta da pista inferior em cinza na figura. A precisão altimétrica obtida nos resultados foi de 10 a 15 cm, dependendo da configuração dos pontos Lidar.

Em outra aplicação foram selecionados pelo mesmo autor, os pontos Lidar contidos nas respectivas edificações, para depois detectar a estrutura daquele telhado de forma a reconstruir suas arestas. Foi proposto um algoritmo de busca/identificação, como passo intermediário para relacionar dados Lidar com modelos de edificação. Este relacionamento agrega informação das estruturas de telhados (conhecidas) com os pontos Lidar.

A figura 3.14 a seguir, apresenta uma biblioteca de elementos da estrutura dos telhados criada por Oude Elberink (2010) para associação aos dados obtidos na detecção.

Os pontos Laser foram segmentados por coplanaridade. Os conjuntos (segmentos) contidos em um mesmo polígono são considerados segmentos de telhado iniciais. As relações topológicas (adjacência e declividade) entre os segmentos são representadas por um “grafo do telhado da edificação” (*building roof graph*).

Figura 3.14 - Biblioteca de objetos para identificação.

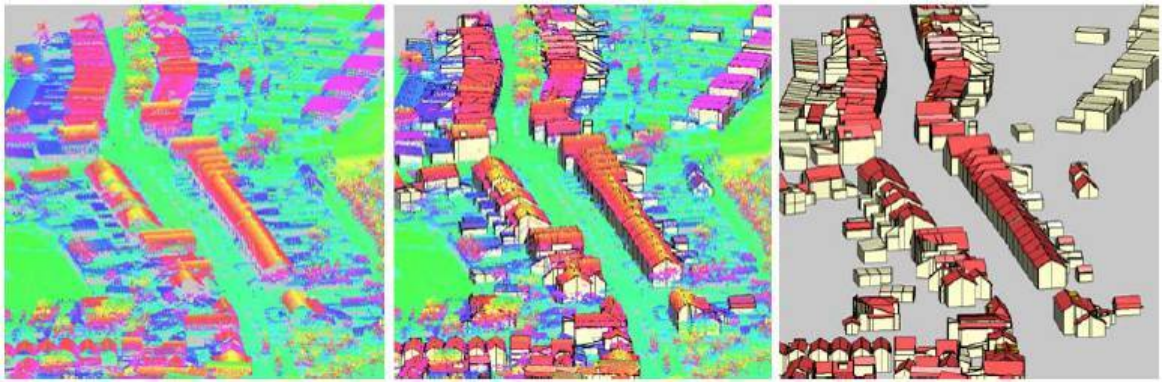


Fonte: adaptado de Oude Elberink (2010)

Da mesma forma, há uma porção dos dados que permanece erroneamente classificada necessitando de edição manual.

Aos dados corretamente classificados foram ainda incorporados procedimentos de modelagem para produção de blocos 3D das edificações complementadas com paredes partindo da altura do solo (figura 3.15).

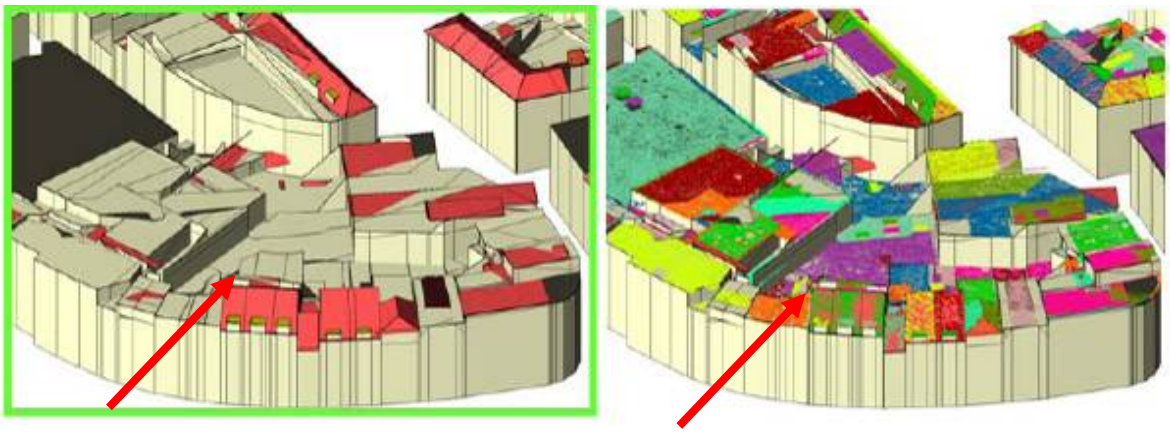
Figura 3.15 - Dados originais (esquerda), edificações 3D reconstruídas (direita) e sobreposição de ambos (centro).



Fonte: Oude Elberink (2010)

Entretanto, as áreas urbanas mais densamente ocupadas não resultaram em um produto semelhante em termos de modelos poliédricos, uma vez que as edificações não estão separadas por espaços livres (figura 3.16), dificultando a sua classificação como objetos distintos, ou seja, caso típico das favelas nas quais o sistema viário tem poucos metros de largura.

Figura 3.16 - Reconstrução automática (imagem à esquerda) de edificações aglomeradas com resultado satisfatório em apenas 50% da área construída na qual são representados os segmentos sobre o modelo (imagem à direita).



Fonte: Oude Elberink (2010)

É possível notar ainda pelas cores na imagem um mesmo segmento (à direita) incidindo sobre edificações diferentes (indicado pela seta), o que mostra a dificuldade na classificação. Os resultados obtidos no processamento e o desempenho são reproduzidos no quadro 3.5.

Quadro 3.5 - Resumo do desempenho e quantitativo dos resultados

	área 1	área 2	área 3	área 4
	Quantidade			
pontos laser (milhões)	2,49	5,71	2,78	1,92
edificações	61	191	226	250
segmentos “telhado”	460	1570	1515	1081
pontos/m^2(ppm)	20	20	20	8
	Tempo em minutos			
segmentação	2	10	2	1
associação segmento-polígono	20	115	69	29
interseção com segmento “telhado”	< 1	12	4	< 1
ajuste baseado no alvo	< 1	2	2	< 1
base nos dados[16] e controle de qualidade	4	68	17	2
base nos modelos e controle de qualidade	< 1	3	3	< 1
total	29	210	97	35
média por edificação	29 s	66 s	26 s	9 s

Fonte: Oude Elberink (2010)

Há um crescimento exponencial do tempo de processamento com a quantidade de pontos (área 2 tem o dobro da área 1), e com o número de edificações (área 3 tem quatro vezes mais que área 1). O tempo foi sete vezes maior da área 1 para área 2, e foi três vezes maior da área 1 para área 3.

[16] Do inglês *Data driven* e *Model driven*, tratam das abordagens para classificação e construção da representação das edificações. As “bibliotecas” de geometria são construídas com base em um conhecimento prévio segundo modelos de representação (*model driven*) ou segundo a leitura dos dados (*data driven*) e sua geração *ad hoc*.

A combinação *data driven* e *model driven* foi analisada por Sohn, (2004) e Rottensteiner (2006), de forma que Oude Elberink (2010) procurou de forma lógica, avaliar os prós e contras de cada abordagem no experimento realizado (quadro 3.5).

Sithole & Vosselman (2004) promoveram um teste para determinar a performance (qualitativa e quantitativa) dos vários filtros que visam extrair a superfície base do terreno das nuvens de pontos laser e assim apontar caminhos para pesquisas futuras. Doze conjuntos de dados foram processados por oito participantes e seus resultados apontaram as seguintes conclusões: todos filtros deram bons resultados em áreas rurais de relevo suave, mas todos produziram erros em áreas urbanas e em relevo acentuado com vegetação. Em geral, filtros baseados em superfícies locais obtiveram melhores resultados. A influência da densidade de pontos não pôde ser avaliada naquele experimento. À época, foi recomendado aprofundar nas pesquisas nas seguintes áreas: a) complemento com dados adicionais; b) classificação baseada em segmentos e c) algoritmos de auto-diagnóstico.

Os critérios para a análise da nuvem de pontos para a ocupação informal (aquelas cuja geometria não é regular), sobretudo as favelas, é baseada na caracterização da ocupação e suas tipologias:

a) Topografia acidentada/suave/plana

b) Ausência de regras para zoneamento, não cumprimento da lei vigente

c) Verticalização sem padrão construtivo homogêneo

d) Coberturas planas (laje ou telha cimento amianto)

e) Transformações rápidas no tempo.

O mapeamento de favelas em 2D não é suficiente para caracterizar cada área, fato comprovado em trabalhos usando imagens matriciais; o padrão espacial 3D pode acrescentar características peculiares de cada conjunto de edificações. Resultados importantes são vistos em Sliuzas et al. (2008) e Kohli et al. (2012).

Os prováveis problemas na caracterização são a dificuldade de pontos atingirem o solo, dada a pequena largura do sistema viário, e a

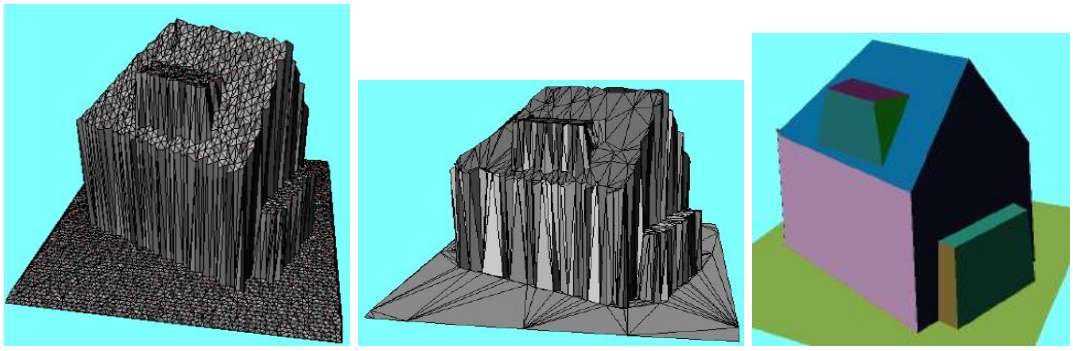
confusão entre pontos de solo, parede e laje, pois edificações vizinhas tendem a uma mesma coloração e um mesmo material (concreto e cimento amianto, por exemplo).

Para esta questão são importantes os estudos de detecção dos diversos materiais existentes (cimento amianto, cerâmica, concreto, terra), bem como a detecção de geometrias características: escadaria, lajes planas, caixas d'água.

Lesparre & Gorte (2012) utilizaram uma simulação de nuvem de pontos para testar a qualidade de um modelo 2,5D gerado automaticamente, uma vez que os modelos verdadeiramente 3D ainda necessitavam de aprimoramentos em função da sua complexidade. Modelos 2,5D mostraram-se eficientes principalmente ao serem utilizados para análise e simulação geográfica ao invés da visualização fotorrealista que exigiria maior detalhamento.

Os autores propuseram uma extensão da estrutura triangular (TIN) que permite mais de um valor de altura para um único vértice. Primeiramente foi feita uma redução dos planos da TIN inicial, em seguida foi realizada a segmentação para separação dos planos pertencentes ao solo, muros/paredes e telhados planos. Finalmente foi realizada a interseção dos segmentos para geração do modelo 2,5D, resultando em alto grau de precisão em relação à nuvem de pontos simulada originalmente (figura 3.17).

Figura 3.17 - (a) TIN original; (b) TIN simplificada; (c) Resultado após ajuste da TIN segmentada.



(a) (b) (c)

Fonte: Lesparre & Gorte (2012)

Oude Elberink et al. (2011) apresentaram um processo com dois estágios de processamento da nuvem de pontos Lidar para detectar automaticamente edificações degradadas por desastres: a) pela segmentação por coplanaridade e b) em seguida o cálculo de atributos geométricos e radiométricos para cada segmento que possibilitaram inferir o grau de degradação. Os resultados foram validados por um mapa de referência, sendo possível ainda analisar os critérios de validação. A integridade e a acurácia dos resultados atingiram valores entre 60 e 85%.

Temba et al. (2015) usaram dados Lidar em uma rotina de Matlab para extração automática dos beirais das edificações para uma favela da cidade de Belo Horizonte/MG, uma contribuição importante para a etapa da extração de delineamento; seu trabalho não foi implementado a partir dos dados brutos visando gerar um produto cartográfico.

Jarzabek-Rychard & Borkowski (2016) destacaram a necessidade de aprimorar o reconhecimento de pequenas estruturas de telhado nos algoritmos de reconstrução dos dados Lidar, devido a pequenos planos não serem detectados.

O uso de Lidar para detectar as diferentes alturas em edifícios agregados foi abordado por Jarzabek-Rychard & Maas (2017), salientando que “no caso de diferenças de altura dentro de um telhado multi-plano, algumas

partes podem ser obstruídas por outras nas imagens aéreas (…), sendo difícil definir precisamente uma borda somente a partir de uma nuvem de pontos 3D".

Portanto, particularmente para as megacidades, a grande extensão e a variedade da tipo-morfologia são fatores que dificultam o mapeamento Lidar em escala produtiva; o monitoramento sistemático nas áreas urbanas ainda não foi efetivado na prática.

3.3. Densidade urbana

As imagens de alta resolução e os dados Lidar passaram a contribuir na estimativa de população com maior precisão na escala intraurbana, sobretudo por passar a considerar a variável verticalização e delineamento (contorno) de edificações, ainda que as relações entre verticalização, densidade urbana e densidade demográfica devam ser analisadas tendo em conta outras variáveis socioeconômicas e culturais.

Segundo Acioly & Davidson (1998), o equacionamento da densidade residencial deve considerar variáveis que tenham significado em termos físicos, como área total do assentamento, área da unidade residencial, área de circulação e o coeficiente de aproveitamento (CA), mas também em termos da população residente e da legislação reguladora da taxa de ocupação.

Nakano (2015) considera como dimensões da densidade urbana: a densidade construtiva ou edificada, a densidade habitacional e a densidade demográfica. O autor parte do pressuposto de que a densidade urbana é fruto da distribuição espacial da população, da composição domiciliar e dos arranjos familiares e buscou esclarecer a confusão da verticalização com adensamento urbano, e afirma que "a verticalização é atributo da forma urbana, (...), portanto, não é medida de densidade demográfica (...) mas sim da densidade construída" (Nakano, 2015, p.46).

> "A densidade urbana varia dependendo da dimensão e da escala que está sendo considerada", e "a delimitação usada no recorte da área de análise define o denominador a ser considerado nos cálculos dos níveis de adensamento das entidades analisadas" (Nakano, 2015, p.60).

> “As densidades são mensuradas a partir do quociente entre conjuntos de objetos ou populações (numerador) e uma determinada porção do meio onde se encontram (denominador) ” (Nakano, 2015, p.62).

Biljecki et al (2016), por outro lado, lançaram a hipótese de que quanto maior a edificação, mais pessoas residem nela, e quanto maior a capacidade de habitação de um distrito mais populoso ele é. O estudo realizado para toda a Holanda analisou os erros provenientes da geometria dos modelos 3D das cidades e sua influência no cálculo do volume, uma vez que foram usados como referência para calibração do método os dados do censo nacional e o zoneamento separando somente as áreas residenciais. Foi utilizado o programa desenvolvido pela Universidade de Delft “3dfier” disponível em código aberto, que analisa a nuvem de pontos em conjunto com as projeções das edificações previamente produzidas, gerando um modelo simplificado com a média das alturas como único valor de atributo.

Rocha (2012) analisou especificamente a comunidade Vila Brandina em Campinas - SP, e constatou um adensamento significativo por moradia, com uma média superior a quatro habitantes por domicílio, superior à da cidade (3,03), da macrozona (3,69) e do levantado pelo censo 2010 para a área (3,6). Outro fator analisado no levantamento dos domicílios foi a quantidade de famílias por domicílio: Em 18% dos domicílios visitados morava mais de uma família. A quantidade total de famílias levantadas foi de 283, para 226 domicílios. (Rocha, 2012).

Há diversos trabalhos que utilizam o volume edificado e a área construída para estimar a população a partir de dados Lidar, dentre os quais se destacam: Qiu *et al* (2010), Lu et al. (2011) e Sridharan et al. (2013).

Tompalski & Wezyk (2012) propuseram índices espaciais baseados na combinação da nuvem de pontos Lidar de alta densidade (aproximadamente 22 pts/m2) com imagens GeoEye-1 (bandas RGB e Infravermelho próximo); o cálculo do índice foi obtido principalmente com a relação entre área construída e vegetação. Os autores destacaram ainda a importância de utilizar os dados Lidar disponíveis para 100 cidades da Polônia no sentido de disseminar seu potencial. Por meio da análise baseada em

objetos, a nuvem de pontos foi convertida em uma camada matricial (raster) da qual foram derivadas as camadas de um modelo normalizado da superfície (nDSM)[17]. A classificação OBIA[18] foi voltada a separação de edificações individuais e áreas de vegetação; a vegetação foi obtida pela combinação do índice de vegetação da diferença normalizada[19] com atributo da altura (baixa ou alta) da camada nDSM; as edificações foram classificadas com base na camada de mínima altura. Os resultados atingiram 86% de acurácia e foram produzidos segmentos de vegetação com atributos espectrais e altimétricos, posteriormente editados para armazenamento em um arquivo formato Shape (SHP) e da mesma forma para edificações.

O volume de cada edificação foi calculado pela multiplicação da área do polígono pela altura da mesma e o volume da massa de vegetação pela contagem de voxels. Os programas utilizados foram o *eCognition* para análise OBIA, *LAStools* (Isenburg, 2016) e *FUSION* (McGaughey, 2014) para processamento Lidar, e finalmente o pacote estatístico R para a conversão da nuvem de pontos Lidar em voxels com os atributos necessários ao cálculo dos índices espaciais.

Dohnju (2012) obteve os modelos 3D pela integração de dados Lidar e ortoimagens. Os modelos 3D foram construídos pela associação da nuvem de pontos a um mapa das edificações: os pontos identificados são o início de uma segmentação por crescimento de planos[20]. Uma vez que feições lineares podem ser determinadas com mais precisão nas imagens, estas foram associadas a bordas derivadas da nuvem de pontos. Beirais e calhas (bem como sua simetria em relação à cumeeira) foram utilizados como feições de ajuste para criação dos blocos 3D considerando uma correção para o afastamento dos beirais. Foram utilizadas imagens coloridas infravermelho (RGBIv) de 16 bits, pixel GSD (*Ground Sample Distance*) de 8 cm (altura de voo 800m), e nuvem de pontos Lidar com 4 pts/m^2 (altura de voo 500m).

---

[17] Do inglês *normalized Digital Surface Model* – nDSM, trata-se da obtenção da máxima e mínima altitude de um objeto, possibilitando o cálculo de sua altura pela diferença.
[18] Do inglês *Object Based Image Analysis* – OBIA, é a metodologia de classificação abordada em capítulo específico da revisão de literatura.
[19] Do inglês *Normalized Difference Vegetation Index* – NDVI, trata-se de uma operação aritmética entre bandas visando realce da vegetação.
[20] O algoritmo de segmentação será abordado na seção adiante.

Pinho (2006) apontava que os dados de imagens multiespectrais utilizados poderiam ter um ganho considerável com a integração de dados de altura, especialmente na distinção das classes de cobertura das edificações (Cerâmica e Concreto / Amianto Escuro), as quais possuem altura média maior que as classes que se localizam ao nível do terreno (Solo Exposto e Pavimentação Asfáltica). Esses dados de altura foram gerados a partir de Modelos Digitais de Superfície (*Digital Surface Models* - DSM) com alta resolução espacial.

Capítulo 4. Sistema Laser-Lidar aerotransportado: Princípios e aplicações

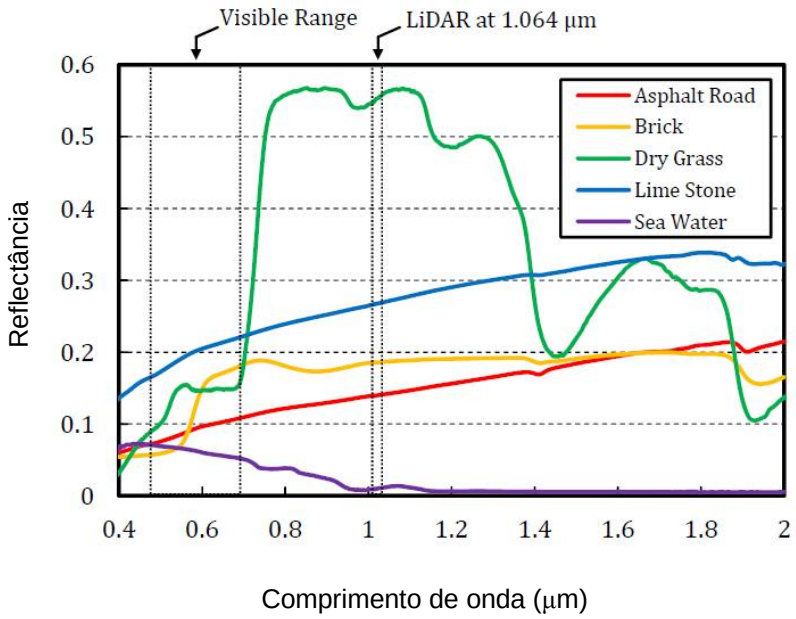
4.1. Princípio de funcionamento

A tecnologia Lidar teve sua investigação científica iniciada há 50 anos atrás e evoluiu lentamente, principalmente em razão da dependência do processamento computacional, e somente a partir do ano 2000 mostrou resultados palpáveis à comunidade cartográfica. O mercado vem crescendo exponencialmente no mundo e, particularmente no Brasil, o sensor Lidar passou a fazer parte dos aerolevantamentos contratados principalmente para áreas urbanas e projetos de engenharia, ou seja, levantamentos com alto grau de precisão cartográfica.

Da mesma forma, os fabricantes oferecem variadas soluções, mostrando a aplicabilidade das inovações tecnológicas, lançando desafios aos usuários na exploração do potencial dos dados produzidos. Se por um lado, há oferta de produtos e serviços, por outro lado há muito a melhorar no processamento visando aplicações específicas que tornem mais rápido o fluxo de produção e uso na cartografia.

O termo Lidar (do inglês *light detection and ranging*, traduzido livremente por “detecção e localização pela luz”) é derivado do princípio dos dispositivos “Laser” (do inglês *light amplification by stimulated emission of radiation*, traduzido por “amplificação da luz por emissão estimulada de radiação”) como dispositivos que geram feixes de partículas de luz (fótons) em uma estreita faixa de comprimento de onda, conhecidos como fontes de luz coerente. A maioria dos sensores Lidar comerciais utiliza comprimentos de onda na região do infravermelho próximo (1000 nm, 1047 nm, 1064 nm e 1550 nm) devido à resposta espectral suficientemente reflexiva para superfícies naturais (figura 4.18), bem como a Razão Sinal Ruído baixa na luz solar, além de serem mais seguros para o olho humano que os outros comprimentos de onda. Maiores detalhes em Renslow (2012).

Figura 4.18- - Reflectância espectral de materiais a diferentes comprimentos de onda

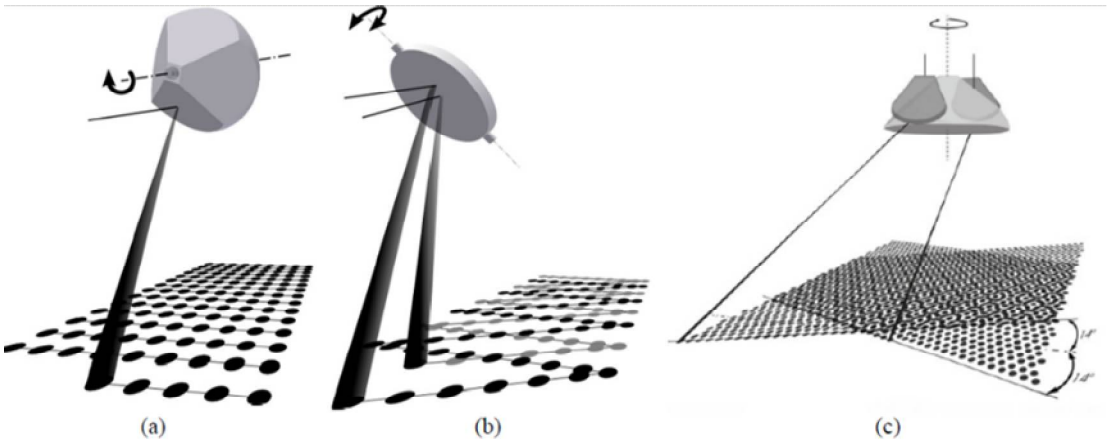


Fonte: Riegl. Disponível em www.riegl.com

O mapeamento Lidar é baseado em um conjunto composto pelo sensor devidamente posicionado e orientado no espaço, e a medição do tempo entre a emissão e a reflexão de um pulso discreto ou contínuo. A distância D é calculada pela equação: D = ½ * tempo decorrido * velocidade da luz. A divisão por dois é realizada pois a distância percorrida é a de ida e volta ao sensor.

Para cada tipo de sensor a bordo de aeronaves, há variados padrões de recobrimento da superfície. Exemplos podem ser esquematicamente visualizados na figura 4.19. O caso mais comum, na figura (b), com espelhos rotativos, gera um padrão zig-zag.

Figura 4.19 - Mecanismos de varredura Laser: (a) disco poliédrico rotatório com único canal; (b) espelho oscilante com duplo canal; (c) disco poliédrico rotatório com duplo canal.



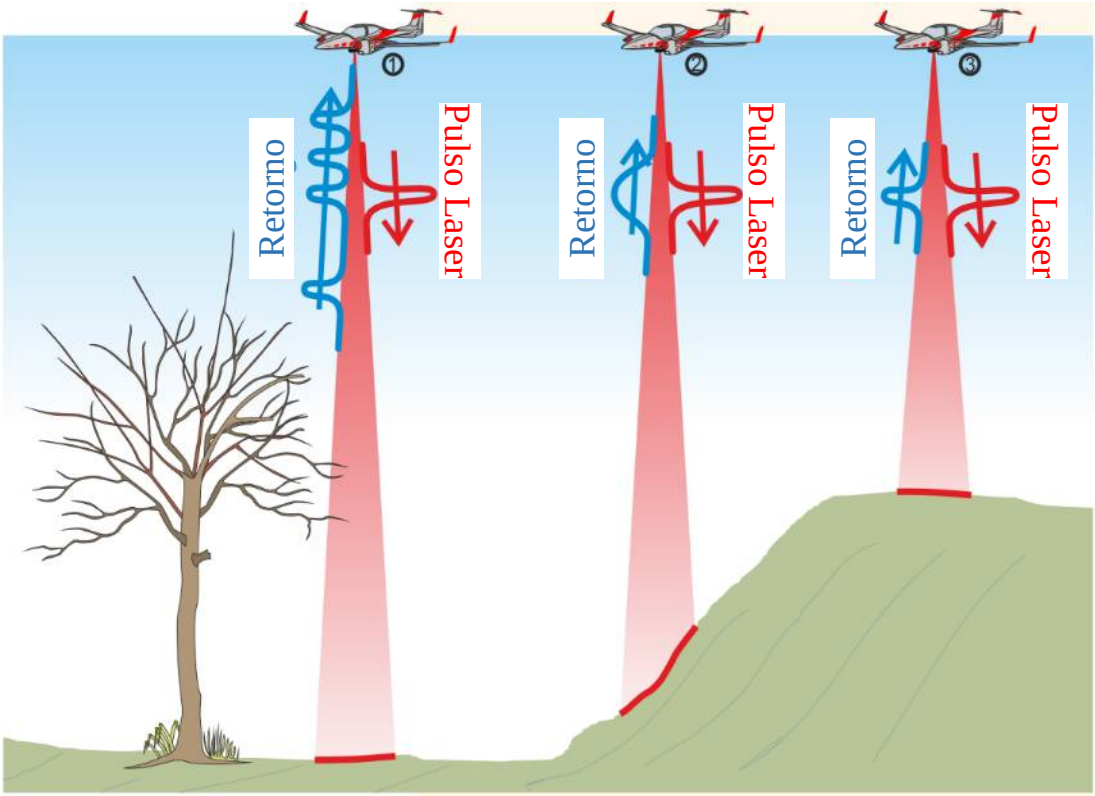
Fonte: Ullrich (2013)

O resultado da varredura em termos de pontos obtidos no espaço objeto, depende portanto, da combinação da rota e velocidade da aeronave com a frequência configurada no sensor.

Um pulso discreto emitido pode retornar de diferentes formas dependendo do objeto que o reflete. Objetos “sólidos” (edificação, pavimento, rocha, solo, etc.) refletem apenas um retorno; objetos “permeáveis” (vegetação principalmente) podem refletir mais de uma vez até que o pulso atinja o solo (PSU, 2013).

Um único pulso emitido em λ= 1064 ηm, por exemplo, tem um ou mais retornos (normalmente 3 a 5) registrados dependendo do mecanismo de gravação do sensor. Sensores de emissão contínua (em inglês *full-waveform* - FW) permitem o registro completo dos retornos (figura 4.20).

Figura 4.20 - Pulsos *fullwave* e resposta dos diferentes alvos a diferentes posições.

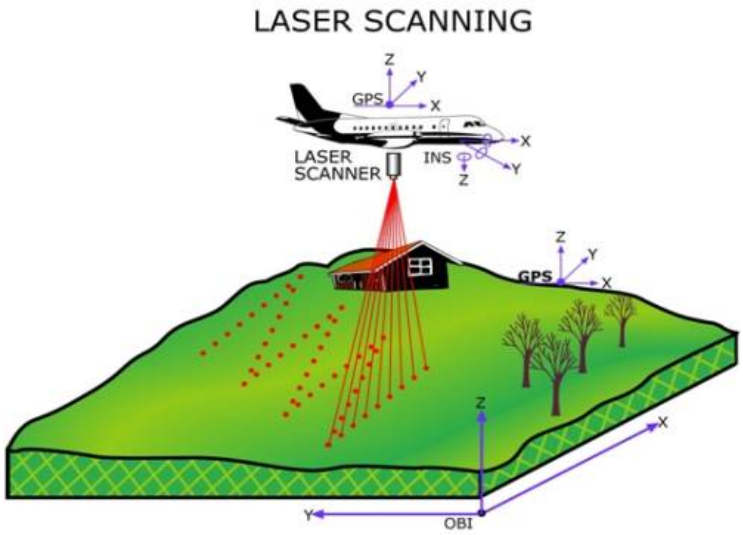


Fonte: Riegl. Disponível em www.riegl.com

Em consequência da geometria da varredura transversal, há variação do padrão de distribuição dos pontos mais adensados conforme os pulsos estejam mais afastados para as bordas de cada lado da linha de voo, principalmente considerando os sistemas mais comuns com espelhos oscilatórios. Cada tipo de sensor produz padrões de distribuição específicos dos dados brutos, em consequência principalmente de sua componente óptico-mecânica, mas também das unidades de medição e de processamento. Estas três partes compõem portanto o sistema Lidar, evidenciando a necessidade do seu perfeito sincronismo para obtenção de resultados que atendam à expectativa de qualidade. Sincronismo que deve ser também observado com a devida precisão na relação com o sistema de posicionamento por satélite (GNSS) e o sistema de posicionamento inercial (INS/IMU).

O grande desafio que, uma vez superado, possibilitou o uso efetivo dos sistemas Lidar foi o georreferenciamento direto, que é obtenção da posição (X, Y, Z) e a orientação ou atitute (ângulos *omega, phi, kappa* de inclinação em relação ao eixos X, Y e Z respectivamente, denominados balanço, arfagem e guinada, do inglês *roll, pitch e yaw*) com relação ao referencial fixo no solo, graças ao desenvolvimento dos sistemas de posicionamento por satélites (do inglês *Global Navigation Sattelite Systems* - GNSS), e inerciais (do inglês *Inertial Navigation Systems* - INS), como representado na figura 4.21.

Figura 4.21 - Padrão zig-zag de recobrimento.



Posição da aeronave: *Global Positioning System* - GPS
Orientação do sensor: *Inertial Navigation System* - INS
Coordenadas do ponto objeto: Laser

Fonte: Renslow, 2012

4.2. Componentes do Sistema Lidar

4.2.1. Laser Scanner

O equipamento pode ser esquematicamente dividido em componentes: (a) gerador de pulsos; (b) conjunto óptico; (c) detector de sinais. Os pulsos são gerados por exemplo, em intervalos de 10 a 15 nanosegundos por um tipo de cristal Nd:YAG (Neodimium: Yttrium Aluminum Garnet), as lentes e espelhos orientam os pulsos gerados para sua emissão e posterior recepção em um conversor analógico-digital (Dalmolin & Santos, 2004).

4.2.2. GNSS e Navegação Inercial

Os sistemas de posicionamento representam um fenômeno de disseminação tecnológica, haja vista sua ampla utilização nas mais diversas aplicações, e ao mesmo tempo a utilização de métodos cada vez mais eficazes, possibilitam obter a posição exata do sensor Lidar a bordo da aeronave; exemplo concreto é o GPS diferencial (com uma estação base) através da comunicação do receptor com estações de processamento distribuídas pelo território ou ainda o Posicionamento por Ponto Preciso (PPP), pós-processado com os dados das efemérides precisas.

As informações angulares de orientação do sistema inercial são obtidas pelo conjunto de um giroscópio e três acelerômetros que as registram a cada instante de emissão e recepção de pulsos.

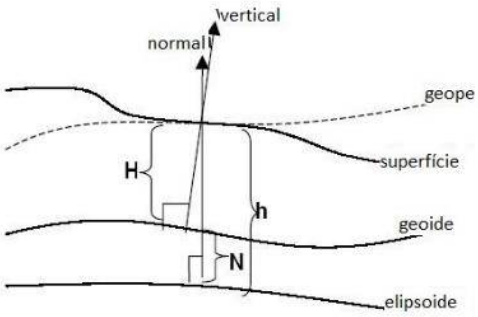
A antena GNSS é posicionada externamente, enquanto o sensor Lidar e o INS são posicionados internamente à aeronave, de tal forma que a relação espacial entre os componentes (deslocamento em 3 direções) deve ser conhecida com precisão (Dalmolin & Santos, 2004).

No pós-processamento os dados de orientação do Lidar são vinculados à posição GNSS, resultando um arquivo da trajetória durante todo o tempo da missão (indexado pelo tempo GNSS).

Destaca-se a importância de sistemas confiáveis de processamento desse grande volume de dados de forma a produzir resultados precisos e prontos para uso; em geral, os fabricantes de sistemas Lidar oferecem a solução integrada.

As altitudes obtidas no levantamento Lidar, são diretamente relacionadas ao referencial utilizado pelo GNSS utilizado na aeronave. Dessa forma, se o sistema está referenciado ao geoide ou ao elipsoide teremos valores diferentes, quais sejam respectivamente, a altitude ortométrica ou a altura geométrica (figura 4.22). Utilizam-se as ondulações geoidais para passar de um valor para outro.

Figura 4.22 - Relação entre altura geoidal e altitude ortométrica



N = altura geoidal ou ondulação do geoide
H = altitude ortométrica
h = altura ou altitude geométrica

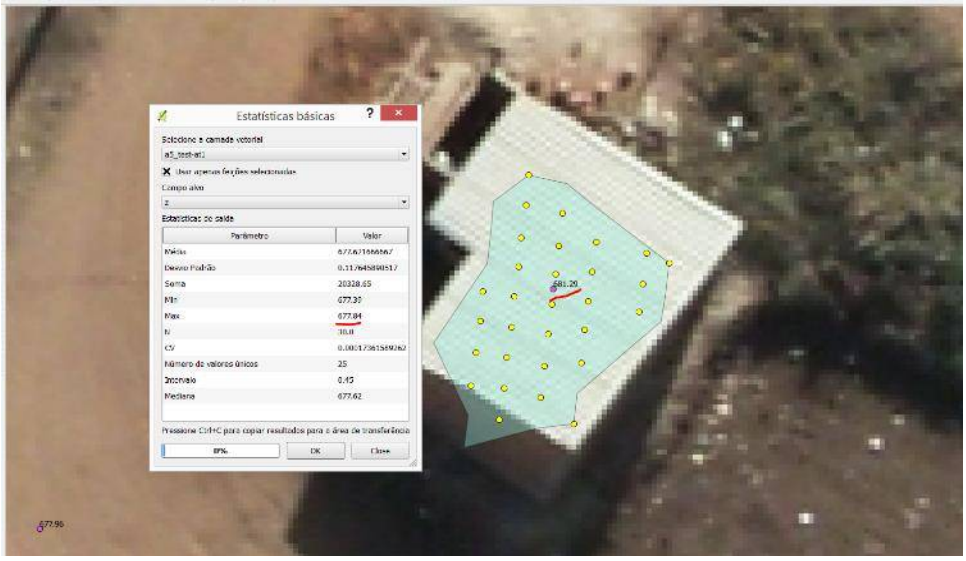
Fonte: IBGE. Disponível em:
https://ww2.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/modelo_geoidal.shtm

Ainda há que se considerar para o caso brasileiro, a diferença entre elipsoides SAD69, SAD69/96 e SIRGAS2000 no cálculo da ondulação geoidal, uma vez que embora oficialmente[21] o modelo adotado seja SIRGAS2000,4, ainda temos várias bases referenciadas ao modelo anterior (Paciléo Netto et al, 2003).

No caso de Campinas, uma amostra possibilitou a comparação entre coordenadas Lidar versus coordenadas da restituição fotogramétrica em escala 1:1.000 (figura 4.23).

[21] Resolução do Presidente do IBGE, n° 1/2005. Disponível em: ftp://geoftp.ibge.gov.br/metodos_e_outros_documentos_de_referencia/normas/rpr_01_25fev2005.pdf

Figura 4.23 - Comparação de altimetria Lidar com centroide da edificação restituída

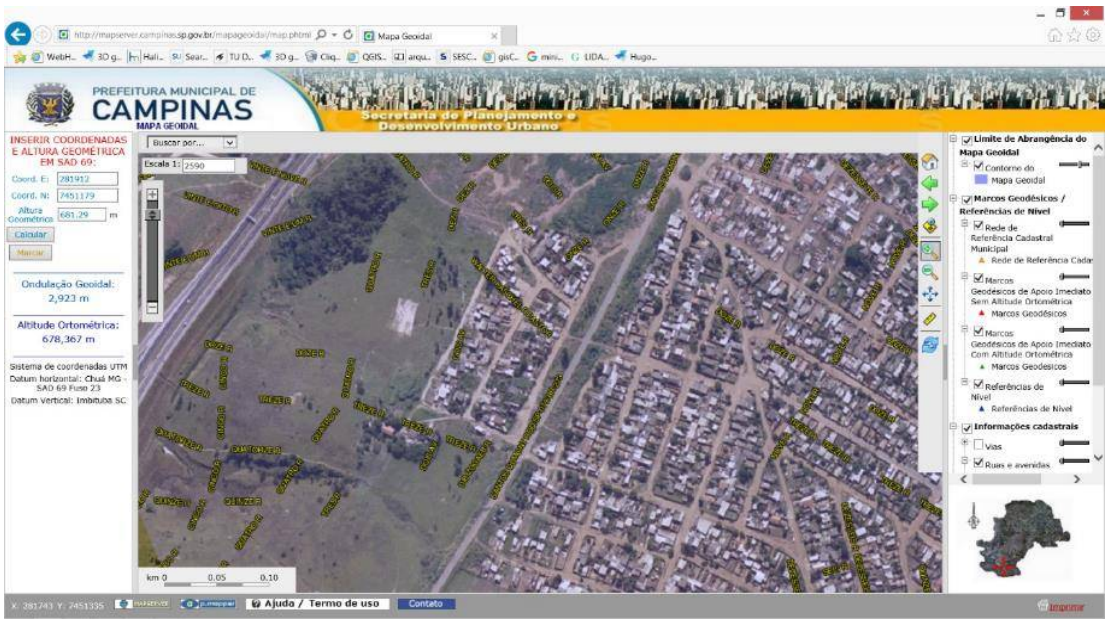


Fonte: Prefeitura de Campinas - SP

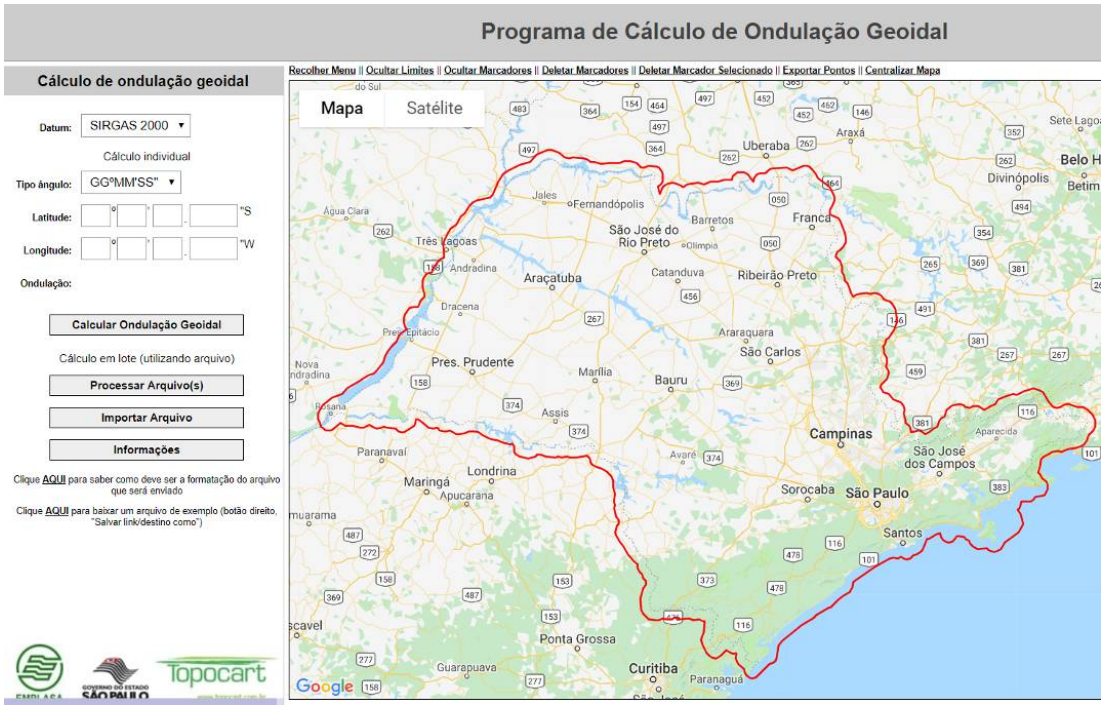
A correção resume-se a aplicação da diferença entre o valor do levantamento em relação à sua altura geiodal na posição E,N.

A prefeitura de Campinas disponibilizou em seu site a interface gráfica para conversão, produzida a partir do trabalho de Innocente (2007), desde que se conheça a posição UTM/sad69 do ponto para calcular a ondulação geoidal; da mesma forma a Emplasa mantem uma página com essa funcionalidade (figura 4.24).

Figura 4.24 - Ondulação geoidal e transformação de altura geométrica para altitude ortométrica



Fonte: Prefeitura de Campinas. Acesso em: 25/09/2016.



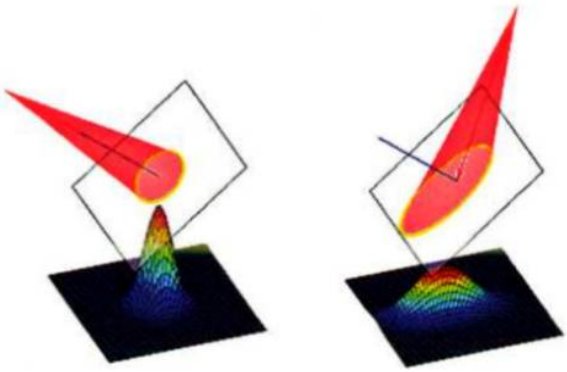
Versão Emplasa S.A. disponível em:

http://www.modelogeoidal.emplasa.sp.gov.br/ Acesso em 15/02/2019.

4.3. Característica dos Dados Lidar

Dada uma área de incidência de cada pulso sobre os objetos da superfície, pode haver uma mistura de alvos a diferentes alturas do solo (último alvo reflexivo). Aqui adota-se o campo instantâneo de visão ou área de cobertura instantânea, o *instantaneous field of view* - IFOV conhecido termo para especificação de outros sensores, ou *instantaneous laser footprint* como tem sido usado para os sensores Lidar. Isso corresponde a uma área circular/elíptica resultado da projeção do pulso em uma superfície plana ou inclinada, respectivamente. A dimensão dessa área é função da resolução do sensor e da altura de voo, que nas configurações usuais para aerolevantamento com equipamentos disponíveis situa-se na casa dos 30 cm de diâmetro (figura 4.25).

Figura 4.25 - Impacto do Ângulo de Incidência na distribuição da potência do pulso.

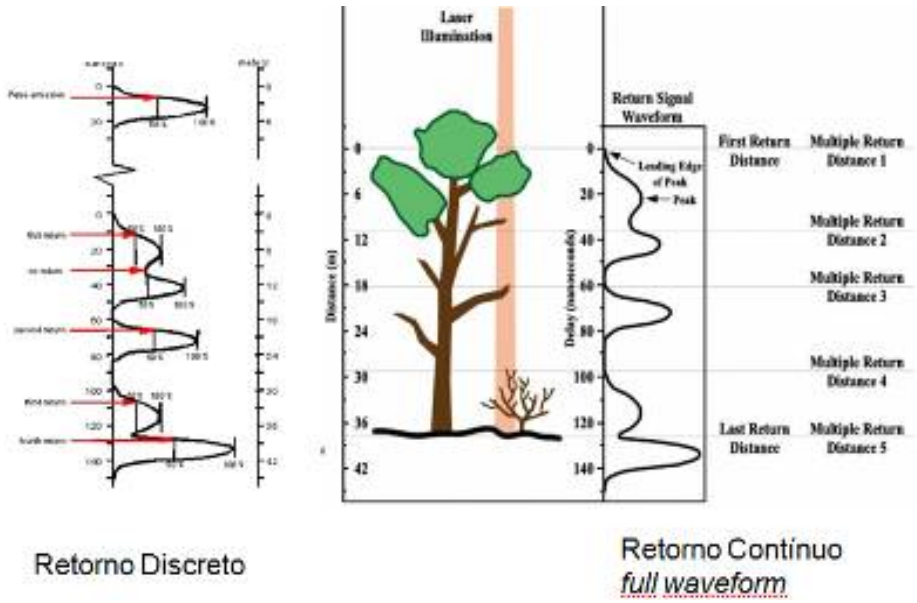


Fonte: Renslow (2012)

O dado primário, antes da classificação, é uma “nuvem de pontos” 3D composta de “retornos” discretos ou múltiplos, obtidos na reflexão da superfície “mista” atingida por cada pulso. Uma superfície homogênea em termos de interação com a energia incidente do pulso (por exemplo, uma rocha exposta) retornará uma única resposta com um único pico de energia, produzindo um único dado gravado para aquele pulso. A ocorrência de qualquer mistura de objetos produzirá tantos retornos quantos forem refletidos por essas diferentes superfícies, em consequência, diversos picos de energia refletida.

Os equipamentos têm capacidade de registro do retorno de duas formas, discreta ou contínua, conforme detalhes na figura 4.26 e explicação na sequência.

Figura 4.26 - Diferença entre Retorno Discreto e Retorno Contínuo

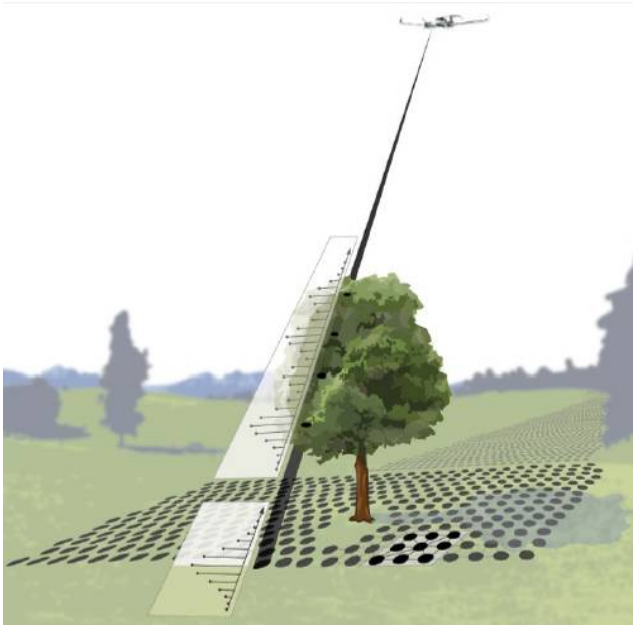


Fonte: ASPRS Disponível em: https://www.e-education.psu.edu/geog481/l1_p6.html

4.3.1. Retorno Discreto

Um filtro é aplicado para detecção dos picos da energia refletida e o instante desses picos é gravado como retorno discreto. Um pico é gerado na reflexão do topo de uma árvore, mas a energia ainda é suficiente para continuar a gerar retornos de partes interiores da árvore, até o solo (figura 4.27).

Figura 4.27 - Reflexão múltipla dos pulsos Laser (múltiplos retornos).



Fonte: Ullrich (2013)

Desde os anos 2000, os sistemas comerciais estão aptos a registrar múltiplos retornos discretos, o que viabilizou a classificação dos objetos reflexivos acima do solo. Quanto maior o número de retornos, maior o volume de dados armazenados, de tal forma que uma configuração de registro pode ter cinco, oito ou mais retornos, o que aumenta o volume de dados armazenados; a prática mostra que, em geral, três retornos produzem uma boa representação que considera o primeiro retorno para modelos de superfície (edificação, ponte, copa de árvore), o segundo retorno para separação de vegetação de objetos sólidos, e o último retorno para a superfície do solo.

O atributo “número” é indicado simplesmente por 1 (primeiro retorno), 2 (segundo retorno), 3 (terceiro retorno), 4 (quarto retorno), etc., dependendo da capacidade de registro de cada sensor.

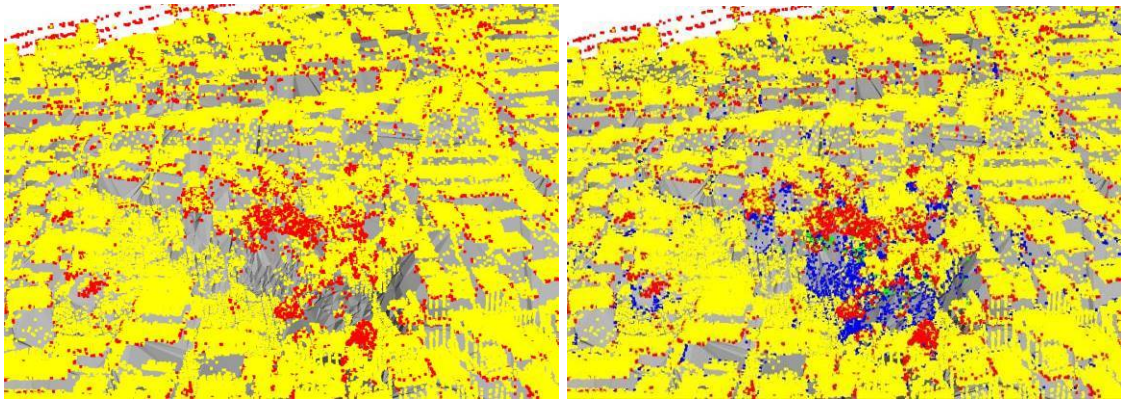
O atributo “camada” está relacionado ao “número”, mas leva em conta o total de retornos para um dado pulso, indicando uma classificação prévia. Normalmente os atributos são: Primeiro e único (*first-and-only*); Primeiro de muitos (*first-of-many*); Último de muitos (*last-of-many*); Intermediário (*intermediate*).

Há vários padrões para o atributo “classe”, mas o formato LAS permite que sejam definidas classes pelo próprio usuário, além daquelas pré-definidas pela ASPRS.

Uma visualização comparativa de um levantamento com apenas o primeiro retorno e todos os retornos, mostra a penetração na vegetação (figura 4.28).

Figura 4.28- - Resposta em único (a) e múltiplos (b) retornos

(a) (b)



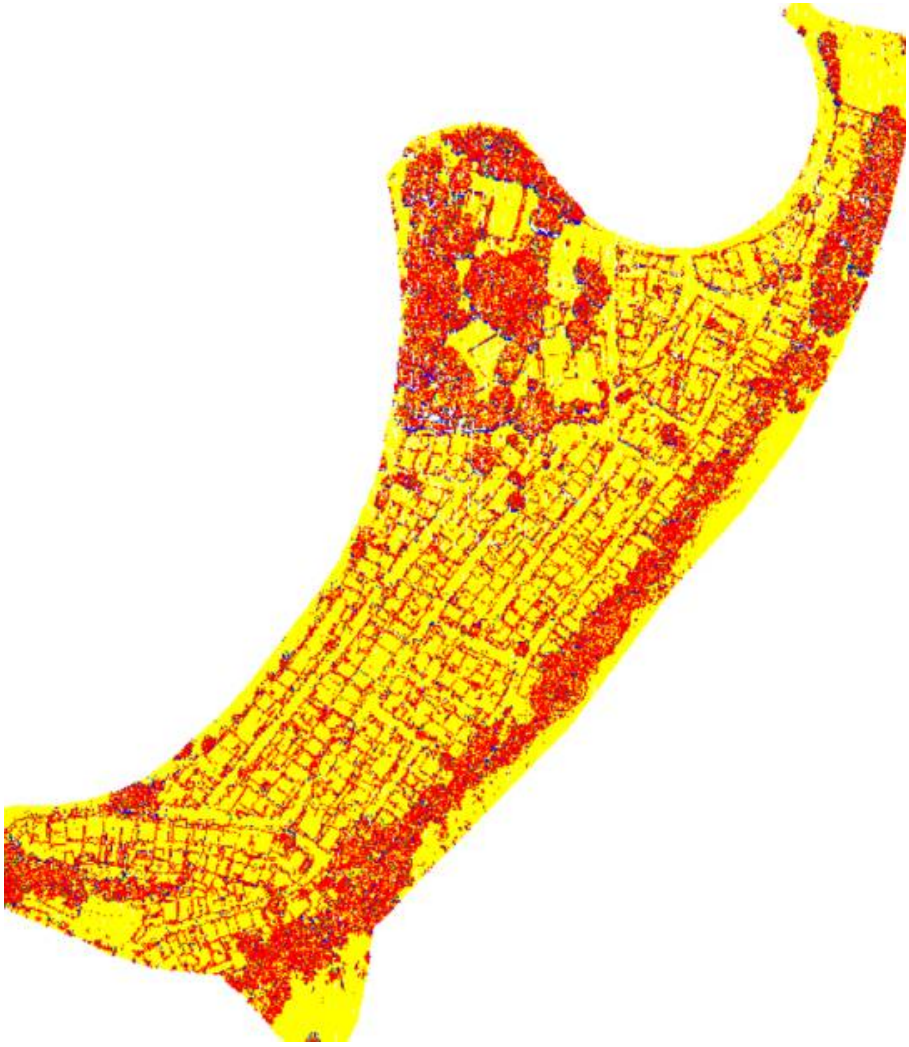
Pontos em amarelo são de único retorno (geralmente solo e parte interna de lajes); em vermelho o primeiro retorno; em azul e ciano são segundo e terceiro retornos. O terreno está em cinza

Fonte: Autor, a partir dos dados da Prefeitura de São Paulo

Na figura 4.28 as áreas de vegetação densa possuem múltiplos retornos (na imagem (b) da direita são visualizados todos os pontos obtidos), ao contrário de áreas edificadas com único retorno ou a copa das árvores das quais são destacados apenas pontos de primeiro retorno (na imagem (a) da esquerda em amarelo e vermelho respectivamente).

No pós-processamento os pontos podem ser identificados por atributos ou ser gerados arquivos separados, para primeiro, intermediário, último retorno e outros atributos (figura 4.29). A estrutura desses arquivos será discutida adiante nos padrões de dados (principalmente formato LAS).

Figura 4.29 - Nuvem de pontos com atributo de retorno: amarelo (único retorno), azul (2º retorno), ciano (3º retorno) e vermelho (1º retorno)



Fonte: Autor, a partir dos dados da Prefeitura de Campinas

Na figura 4.29 é visível a separação de feições como, solo e vegetação, único retorno e 1° retorno, respectivamente. Especialmente as edificações, possuem um único retorno na parte interna e múltiplos retornos nas bordas, produzindo uma visualização do delineamento dos seus contornos.

4.3.2. Retorno Contínuo

Tecnicamente é possível gravar a resposta contínua do retorno de cada pulso, e alguns sistemas disponíveis comercialmente já realizam esta operação. Esses dados representam um aumento de 30 a 60 vezes o volume de dados de retorno discreto. O custo de processamento é geralmente impeditivo tendo em vista aplicações de mapeamento básico de grandes áreas,

mas para aplicações em vegetação como densidade, fitossanidade, biomassa e em outros recursos naturais que se beneficiam de maior grau de precisão, representam uma tendência, sobretudo em vista dos avanços propiciados pelas pesquisas acadêmicas e processamento de grande quantidade de dados (big data).

No caso do formato *PulseWaves* proposto por Rapidlasso[22], o retorno contínuo de cada objeto é representado por uma onda completa da energia refletida em um arquivo Waves (extensão wvs) que armazena o formato da onda.

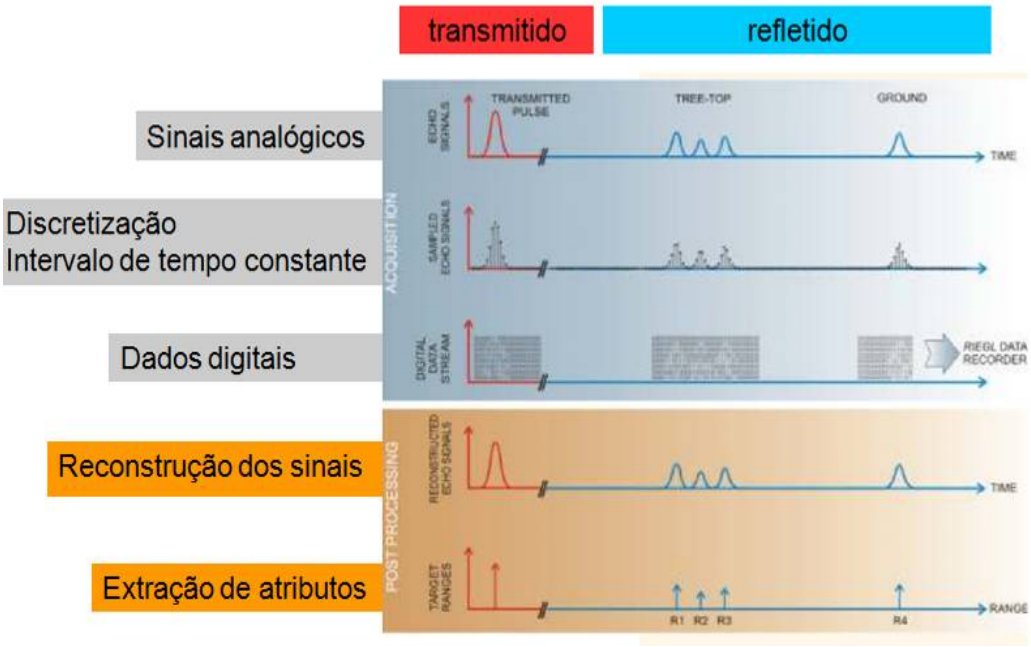
O sinal transmitido (em vermelho na figura 4.30) é adquirido inicialmente de forma analógica pelo receptor, seguido de três picos de energia refletida para galhos de uma árvore, por exemplo, e o último pico para o solo (a parte em azul representa a energia refletida e registrada pelo receptor).

O sinal analógico é amostrado a intervalos constantes de tempo (discretização) e em seguida convertido em dados (sinais) digitais armazenados para subsequente pós-processamento.

No pós-processamento o sinal pode ser reconstruído e analisado em detalhe para obtenção dos atributos desejados (distância, classe do objeto e outros parâmetros desejados).

[22] disponível em: HTTP://rapidlasso.com

Figura 4.30 - Aquisição e pós-processamento de dados de retorno contínuo.



Fonte: www.riegl.com

4.3.3. Intensidade do Retorno

Além da gravação do tempo de retorno do pulso, os sistemas permitem gravar a intensidade, ou magnitude do pulso; em outras palavras, não se registra apenas a ocorrência do pulso, mas também a potência do retorno.

Nos sensores de retorno discreto, a intensidade representa o pico das amplitudes refletidas pelo objeto, e seu valor é normalizado em uma escala de 8 a 12 bits.

Em geral, os objetos com alta refletividade (reflectância), tais como neve ou telhados metálicos, apresentam um retorno de alta intensidade comparado a objetos escuros, como asfalto, por exemplo. Esses valores de intensidade podem ser usados na criação de imagens normalmente por 256 tons de cinza (8 bits), sobrepondo uma grade matricial à nuvem de pontos Laser e associando o valor médio das intensidades dos pontos a cada pixel da imagem, produzindo resultado semelhante a uma imagem pancromática. Entretanto, a intensidade do sinal Lidar em um pixel, corresponde a

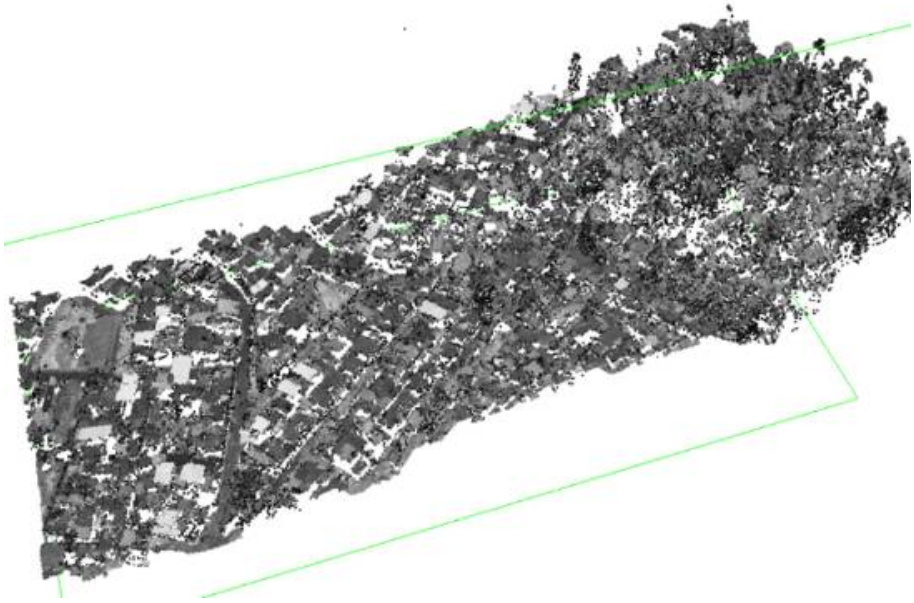
refletividade da superfície em relação ao comprimento de onda monocromático do Laser (banda estreita de 2 a 5 nm em torno de 1046 nm, por exemplo).

Jensen (2007) avaliou a possibilidade dos valores de intensidade serem analisados com as mesmas propriedades de reflectância do ‘infra vermelho próximo’ registrada por sensores passivos; no entanto, os resultados não foram satisfatórios devido à alta variabilidade ocorrida, além de anomalias como a inversão das respostas espectrais entre vegetação densa e rasteira. Entre outras razões, o autor aponta o retroespalhamento na vegetação densa como causa da redução da intensidade, a influência do material dos telhados de edificações, além da variação devido aos diferentes ângulos de incidência, diminuindo a intensidade para alvos mais distantes do nadir.

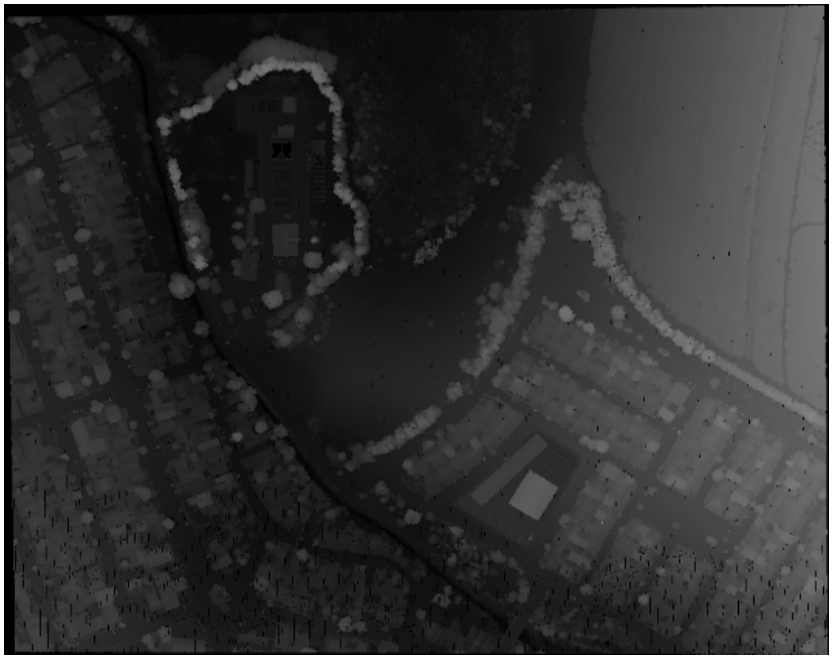
Não obstante, imagens de intensidade podem ser de grande valor como auxílio na interpretação e classificação dos retornos. Também é possível criar pares estereoscópicos dessas imagens de intensidade para auxiliar na extração de dados, processo denominado Lidargrametria. Renslow (2012) sugere a utilização da estereoscopia para obtenção de feições estruturantes do relevo, ou linhas de descontinuidade (no inglês *breaklines*) sem a necessidade de dados provenientes de outras fontes.

No presente trabalho espera-se extrair pelo processamento matricial das imagens intensidade (figura 4.31), principalmente as bordas das edificações.

Figura 4.31 - Imagens de intensidade do retorno



Mato Alto - Rio de Janeiro - RJ



Parque Oziel - Campinas - SP

Fonte: Autor

4.3.4. Formato e Resolução

Inicialmente os dados resultantes do aerolevantamento Lidar estavam disponíveis em formato ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*), o que acarretava dificuldades em função do tamanho

em bytes ser muito maior que formato binário, além de dificultar o armazenamento dos atributos como número do retorno, classificação, intensidade, ângulos, entre outros. Por isso, a estrutura binária tem sido utilizada para o armazenamento e o processamento desse grande volume de dados, inclusive com algoritmos eficientes de compactação (formato LASzip[23] ou LAZ, por exemplo).

O formato binário LAS proposto pelo grupo de trabalho da ASPRS rapidamente tornou-se o padrão, assimilado por toda comunidade técnica. A cada versão o padrão incorpora conhecimento adquirido pelos fabricantes de sensores, bem como necessidades dos usuários.

Foram definidos esquemas pré-definidos de classificação para os arquivos LAS, de forma a serem diretamente decodificados pelos aplicativos de análise e visualização desenvolvidos com estes propósitos (tabela 4.1).

Tabela 4.1 - Codificação LAS

0	Criado, não classificado
1	Sem atribuição
2	Solo
3	Vegetação baixa
4	Vegetação média
5	Vegetação alta
6	Edificação
7	Baixo ruído
8	Reservado
9	Água
10	Ferrovia
11	Pista de rodovia
12	Reservado
13	Rede elétrica (segurança)
14	Rede elétrica (distribuição)
15	Torre de transmissão
16	Conectores da rede elétrica, p. ex. isoladores
17	Pontes
18	Alto ruído
19 - 63	Reservado
64 - 255	Definíveis pelo usuário

Fonte: ASPRS, 2013

É importante ter em mente que os pontos coletados, embora contenham atributos físico-geométricos, não possuem informação semântica a

[23] disponível em HTTP://rapidlasso.com

respeito do alvo do qual foi refletido uma vez que essa informação é obtida pelo conhecimento de especialistas, automática ou manualmente. Assim, a definição dos atributos a serem gravados é fundamental para a exploração adequada do potencial dos dados brutos.

Outro aspecto do formato dos dados é sua estrutura originalmente vetorial, ou seja, definidos por coordenadas XYZ e atributos, o que representa uma diferença fundamental para os algoritmos e aplicativos de processamento de imagens matriciais. Um grupo de aplicativos atua diretamente sobre os dados vetoriais e outro converte esses dados em imagens matriciais, pixels em 2D e voxels em 3D por procedimentos diversos, mas que têm em comum as etapas sequenciais de segmentação e classificação de forma geral.

A versão 1.3 do LAS passou a armazenar dados derivados de equipamentos *fullwave form*. A USGS estabeleceu um padrão para a classificação de dados Lidar, uma “legenda” provisória (Heidemann, 2012).

A preocupação de produzir resultados estruturados segundo um padrão deve ser considerada desde o início do processo cartográfico, ou seja, avaliar as visões com foco nos dados - “*data driven*” no inglês - ou com foco no problema - no inglês “*problem driven*”.

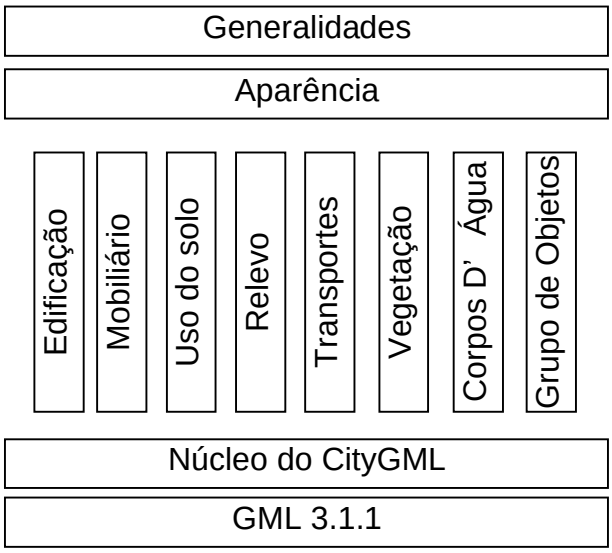
Nessa linha, a evolução dos modelos de dados que representam cidades e suas feições, visando o intercâmbio de dados e a interoperabilidade de sistemas, foi analisada pelo grupo SIG 3D (*Special Interest Group 3D*) da OGC (*Open Geospatial Consortium*), que baseados no esquema GML (*Geography Markup Language*) propuseram o padrão *CityGML*.

O CityGML adota quatro aspectos para uso de modelos 3D para cidades, quais sejam: semântico, geométrico, topológico e aparente. Todos os objetos podem ser representados em até cinco Níveis de Detalhe bem definidos (LOD0 a LOD4 - *Levels-Of-Detail*), com acurácia e complexidade estrutural crescentes, produzindo assim uma representação multi-escalar.

Desde sua versão 1.0.0 o CityGML é dividido em módulos verticais e horizontais (figura 4.32). Na vertical estão as diversas áreas temáticas do aspecto semântico (edificação, relevo, mobiliário urbano, uso do solo, corpo d’água, transportes, e ainda grupos de objetos). Na horizontal estão

definidas estruturas (Núcleo CityGML, aparência, genéricos) aplicadas aos módulos temáticos.

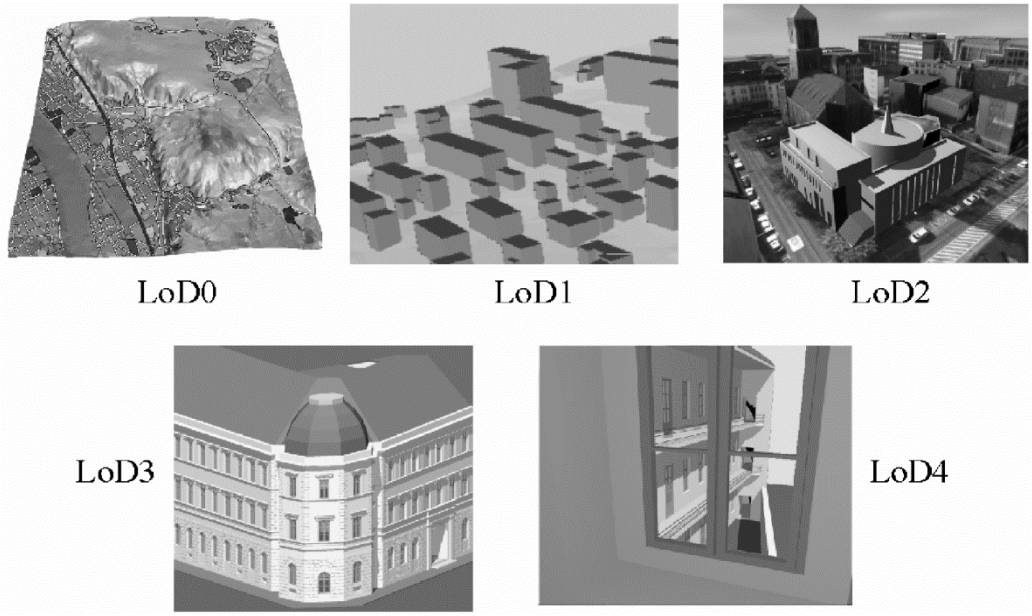
Figura 4.32 - Módulos do CityGML versão 1.0.0.



Fonte: Traduzido de Kolbe (2009)

No CityGML um mesmo objeto, pode ter seus dados representados em diferentes LODs simultaneamente, viabilizando sua análise e visualização para diferentes graus de resolução (figura 4.33). O nível mais grosseiro LOD0 é essencialmente um MDT 2,5D ou um MDS - modelo digital da superfície, ou seja, pixels com valores da altitude ou altura, seja qual for o objeto, terreno, edificação ou vegetação; o LOD1 é o modelo de blocos sem a estrutura dos telhados; uma edificação no LOD2 tem telhados individualizados e estruturas como sacadas e escadas; LOD3 representa modelos arquitetônicos com detalhes de paredes e telhados, portas, janelas e reentrâncias; LOD4 completa o LOD3 adicionando estruturas internas como salas, escadas e móveis. Além de edificações, o conceito de LOD aplica-se a outras classes de objetos (Kolbe, 2009).

Figura 4.33 - Cinco Níveis de Detalhe (LODs - *Levels-Of-Detail*) definidos pelo padrão CityGML.



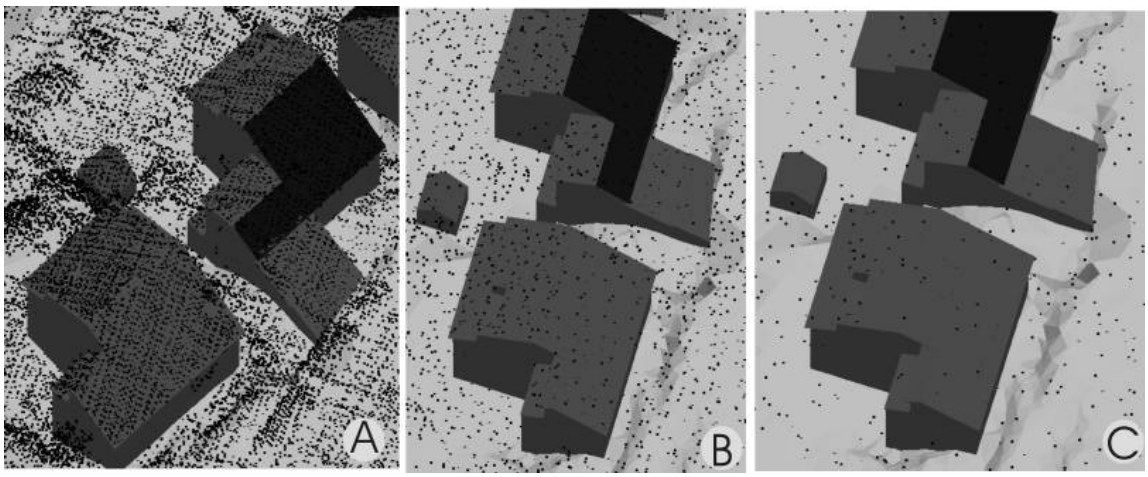
Fonte: Kolbe (2009)

Há uma relação direta entre o Nível de Detalhe almejado e a resolução dos dados primários coletados por sensores remotos.

Uma vez que os sensores Lidar aerotransportados alcançam precisão e densidade de pontos suficientes para o mapeamento de feições urbanas individuais, como edificações, obras de arte, equipamentos urbanos, etc., a especificação técnica de configuração do sistema Lidar passa a ser um fator fundamental para seu efetivo uso e aplicação adequados.

A densidade dos pontos levantados varia em função do ângulo de varredura, altura e velocidade da aeronave e por fim, do material do objeto alvo e principalmente do número de pulsos emitidos por segundo, que é um fator configurável (figura 4.34).

Figura 4.34 - Exemplos de densidade de varredura Lidar:
(a) 20 ppm^2; (b) 10 ppm^2; (c) 1 ppm^2.



Fonte: Čekada et al., 2010.

Čekada et al. (2010), compararam os mesmos alvos varridos com diferentes densidades visando avaliar o grau de precisão e qualidade dos produtos cartográficos decorrentes.

Alguns aspectos relevantes são analisados com vistas aos resultados possíveis, especialmente para os objetivos almejados. Por exemplo, se o objetivo é mapear áreas urbanas densas e verticalizadas, o uso de faixas de voo sobrepostas é mais adequado do que uma única faixa com especificação de alta densidade. Por outro lado, para mapeamento de vegetação deve-se levar em conta os múltiplos retornos e a densidade resultante nos dados para processamento. Na especificação técnica do aerolevantamento deve-se levar em conta a diferença entre densidade nominal e efetiva e avaliar os custos de voo em relação aos dados que se pretende obter.

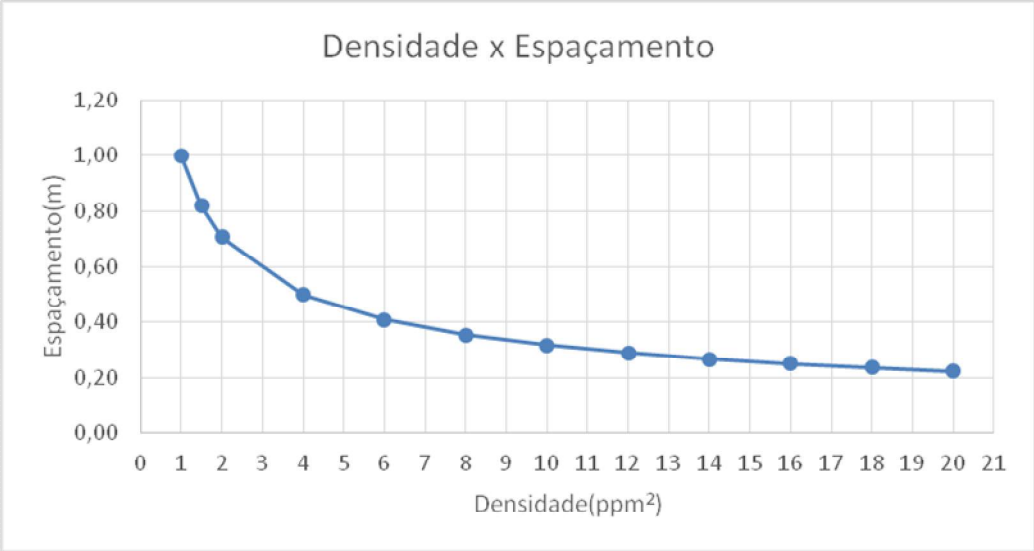
A especificação da densidade tem consequência para as aplicações também em função do espaçamento. A tabela 4.2 e o gráfico 4.1 a seguir, relacionam de forma direta os dois valores pela relação: (Espaçamento = 1 / √Densidade)

Tabela 4.2 - Relação densidade e espaçamento

densidade(ppm^2)	espaçamento(m)
1	1,00
1,5	0,82
2	0,71
4	0,50
6	0,41
8	0,35
10	0,32
12	0,29
14	0,27
16	0,25
18	0,24
20	0,22

Fonte: Autor

Gráfico 4.1 - Relação densidade e espaçamento



Fonte: Autor

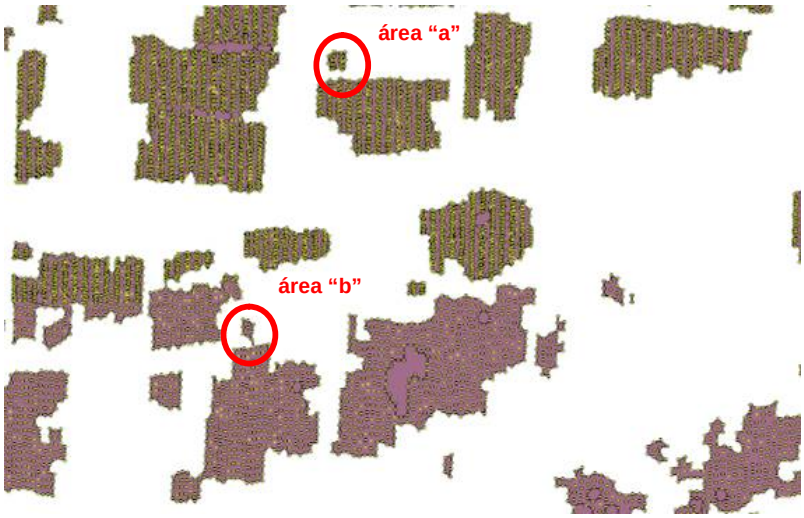
No caso de duas faixas de voo sobrepostas, teoricamente a densidade dobra, entretanto, a perda em função da verticalização dos objetos torna a densidade efetiva menor também nesses casos.

Uma hipótese, é que o recobrimento a partir de origens diferentes (faixas de voo paralelas ou cruzadas) produz melhor densidade efetiva do que uma equivalente em faixa única. Ou seja, uma densidade nominal especificada

para 4 ppm^2 seria dobrada em áreas de sobreposição para 8 ppm^2 e o resultado mais adequado que uma especificação de 8 ppm^2 em faixa única

Os dados Lidar da área de Porto Príncipe - Haiti disponíveis com densidade nominal de 4 ppm^2, são apresentados na figura 4.35.

Figura 4.35 - Diferença entre delineamento de edificações para áreas com maior densidade, devido à sobreposição de faixas.



Fonte: Dados de Porto Príncipe - Haiti, processados pelo autor.

Uma comparação simples pode ser feita nas duas áreas em destaque. A área "a" situada em uma região coberta por duas faixas de voo possui densidade maior e duas edificações próximas foram delineadas; na área "b" uma situação semelhante de duas edificações os polígonos foram conectados, delineando erroneamente como uma única edificação. Ver Paula (2017).

4.4. Processamento dos dados

No que diz respeito ao processamento, há uma variedade de opções, uma vez que a conversão vetorial / matricial e vice-versa é factível e comum principalmente para que sejam usados algoritmos já existentes para imagens matriciais e adaptados para os dados Lidar.

Esses conceitos possuem vasto material de referência e estão em pleno desenvolvimento, de tal forma que o presente texto aponta os principais métodos aplicáveis ao tema deste trabalho. A escolha adequada talvez seja o principal desafio do usuário da tecnologia. O conhecimento do problema por

parte do urbanista, que pretende mapear assentamentos precários, o diferencial do desenvolvedor dos algoritmos por necessitar da visão geral do processo, buscando o melhor resultado mesmo que abra mão do melhor desempenho computacional.

Brito (2010, p.56) sintetiza os métodos no processamento de imagens visando a classificação, segundo suas principais etapas desde a escolha da ‘unidade espacial de análise’, que depende diretamente do objeto de interesse, do sensor disponível e até da ‘técnica de classificação’, que pode apresentar resultados diversos conforme a lógica de ‘separação’ e ‘pertinência’ das classes, bem como a ‘participação’ do analista.

Machado (2006) partiu das informações disponibilizadas por uma imagem digital e por uma varredura Lidar, reforçando a natureza complementar destas duas fontes de dados, e mencionando diversos trabalhos realizados ao longo dos anos. As soluções híbridas de processamento tendem a aumentar em função da crescente produção de dados, tanto matriciais quanto vetoriais.

A terminologia adotada varia de autor para autor, e assim os conceitos devem ser entendidos no contexto de uso e aplicação. Vale destacar que as duas abordagens no processamento são válidas nessa síntese das metodologias. Nas duas últimas décadas o avanço e a disponibilidade de software criaram um arcabouço associado quase que exclusivamente para análise de imagens matriciais, enquanto os trabalhos com imagens vetoriais, ficou reservado às aplicações de projetos CAD. Entretanto, a evolução mais recente dos dados vetoriais Lidar trouxe ferramentas específicas para seu processamento.

Os termos adotados aqui são: *Segmentação*: agrupamento e separação por critérios de semelhança; *Filtragem*: redução dos dados de processamento de acordo com critério específico; *Classificação*: tematização, separação, qualificação, atribuição; *Generalização*: representação dos dados de saída de forma agrupada; *Objetos*: elementos individualizados caracterizados por atributos.

Além da base matemática envolvida, quatro grandes etapas são descritas a seguir: Filtragem, Segmentação, Delineamento, Edição e Controle de qualidade.

4.4.1. Filtragem

Axelsson (2000) considera “filtragem” a remoção ou identificação de determinados pontos, menos significativos, em função de outros que já representem bem o objeto desejado. Como exemplos disso cita a remoção dos primeiros retornos para que se obtenha nos últimos a representação somente do terreno, e os múltiplos retornos que podem indicar a mistura de solo e vegetação no mesmo campo de visão (*instantaneous field of view* - IFOV ou *footprint*).

O grau de automação dos algoritmos já implementados é alto, mas ainda necessitam da ação do usuário para o estudo e definição de parâmetros adequados às circunstâncias locais derivadas do equipamento, dos alvos e da disponibilidade de dados auxiliares. Outro fator limitante é o poder de processamento, fazendo-se necessário subdividir a área levantada em partes menores para posterior mosaicagem, tarefas que exigem funcionalidades específicas.

A filtragem automática pode ser subdividida em: Remoção de ruídos; Separação solo/outros; Geração do MDT bruto.

A princípio, o arquivo LAS original não deve ter pontos eliminados, adicionados ou alterados (altitude), mas sim contar com a inserção de atributos para cada ponto com suas características adicionais (*flags*). Normalmente os conjuntos de pontos (retornos) são editados várias vezes para inserção dos atributos “número”, “camada”, e “classe” entre outros.

Em um projeto que tenha como produto final o MDT (apenas a superfície do terreno sem outros elementos), são recomendadas no mínimo as seguintes categorias: Solo; Acima do solo (árvores, edificações, veículos, postes, pontes, etc.); Água; Ruído.

O primeiro passo é identificar e eliminar os ruídos, que são pontos com valores extremamente altos ou baixos em relação às altitudes da área do projeto. Essas anomalias na altitude podem ser causadas por brumas de

fumaça, aerosóis atmosféricos, pássaros, antenas de telefonia (ou outra), aeronaves a baixa altitudes que registram valores mais altos que a superfície mapeada, ou ainda por multicaminhamento das ondas laser que registram valores mais baixos que o solo. Embora os ruídos sejam provavelmente removidos automaticamente, é interessante que sejam removidos assim que detectados, e mesmo antes do processamento.

Uma forma de auxílio visual à detecção é a geração de uma graduação de cores associada a altitude (hipsometria coroplética) como um mapa temático, de tal forma que a ocorrência de ruídos torna a representação irreal visualmente.

Os filtros de banda, usualmente adotados em processamento de imagens matriciais, podem ser usados para detecção de bordas que representem bruscas variações na altitude além de limiares realistas pré-fixados.

Esses e outros procedimentos semelhantes, possibilitam associar então o ponto à classe 7 (tabela 4.1, pag. 77), reservada para Ruído (*low point*) do arquivo LAS, que passa a ser um ponto ignorado nas análises posteriores de visualização e morfologia.

Nos sistemas multi-retorno, a ocorrência de um único retorno indica que o ponto incide sobre um objeto de superfície sólida (principalmente solo, edificação ou via), o que possibilita uma primeira aproximação para criação de uma camada denominada “primeiro e único”. Caso ocorram múltiplos retornos a partir de um único pulso emitido, há probabilidade do pulso ter incidido sobre algum tipo de vegetação, uma borda ou algum objeto sobre o solo, como um poste, por exemplo. Neste caso o ponto é classificado como a camada “primeiro de muitos”. A camada “último de muitos” agrupa os pontos com o último retorno registrado como atributo e dessa forma todos outros pontos recebem o atributo de camada “intermediário”.

As camadas “primeiro e único” e “último de muitos” agrupam pontos candidatos à superfície do solo (solo exposto), embora ainda possam ocorrer outras feições nesse grupo, e por isso podem ser consideradas uma pré-classe.

Filtros automáticos são implementados nos aplicativos específicos de processamento Lidar, mas há inúmeros aplicativos proprietários e livres que podem ser módulos de softwares multitarefa (aplicativos GIS/CAD); o melhor exemplo é o LAStools (Isenburg, 2016) que foi adotado nesta pesquisa para todo o processamento da nuvem de pontos.

Filtros automáticos procuram identificar uma superfície de tendência e os pontos pertencentes àquela superfície são classificados como “solo”, por exemplo. A chave para a filtragem satisfatória é a definição dos parâmetros adequados ao tipo de superfície (plana, ondulada, montanhosa) e o tipo de cobertura (vegetação esparsa, média ou densa), ainda que variem internamente, para remover o máximo de feições não-solo, sem que sejam confundidas com acidentes naturais do relevo como bordas (bermas, por exemplo) ou excluídas como feições naturais existentes.

Filtros adaptativos também foram desenvolvidos para delimitar essas áreas, de forma a definir parâmetros locais automaticamente durante o processo de filtragem.

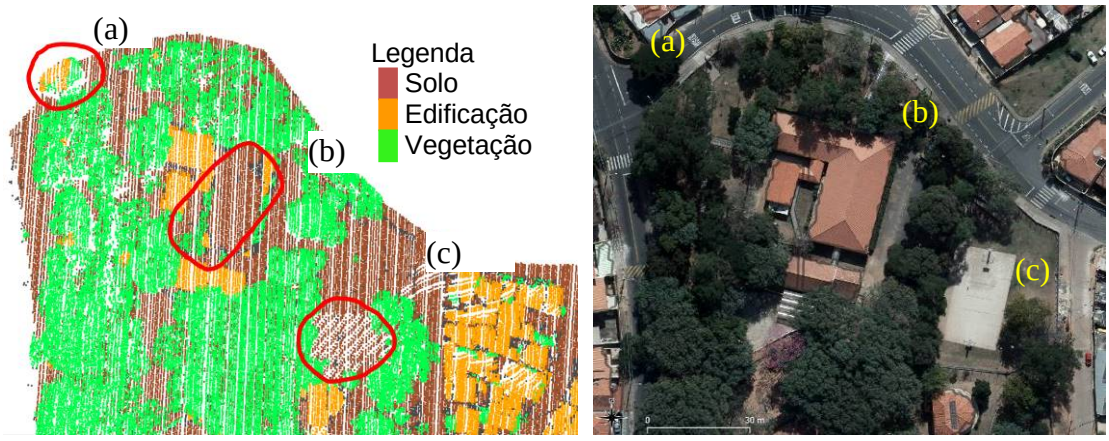
A filtragem automática pode remover até 90% das feições sobre o solo, dependendo da complexidade do terreno e da cobertura da área de projeto. Ainda assim, a classificação dos pontos não-solo com nível de qualidade superior é um desafio a ser superado (figura 4.36).

Figura 4.36 - Problemas de classificação automática:

(a) confusão (comissão) em objeto de geometria semelhante de edificação;

(b) confusão (omissão) em objeto de geometria semelhante de edificação;

(c) ruído/perda na aquisição dos dados



Fonte: Prefeitura de Campinas

Na separação ou filtragem do solo em relação a outros alvos, o algoritmo de Axelsson (2000) é amplamente utilizado, por meio de um refinamento iterativo de uma TIN, com a vantagem de evitar alguns cálculos trigonométricos complexos. A evolução desse algoritmo com a aplicação de filtros progressivos, levou ao desenvolvimento de filtros morfológicos mais eficientes (Zhang et al., 2003) e aderentes a diferentes tipos de alvos (cobertura densa do solo por vegetação ou edificações). O termo “progressivo” surgiu em função do crescimento gradativo da janela do filtro com limiares para diferença de altura entre pontos vizinhos. Veículos, vegetação e edificações são removidos, e o terreno preservado. O processamento considera apenas o último retorno, mas é possível alterar a leitura para todos os retornos.

O algoritmo de Axelsson (2000) pode ser sintetizado pela avaliação da pertinência dos pontos aleatórios da nuvem a uma superfície contínua, a TIN (Triangular Irregular Network). A TIN é construída iterativamente até que parâmetros de pertinência atinjam os limiares estabelecidos. O termo “adaptativo” é usado na medida em que os parâmetros inicialmente estimados a partir dos dados brutos, são adaptados e alterados durante o processamento.

O algoritmo é dividido em três etapas: Estimativa dos parâmetros; seleção do ponto inicial (semente); adensamento da TIN.

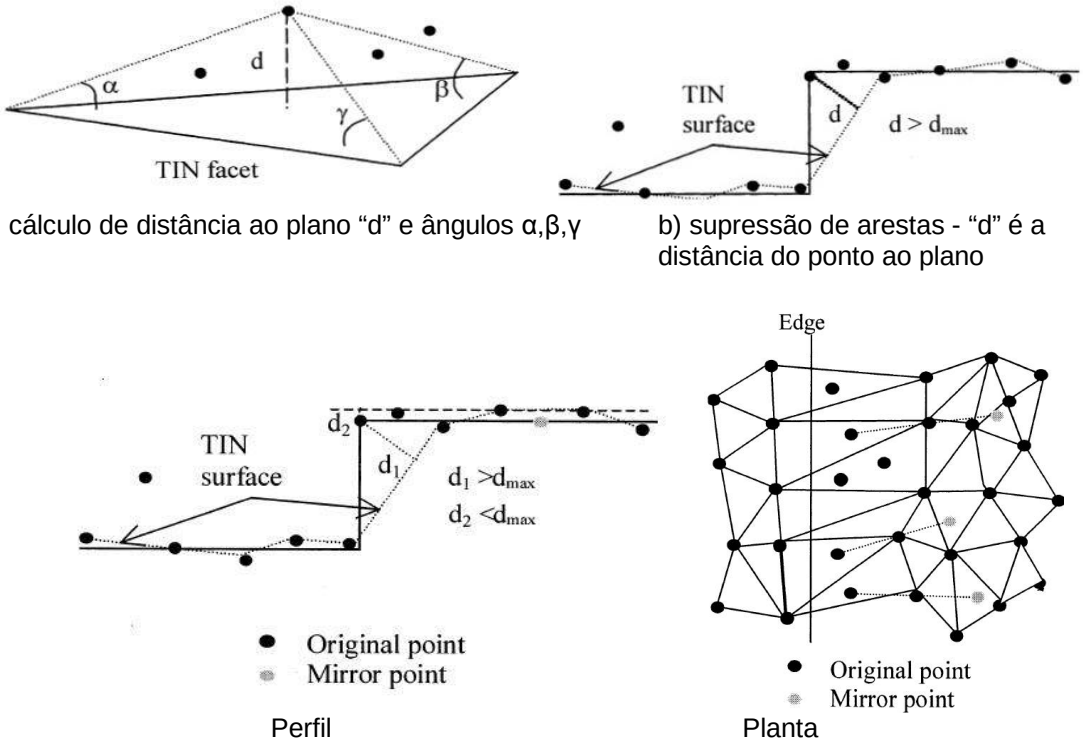
Os parâmetros iniciais derivados dos dados são o comprimento das arestas, a distância das faces triangulares e os ângulos nos vértices; esses são obtidos com base no valor das normais às faces triangulares e na diferença de elevação.

Os pontos iniciais são selecionados dentro de uma grade definida pelo usuário com base nas maiores feições de interesse, p. ex. a maior edificação da área em análise.

Para cada iteração, em cada face TIN, um ponto de cada vez é testado por limiares. Os principais valores de comparação são a distância ao plano e os ângulos nos vértices (figura 4.37 - a), assim as arestas que não atendem aos limiares são suprimidas (figura 4.37 - b) e os pontos restantes são

projetados na face mais próxima e a cada iteração uma nova triangulação é calculada (figura 4.37 - c, em perfil e em planta). O processo iterativo termina quando os valores limiares não exijam a adição de mais nenhum vértice à TIN.

Figura 4.37 - Algoritmo de Axelsson.



a) cálculo de distância ao plano “d” e ângulos α,β,γ

b) supressão de arestas - “d” é a distância do ponto ao plano

c) projeção de pontos = novos vértices (mirror point) e arestas em trecho descontínuo (d1>dmax)

Fonte: Axelsson, 2000

O resultado após o processamento é a eliminação da vegetação e de edificações para representação unicamente do terreno (figura 4.38).

Figura 4.38 - Dois dos resultados de Axelsson: Perfil antes e depois da filtragem.

Fonte: Axelsson, 2000

O resultado satisfatório da filtragem pode ser visto pela comparação dos perfis resultantes representando exclusivamente o terreno da figura 4.38, sendo os dois casos, (a) vegetação e (b) edificação, representativos para o objetivo de eliminar os pontos Lidar que não pertencem à superfície do terreno.

Para realizar a filtragem são necessários os seguintes parâmetros[24]:

- Passo (*step*): raio de busca (em metros) inicial de pesquisa dos pontos vizinhos;

- Relevo (steep-hills): configura quão densa ou rarefeita é a busca inicial por pontos do solo;

- Subtração (*sub*): classe a ser ignorada, normalmente quando identificados os ruídos (classe 7);

- Saliência (*bulge*): por padrão é configurado como um décimo do “passo”, e tem relação direta com o “intervalo”, pois busca o limite máximo para um triângulo da TIN conter o ponto analisado;

- Pico (*spike*): limite para considerar valores de desnível do terreno;

[24]No software *lastools*, o comando disponível é denominado *lasground*

- Intervalo (*offset*): tolerância para considerar um ponto pertencente a um plano determinado por um triângulo da TIN, também chamado planaridade.

Planaridade é o critério limiar para considerar os pontos em análise pertencentes ou não ao plano definido por pontos previamente considerados. No processo iterativo, a condição é testada a partir do plano hipotético de ajuste dos pontos incluídos no conjunto pela equação geral z = f (x,y).

Entretanto para superfícies rugosas (vegetação principalmente), é preciso considerar limiares maiores dentre vários planos, e para isso é calculada a média do resíduo absoluto entre esses planos, buscando a caracterização do conjunto como único segmento. Coberturas irregulares de uma edificação podem ilustrar essa situação.

A atribuição da classe a cada ponto depende finalmente dos parâmetros[25]:

- Altura mínima de objetos (*ground offset*): somente serão analisados para classe edificação os pontos com altura superior a este limiar;

- Desvio do plano (*building planarity*): a análise de vizinhança utiliza este limiar para diferença entre o plano normal ao ponto em análise e seu vizinho;

- Rugosidade (*ruggedness*): para diferenças acima deste limiar entre o plano normal e o ponto em análise, é atribuída classe vegetação alta;

- Área de pesquisa (*search area size*): limiar para distância de busca de pontos próximos ao plano normal.

4.4.2. Segmentação

Dada a importância do processo de segmentação, a breve explanação conceitual a seguir, adequada principalmente às imagens

[25] No software *lastools*, o comando disponível é denominado *lasclassify*

matriciais, também é válida e fundamental no desenvolvimento dos algoritmos de utilização direta sobre a nuvem de pontos vetorial.

A segmentação surgiu para superar as limitações da análise espectral pixel-a-pixel em uma etapa anterior à classificação, de tal forma que as regiões resultantes (são áreas denominadas segmentos) passem a ser tratadas como objetos homogêneos. O *crescimento de regiões* é um dos métodos de verificação dessa uniformidade.

Na técnica de crescimento de regiões o agrupamento dos dados ocorre somente em regiões espacialmente adjacentes. Inicialmente, cada ponto considerado como “semente” define uma região distinta e tem um critério de similaridade para cada região adjacente (calculado em pares de regiões segundo um teste de hipótese estatístico).

A seguir, divide-se a área em um conjunto de subáreas e então realiza-se a união entre elas, segundo um limiar de agregação definido. Regiões vizinhas podem ser unidas, conforme critérios de homogeneidade ou propriedades comuns (pertinência a um mesmo plano, por exemplo).

Os segmentos podem então ser delineados como polígonos que armazenam atributos relativos aos pontos neles contidos, como média, matriz de covariância, área e outros.

4.4.3. Delineamento

O algoritmo adotado para geração de polígonos côncavos foi baseado no K-vizinho mais próximo. Uma opção limita-se ao critério geométrico e outra faz uso da segmentação realizada anteriormente.

O algoritmo gera um polígono côncavo a partir de um conjunto selecionado de pontos pelo critério de vizinhança. O número de vizinhos determina a concavidade do polígono. Um valor menor de vizinhos resulta em um delineamento por muitos pontos e representa um contorno mais fiel a forma irregular dos pontos. Um valor maior de vizinhos resulta em um contorno mais suave e simplificado do polígono, que no limite resulta em uma forma convexa. O número mínimo de vizinhos é três.

Ao optar por considerar um atributo dos pontos, o número do segmento, por exemplo, o algoritmo irá agrupar exclusivamente pontos de mesmo valor, delineando assim planos segmentados previamente.

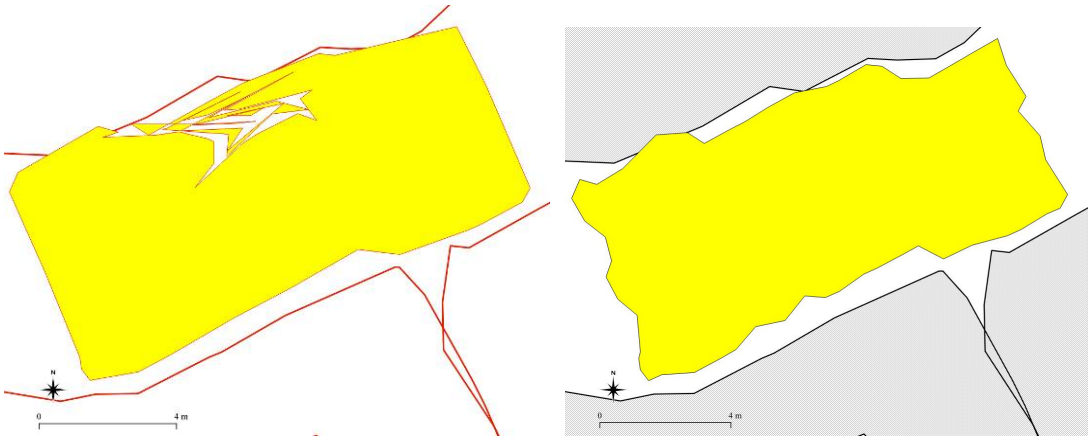
As etapas do algoritmo são: (a) Criação da triangulação de Delaunay; (b) Pesquisa das bordas de maior comprimento e eliminação de arestas menores que o limiar estabelecido; (c) Remoção das arestas internas e agregação de triângulos (“dissolver” a triangulação)

No lastools o parâmetro principal é denominado concavidade (*concavity*) para eliminar os triângulos de arestas menores que esse valor. Concavidade é o valor em metros da menor feição que se deseja contornar, e recomenda-se (Isenburg, 2016) que seja 2 a 3 vezes o espaçamento médio da nuvem de pontos inicial.

4.4.4. Edição

Dependendo do parâmetro adotado no delineamento, o traçado pode ocasionar problemas topológicos que devem ser solucionados manualmente ou pela alteração dos parâmetros de forma recursiva. Assim, uma primeira iteração produz resultados satisfatórios para 90% dos polígonos e os 10% restantes são processados com outro parâmetro mais adequado. Na figura 4.39 é apresentado um exemplo do tipo de problema decorrente da definição do número de vizinhos.

Figura 4.39 - Verificação topológica e parâmetro K-vizinho mais próximo



número de vizinhos = 200 (1ª iteração) número de vizinhos = 20 (2ª iteração)

O restante dos pontos não filtrados/classificados automaticamente deve ser analisado visualmente e seus atributos definidos manualmente, processo que envolve interação do operador com os dados em tela, familiaridade com a paisagem e conhecimento dos princípios fundamentais de mapeamento, convenções e ainda as melhores práticas da área específica da aplicação.

A classificação manual e controle de qualidade representam um grande desafio, uma vez que consomem 60 a 80% do tempo de processamento (Flood, 2001), justificando a necessidade de mais pesquisa em automação.

Existem aplicativos específicos para este tipo de edição 3D, que produzem modelos do terreno (MDT), da superfície (MDS), triangulação (TIN), curvas de nível e linhas de descontinuidade (*breaklines*), passíveis de visualização e edição para o controle de qualidade.

O trabalho manual de edição representa a maior fração de tempo gasto para a produção dos modelos tridimensionais, embora apenas algo em torno de 10% dos pontos estejam envolvidos nessa etapa. O cumprimento dos requisitos de precisão e acurácia vertical é uma etapa crítica do processo; a análise da fidelidade do terreno depende da correta remoção de feições “não solo” (vegetação, edificação, veículos, torres, etc.).

Na medida da disponibilidade, dados auxiliares podem melhorar muito a qualidade da classificação manual, principalmente ortofotos da mesma época, ou na sua ausência as imagens de intensidade do próprio Lidar. Um caso comum de erro de classificação ocorre quando a vegetação arbórea tem, como resultado da poda, um formato regular e plano, sendo detectada como edificação pelo parâmetro de planaridade (Figura 4.40)

Figura 4.40 - Edição manual com base na ortofotos do mesmo voo para revisão da classe vegetação decorrente da confusão com edificação pela planaridade

Fonte: Prefeitura de Campinas - SP

Os recursos de visualização têm sido aprimorados para melhorar as condições de edição, de forma a variar a representação e sobreposição com imagens transparentes.

A edição pode ocorrer individualmente ou sobre grupos de pontos a partir da decisão do operador/editor.

4.4.5. Controle de qualidade

O controle de qualidade dos produtos de um aerolevantamento obedece a um processo conhecido, entretanto as características dos dados Lidar merecem atenção em função de seu uso mais recente. Dados inerentes ao sensor, ainda são ignorados por desconhecimento da sua utilidade na verificação da qualidade. Isenburg (2016) menciona por exemplo, a importância dos dados de orientação do próprio sensor Lidar em conjunto com parâmetros dos sistemas inercial e GPS para correção do deslocamento horizontal e vertical entre faixas que se superpõem.

Quanto à qualidade da detecção de feições vetoriais a comparar com os pontos Lidar para qualificação dos resultados, Rutzinger et al. (2009)

relatam em sua revisão, a avaliação segundo três critérios, que geram resultados diferentes para uma mesma situação. São os seguintes:

a) A estrutura dos dados: pixels/voxels ou objetos/formas projetadas em planta.

b) Qual dos objetos deve ser considerado “correto” uma vez que todos são derivados de processos e dados diversos.

c) As formas de comparação propriamente ditas, que podem ser visuais ou automáticas.

Rutzinger et al. (2009) destacam a falta de padronização em técnicas de avaliação dos algoritmos ou soluções para detecção de feições, e por isso destacam a metodologia baseada em objetos (polígonos delineados) e argumentam que “os resultados na avaliação de qualidade por pixel podem apresentar distorções de até 30% no delineamento de edificações”.

Na avaliação da classificação, embora Ouder Elberink et al. (2012) não tenham levado em conta a influência da densidade nominal do levantamento, consideraram os seguintes atributos para cada “segmento”: (a) Número de pontos; (b) altura sobre o terreno; (c) razão entre pontos não-segmentados / segmentados; (d) planaridade; (e) desvio padrão da intensidade.

O resultado numérico da avaliação considera a qualidade uma classe correta ou não segundo o grau de integridade (*completeness*) e de acurácia (*correctness*). Se há correspondência entre o objeto classificado e o objeto de referência, ou de validação, considera-se como Verdadeiro Positivo (VP), do contrário como Falso Negativo (FN). Segmentos Falso Positivos (FP) são classificados como edificações suprimidas. Um objeto Verdadeiro Negativo (VN) pertence a outra classe (em geral terreno) tanto na referência quanto no resultado da classificação. (Shufelt, 1999)

O nível de qualidade dos resultados é calculado conforme as duas métricas “integridade” e “acurácia”, segundo Rutzinger et al. (2009):

Integridade = VP / (VP + FN)

Acurácia = VP / (VP + FP)

Qualidade = VP / (VP + FP + FN)

A verificação da precisão posicional é realizada pela comparação numérica das coordenadas dos pontos análogos na imagem e no controle. Essa verificação pode ser realizada em X Y Z ou somente em Z quando o ponto encontra-se em uma superfície suficientemente plana e estável para tal.

No Brasil utilizam-se os procedimentos estabelecidos pelo Decreto de 1984[26] para os Padrões de Exatidão Cartográfica (PEC) e revistos para produtos digitais na Especificações Técnicas para Estruturação de Dados Geoespaciais Vetoriais (ET-EDGV)[27].

[26] http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1980-1989/D89817.htm

[27] http://www.geoportal.eb.mil.br/index.php/inde2?id=139

III METODOLOGIA E ESTUDOS DE CASO

Capítulo 5. Metodologia

Neste capítulo a descrição da metodologia é apresentada inicialmente de forma genérica, com a descrição dos procedimentos operacionais no item 5.1 para, em seguida, mostrar sua aplicação nas áreas de estudo no item 5.2.

A metodologia engloba desde a "linha de produção de dados"[28] adquiridos por sensores Lidar aéreos até o mapa da ocupação, incluídos atributos de área construída para edificações em setores subnormais, buscando responder às perguntas associadas à hipótese lançada previamente de delinear edificações e gerar métricas comparáveis.

A metodologia está pautada nos estudos de Yu et al. (2010) e González-Aguilera et al. (2013), além de utilizar o Levantamento de Informações Territoriais (LIT) do IBGE como referência para os aglomerados de setores subnormais. A principal contribuição deste trabalho no processamento de dados Lidar, decorre da metodologia de Jarzabek-Rychard & Borkowski (2016) adaptada para segmentação de edificações em assentamentos precários.

O principal objeto de investigação é a obtenção de um índice adequado para caracterizar a densidade construída, de tal forma que expresse numericamente as diferenças entre setores censitários subnormais. A partir dos estudos de Yu et al. (2010) e González-Aguilera et al. (2013), o uso do coeficiente de aproveitamento é generalizado para áreas maiores que um lote, como normalmente é utilizado no cadastro urbano, e assim representar a relação entre área construída e área de terreno, para o todo um setor.

A caracterização dos Aglomerados Subnormais do IBGE, realizada no levantamento do IBGE (LIT)[29] que ocorreu em todo país para o censo de 2010, foi o ponto de partida desta análise, e registrou os critérios topografia e declividade (item 2.2.1), circulação/acesso (item 2.2.2) e

[28] Do inglês "pipeline", especificamente uma "linha de produção de dados", é um termo geral para um processamento em série ou paralelo que mova dados de uma fonte para um destino.

[29] No item "morfologia de assentamentos precários" da revisão de literatura descreve-se o LIT com mais detalhe.

espaçamento e densidade (item 2.2.3). Os métodos e procedimentos para obtenção de valores associados a esses critérios são descritos a seguir, com especial detalhamento para a verticalização como aspecto fundamental da densidade, merecendo um item adicional na análise.

Os critérios adotados e suas respectivas métricas, com limiares de classificação, quando for o caso, são:

1. Topografia e declividade:
   Plana (5%), moderada (5 a 30%), acentuada (maior que 30%);
2. Verticalização:
   Número de pavimentos/andares (um, dois e três ou mais);
3. Espaçamento das edificações:
   Nulo, médio ou grande;
4. Circulação/acesso interno:
   Largura (menos ou mais de 4m) e comprimento das vias.

O recorte territorial desta pesquisa para aplicação da metodologia é, portanto, a interseção de assentamentos precários provenientes sobretudo da base de setores censitários de aglomerados subnormais do IBGE com bases municipais de favelas e loteamentos irregulares (especificamente no caso de São Paulo). A sua ocorrência em áreas urbanas adensadas, bem como sua tipo-morfologia peculiar e prioridade de ações, justificaram essa escolha.

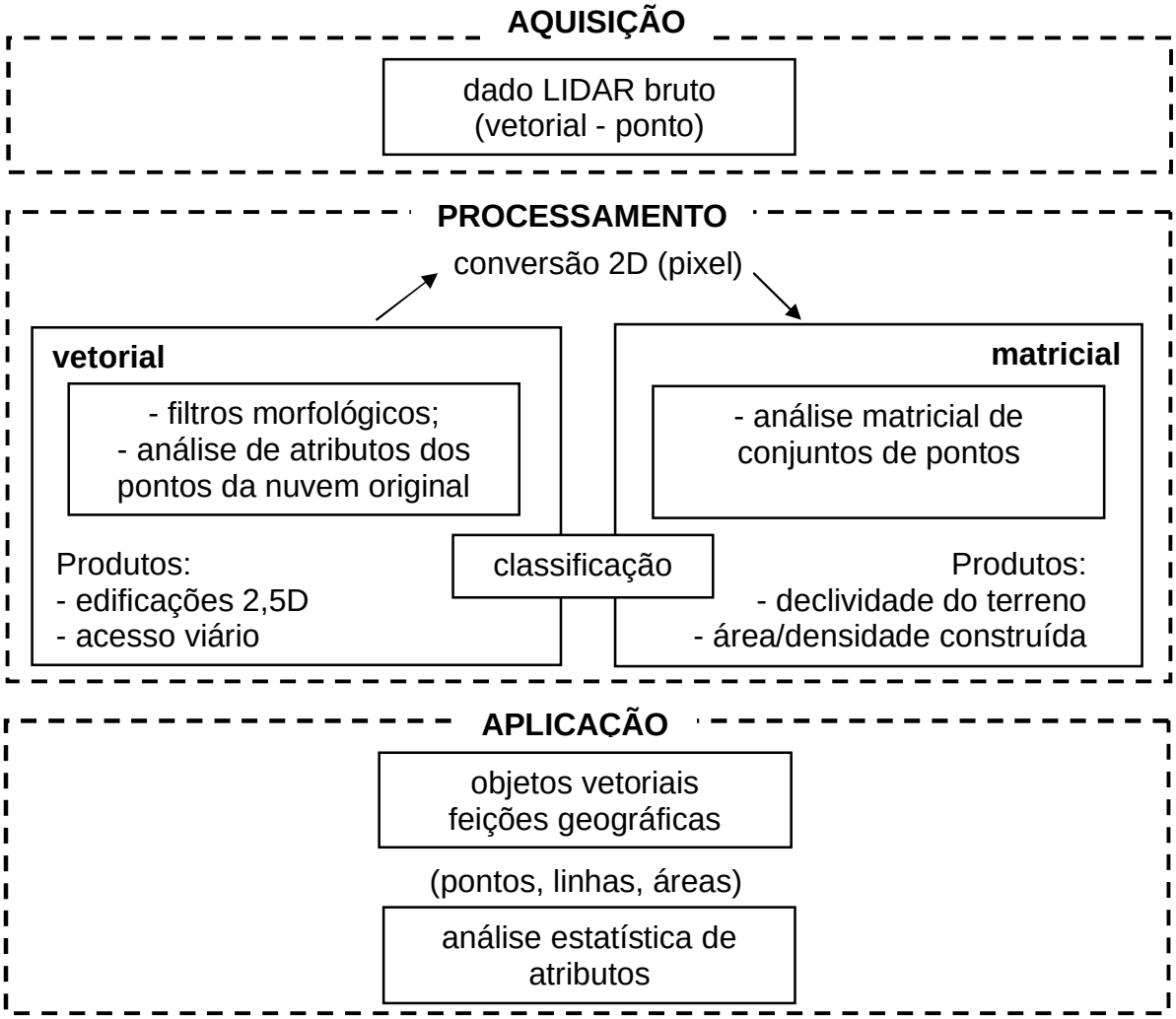
Foi realizada uma análise exploratória para obtenção dos parâmetros mais adequados em cada etapa do processamento dos pontos, bem como sua avaliação nos algoritmos adotados. O experimento foi realizado com dados amostrais e os resultados foram comparados (completude/integridade, exatidão/acurácia e qualidade) com os dados de referência obtidos por restituição “convencional”.

Uma premissa é que os dados oriundos de aerolevantamento Lidar têm densidade adequada ou suficiente para o uso da metodologia. A investigação da densidade adequada não é desconsiderada, mas não enfatizada, uma vez que a disponibilidade dos dados é limitada. Uma densidade menor que 1 ppm^2 certamente inviabiliza a metodologia, e no outro extremo, uma densidade maior que 20 ppm^2 produz um volume limitante para o processamento. O estudo da densidade foi realizado por Paula (2017), para um

padrão de ocupação formal na área da cidade universitária de Campinas - Unicamp (SP), município cujo um aglomerado subnormal também é analisado como caso de estudo. Para as edificações, um dos objetos de análise do autor, o trabalho estimou que para 4, 8 e 16 ppm^2, a resposta é significativa similar para uma escala 1:2.500 sem que seja necessário onerar a capacidade de processamento adotando as maiores densidades, ou seja, 4 ppm^2 mostrou-se suficiente. Estudos semelhantes, sejam para aplicações dependentes da densidade, como para critérios técnicos na especificação, foram realizados por Alexander et al. (2009), Balsa-Barreiro et al. (2012) e Rupnik et al. (2015).

A seguir, na figura 5.41, é apresentado um esquema geral da metodologia por um fluxograma dividido em três principais áreas da pesquisa: **aquisição**, **processamento** e **aplicação** dos dados Lidar.

Figura 5.41- - Fluxograma geral da metodologia proposta



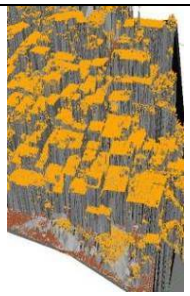
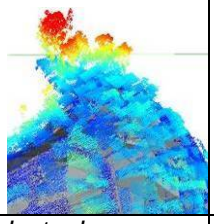
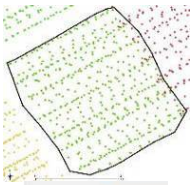
Na fase inicial de **aquisição**, os dados em estrutura vetorial de pontos com atributos são registrados por equipamentos de retorno discreto cujos algoritmos produzem arquivos em formato LAS/LAZ, segundo o padrão ASPRS.

O **processamento** com objetivo de classificação, pode ser realizado segundo inúmeros métodos descritos na literatura, tanto em ambiente vetorial, que foi adotado efetivamente neste trabalho com o software Lastools, como no ambiente matricial quando a nuvem de pontos é convertida para uma grade regular de pixels cujos atributos são sumarizados a partir dos pontos da nuvem. No processamento vetorial, os algoritmos de separação do terreno de outras feições e a detecção da planaridade/rugosidade na distinção entre edificação e vegetação respectivamente, são analisados em detalhe com relação aos principais parâmetros adotados. Os pontos classificados como edificação são utilizados na produção do modelo normalizado. Havendo a disponibilidade de MDT de data anterior, este foi considerado como referência topográfica mais adequada, caso contrário, o MDT produzido na classificação foi utilizado na normalização.

Já na fase da **aplicação**, demanda-se um produto passível de ser utilizado no ambiente GIS. O uso desse tipo de dado territorial por urbanistas e planejadores implica em sua padronização e simplificação para que se atinjam os objetivos definidos junto à comunidade. Quanto à estrutura dos produtos, há tanto dados vetoriais, como os polígonos das edificações (2,5D), as linhas dos eixos viários, e os pontos, todos com atributos descritivos, quanto dados matriciais, como imagens de intensidade, declividade e densidade.

O diagrama com as representações cartográficas apresentado na figura 5.42., também representa a metodologia proposta, enfatizando a obtenção da área construída a partir dos pontos classificados como edificações.

Figura 5.42 - Diagrama da metodologia com ênfase nas edificações

OCUPAÇÃO INFORMAL	CLASSIFICAÇÃO + NORMALIZAÇÃO	EDIFICAÇÕES SEGMENTADAS	SUMÁRIO ESTATÍSTICO DOS POLÍGONOS	- NÚMERO DE PAVIMENTOS - ÁREA CONSTRUÍDA
MDT (2004) LIDAR (2017)	 		 id 141 count 513 area 24.72 sg 312 hMIN 4.4 hMAX 6.2 dfMAXMIN 1.8 hMED 5.2 hAVG 5.25 dfMEDAVG 0.05	nfl 2 builtarea 49.44 newbuild N nfl-fuzz 1 buareFuz 24.72
fonte (input)	*lastools*	*c++*	*qgis*	*destino (output)*

Fonte: Autor

O uso do MDT de data anterior ao aerolevantamento Lidar, produz resultados melhores para a altura das edificações. A aglomeração das edificações nos assentamentos precários, obviamente oculta o solo em grandes porções da área, de tal forma que o terreno em estado “original” fornece as altitudes efetivamente consideradas no cálculo das alturas dessas edificações (um resultado da normalização está na parte inferior da segunda coluna do diagrama, nas cores frias para alturas menores e quentes para maiores). Além disso, a ocupação ocorre normalmente em curto espaço de tempo (na primeira coluna do diagrama, nota-se a expansão da ocupação de 2004 para 2017), dificultando a obtenção do MDT mais próximo do “original”. Vale destacar que a movimentação de terra nessa tipologia construtiva, em sua maioria autoconstruída, é relativamente pequena, diferente de grandes empreendimentos em que o volume de corte/aterro tende a ser bem maior principalmente em terrenos mais inclinados e/ou irregulares.

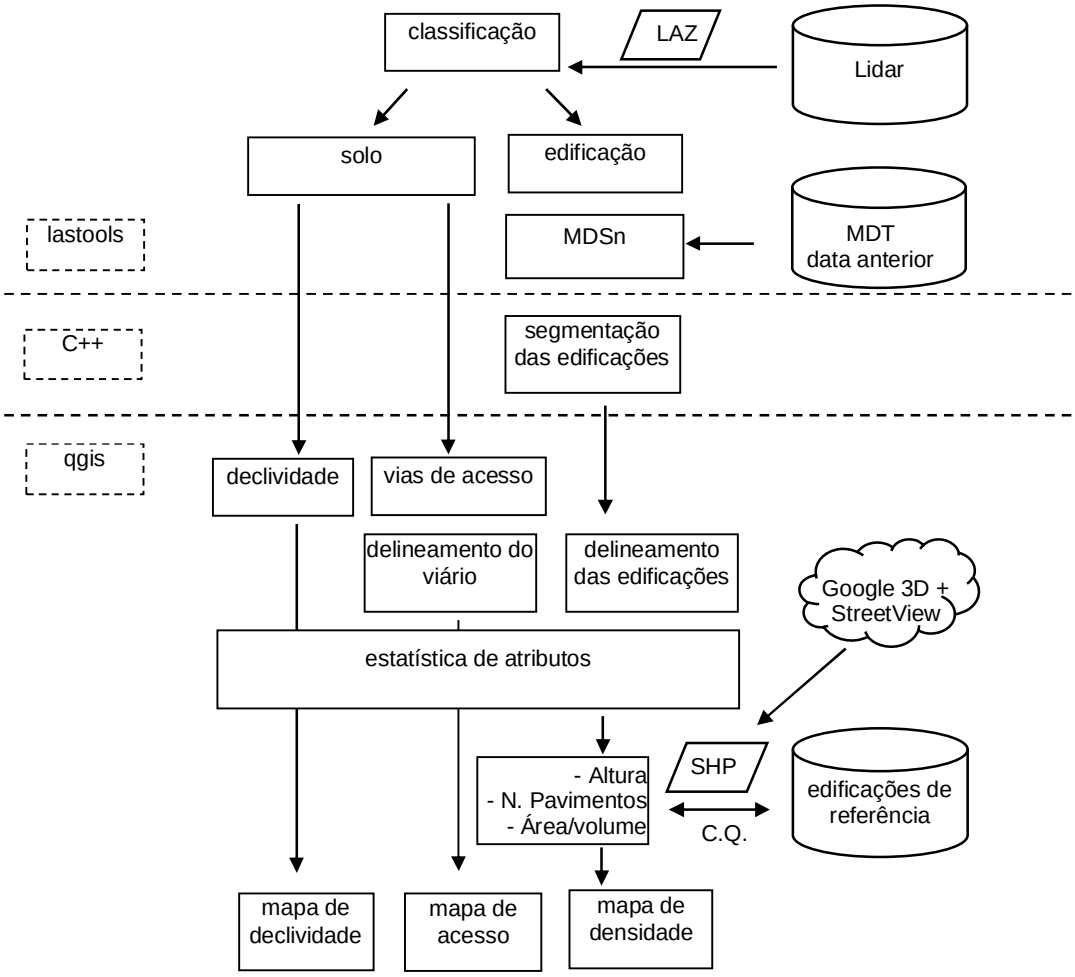
A segmentação dos pontos classificados como edificação é apresentada na terceira coluna do diagrama por cores indicando o resultado agrupado. Após o delineamento dos polígonos (quarta coluna), diferentes operações estatísticas são realizadas com os atributos dos pontos; na figura

temos respectivamente os seguintes resultados para a edificação: id, contagem, área, número do segmento, altura mínima, altura máxima, diferença das alturas, mediana da altura, média da altura, diferença entre mediana e média.

Finalmente, a última coluna do diagrama, apresenta o resultado da inferência do número de pavimentos (campo “nfl”) e consequentemente da área construída (campo “builtarea”). O campo “newbuild” armazena a ocorrência (Sim-S/Não-N) de ocupação prévia representada no mapa de referência (restituição), visando o cálculo da área de expansão horizontal. Os campos “nfl-fuzz” e “buareFuz” são respectivamente o número de pavimentos e área construída, considerando uma margem de erro devida ao padrão variável de pé-direito das edificações do assentamento.

Os procedimentos adotados no processamento citados previamente no item 1.4 do capítulo “Introdução” serão descritos em detalhe a seguir. O fluxograma da figura 5.43 auxilia na compreensão de suas etapas.

Figura 5.43- - Fluxograma do procedimento adotado



Em cada etapa, foram testados empiricamente os parâmetros em uma análise exploratória, em testes chamados a seguir como “investigação”, possibilitando a recomendação desses valores específicos para a tipo-morfologia em questão.

5.1. Pré-processamento

a) Análise das tipologias e padrões de ocupação existentes nas áreas de análise: aglomerados de setores censitários subnormais, favelas, loteamentos irregulares, zonas especiais de interesse social.

b) Caracterização preliminar segundo critérios do Levantamento de Informações Territoriais (LIT) do IBGE.

c) Identificação e análise de viabilidade da densidade de pontos dos dados para aplicação da metodologia.

d) Recorte da nuvem de pontos bruta segundo os perímetros dos assentamentos precários, considerando a interseção entre limites disponíveis nas diversas fontes de dados.

5.2. Classificação

Classificar, neste contexto, é separar de forma automática as feições estruturantes da morfologia do assentamento: edificação, vegetação e solo.

Após o recorte da área segundo os limites do assentamento, a análise dos retornos oferece uma primeira interpretação dos objetos detectados, quais sejam normalmente: vegetação (múltiplos retornos), bordas de edificação (dois retornos) e superfícies (retorno único).

Após a separação dos pontos solo e não-solo, foi calculada a altura de todos pontos não-solo com relação à triangulação (*triangular irregular network* - TIN) do solo ou a um MDT existente. O atributo altura calculado foi armazenado em campo adicional formatado com precisão de ponto flutuante.

Nesta etapa, o objetivo da investigação é a escolha dos parâmetros de processamento mais adequados ao padrão tipo-morfológico identificado:

a) Investigação dos parâmetros de filtragem do solo, principalmente “passo” e “relevo”[30], que são relacionados à separação das duas classes, bem como o limiar adotado para altura dos objetos “não solo”. Os pontos da classe solo foram interpolados em uma TIN.

b) Investigação dos parâmetros de classificação para edificação e vegetação, principalmente “dimensões da edificação”, “distância ao solo” e “planaridade”/ “rugosidade”.

5.3. Segmentação

[30] Passo (*step*): raio de busca (em metros) inicial de pesquisa dos pontos vizinhos; Relevo (*steep-hills*): configura a densidade da busca inicial por pontos do solo.

Segmentar é atribuir um mesmo valor a pontos que possuam uma característica comum, que neste contexto, é a pertinência a um mesmo plano respeitando uma tolerância em virtude de pequenas diferenças, seja pela natureza geométrica da cobertura das edificações (lajes e telhados), seja por erros inerentes à qualidade do levantamento.

O processamento de segmentação foi realizado somente com os dados de São Paulo (item 6.5.2 - estudo de caso, mais adiante), tendo em vista sua maior densidade e a disponibilidade restrita do algoritmo.

Foi adotada a abordagem de crescimento de superfícies, similar à de crescimento de regiões utilizada em imagens matriciais e implementada de acordo com Jarzabek-Rychard & Borkowski (2016), na qual os n vizinhos mais próximos de cada ponto foram usados para estimar o melhor plano de ajuste local. Além do cálculo do vetor normal, planos locais com pontos correspondentes a pequenos resíduos foram selecionados como regiões de sementes. No passo seguinte do crescimento da superfície, os pontos adjacentes a essas sementes foram adicionados iterativamente ao plano quando compatíveis com o plano atual. O critério de compatibilidade estabelecido foi que a distância vertical entre o ponto e o plano na direção do vetor normal deve estar abaixo de um limiar pré-determinado.

Para segmentação dos pontos de edificação, com base na altitude (em relação ao nível do mar) foram usados os seguintes critérios/parâmetros: consistência local do segmento definida pela distância máxima da vizinhança; planaridade da superfície local definida pelo ângulo entre os vetores normais do ponto candidato e o plano de crescimento; planaridade da superfície global definida pela distância vertical entre o ponto candidato e o plano de crescimento. Os limiares desses parâmetros foram definidos interativamente, de acordo com as características dos dados.

5.4. Delineamento

Delinear, contornar ou poligonalizar, neste contexto, é gerar polígonos 2D das edificações em diferentes escalas/níveis de detalhe e simplificar sua representação com os atributos considerados (2,5D) essenciais para análise de assentamentos e padrões de ocupação.

Os procedimentos foram:

a) Investigação do parâmetro “concavidade”[31] ou menor dimensão de delineamento das edificações.

b) Investigação de diferentes escalas de delineamento e simplificação de polígonos segundo o Nível de Detalhe pré-estabelecido (*LoD)*. A referência para qual Nível de Detalhe adotar é a feição que se deseja delinear: Em maior detalhe a *edificação*, em menor detalhe o *aglomerado,* se o acesso se dá por vielas ou semelhante, ou ainda a *quadra,* se for cercada pelo sistema viário.

Visando obter um único valor para cada edificação, primeiramente foi realizado o delineamento de conjuntos de pontos. Para dados não segmentados (Rio de Janeiro e Campinas) o critério considerado foi a proximidade entre os pontos. No caso de São Paulo apenas pontos de um mesmo segmento foram considerados para um polígono.

c) Investigação de algoritmos de simplificação. A quantidade de vértices do polígono produzido deve variar em função do seu Nível de Detalhe, de tal forma que o processamento de simplificação da geometria seja compatível com a representação desejada. O algoritmo de Douglas-Peucker (1973) é consolidado para esse tipo de processamento e produz resultados satisfatórios; para cada escala/nível (LoD) de representação foi definida a tolerância como parâmetro de simplificação.

5.5. Cálculo da altura

Altura da edificação é a distância do beiral/telhado/laje ao solo representado pela TIN. Entretanto, em terrenos inclinados, a altura pode variar a ponto de possuir número diferente de pavimentos entre fachadas. Parte-se da premissa que a *mediana* das alturas dos pontos sobre a cobertura, predominantemente lajes, resulta em um valor adequado para inferir o número de pavimentos. Entretanto, para o processamento de pontos com menor densidade e/ou exclusive a etapa de segmentação, no qual o polígono delineado é a quadra ou o aglomerado (LoD0), as altitudes (em relação ao

[31] Concavidade (*concavity*) é o valor (em metros) da menor feição a delinear seu contorno.

nível do mar) foram arredondadas para um metro e a *moda* foi mais adequada para retratar a predominância da edificação delimitada (Fonseca et al, 2014).

Os procedimentos foram:

a) Investigação do cálculo da altura dos polígonos a partir dos pontos Lidar - valor único para *mediana* ou *moda*, e valores estatísticos (*média, desvio padrão, máximo e mínimo, diferença entre máximo e mínimo, diferença entre moda, média e mediana - intervalo)*.

Foram selecionados os pontos contidos nos polígonos definidos como edificação, e o atributo de altura em relação ao solo proveniente da normalização do DSM foi analisado. O mesmo atributo foi associado ao centroide do polígono para análise posterior da densidade. Da mesma forma, para a quadra e para o aglomerado, todos pontos internos foram considerados no cálculo.

b) Inferência do número de Pavimentos

No cálculo do número de pavimentos está envolvida a tipologia expressa pela altura do pé-direito e sua resultante externa. Cada pavimento em barracos de madeira apresenta altura em torno de 2,5m, enquanto em edificações de alvenaria com laje apresenta altura em torno de 3,5m (o caso mais frequente) e em edificações com telhado de duas ou mais águas, em torno de 5,0m (caso menos frequente), sempre considerando altura total incluída a cobertura (laje, cimento amianto ou telhas de barro).

Para obtenção desse parâmetro empírico, recorreu-se às fotos de Google Street View quando disponíveis, ainda que somente nas ruas de trânsito de veículos, possibilitando amostras com base na contagem de tijolos, quase sempre aparentes (figura 5.44).

Figura 5.44 - Os tijolos são a referência para amostra da altura da edificação. Exemplos de 2,2m, 3,2m e 5,2m

Fonte: Google Street View

c) Cálculo da área construída

Uma vez delineados os polígonos, suas áreas planas são calculadas e armazenadas como atributo. Considerou-se a área construída como produto da multiplicação dessa área pelo número de pavimentos.

5.6. Cálculo da declividade do terreno

O MDT utilizado foi produzido pelos mesmos dados do aerolevantamento realizado, quando não disponível outro de outra fonte e sem a ocupação.

Especialmente no caso de São Paulo, foi realizada uma comparação entre MDTs, para quantificar a diferença do relevo nas áreas internas aos assentamentos antes e depois da ocupação. A alteração maior ocorreu somente sob as edificações e quase nenhuma alteração no viário, ou seja, o sistema viário, em geral, conserva a topografia original. (Ribeiro, 1995)

a) Investigação do melhor espaçamento em uma grade regular para representação da declividade.

O espaçamento adotado na grade foi 5 metros com base na dimensão mínima das edificações de forma que o terreno estivesse bem caracterizado e com precisão adequada ao redor das edificações delineadas. O valor das declividades foi calculado com base na triangulação inicial (TIN) gerada no primeiro passo - separação solo e não-solo. O resultado foi armazenado em um arquivo ASCII (xyz), sendo z o valor calculado da declividade em porcentagem para cada célula da grade, e a seguir representado em categorias segundo as três classes adotadas pelo IBGE no LIT: 0 a 5 % (relevo plano), 5 a 30% (relevo moderado) e acima de 30% (relevo acentuado).

b) Cálculo da declividade máxima e média. Investigação da qualidade da generalização.

A ideia dessa representação foi evidenciar a diferença entre o valor generalizado pela média do setor e suas nuances e *outliers* nos pontos da grade.

Tendo em vista a ocorrência de áreas de risco[32] e vulnerabilidade das edificações, a declividade média não se mostrou um índice adequado na representação coroplética, pois a área do setor é em geral heterogênea e pode conter edificações em locais de alto risco de deslizamento. Evidentemente a ocorrência de apenas um ponto isolado, pode não ter significância, mas sim um conjunto mínimo de pontos de alta declividade.

O critério de análise foi então resultado da interseção da grade com uma área de influência (*buffer*) de 5m das edificações ou aglomerados delineados e o limiar adotado para sua significância foi um agrupamento de no mínimo quatro pontos (área de 100 m^2) contidos em qualquer polígono resultante.

[32] Embora na análise de risco sejam considerados vários fatores, o MDT permite a geração da declividade que corresponde a uma importante condicionante dos processos de movimentação de terra.

A sequência de operações /procedimento de seleção foi baseada nos atributos das edificações e dos pontos da grade. A condição que atenda ambas feições é considerada a interseção:

Seleção de edificação onde Quantidade de pontos >= 4 dentro de
Traçado Área-Influência = 5m
(Seleção de edificação que contenha ponto da grade onde declividade >= 30)

5.7. Traçado do sistema viário

a) A partir dos pontos Lidar classificados como solo e edificação, o objetivo foi calcular atributos de largura e comprimento por trecho de via; os eixos (*centerlines*) do sistema viário foram traçados manualmente ou vetorizados de forma a englobar as vias regulares de acesso (trânsito de veículos e largura em torno de 10m), bem como as vielas entre edificações, tipicamente para acesso pedestre (em torno de 1m de largura ou pouco mais).

b) Investigação dos métodos de automação do cálculo da largura e sua resposta no produto cartográfico; delineamento de polígonos “solo” e “edificações” para definição de linhas estruturais (*centerlines* ou *skeletonlines*); cálculo de largura a intervalos equidistantes.

5.8. Cálculo de índices (métricas)

a) Análise dos atributos de altura (mediana/moda e desvio padrão principalmente) dos polígonos de edificação delineados;

b) Cálculo da distância média entre vizinhos a partir dos centroides dos polígonos de edificação.

A “média do vizinho mais próximo” mede a distância entre cada ponto (centroide) e seu vizinho mais próximo, para então calcular a média dessa distância para todos os pontos de um conjunto. Se a distância média observada é menor que a média aleatória hipotética para o mesmo número de pontos utilizados (distância esperada), a distribuição dos pontos analisados é considerada *agrupada* (índice menor que um), se maior, a distribuição é considerada *dispersa* (índice maior que um).

O índice “Z” é um fator do desvio-padrão e quanto mais afastado de zero, se positivo há dispersão ou se negativo há agrupamento dos pontos, pois valor próximo de zero indica a distribuição normal hipotética, ou seja, não há dispersão ou agrupamento aparente. Vale ressaltar que não podem ser comparados os índices de densidade Z de áreas diferentes.

c) Cálculo da densidade construída

A área construída, ou seja, a área da edificação delimitada multiplicada pelo número de pavimentos, foi o atributo considerado na ponderação para o mapeamento da densidade pelo estimador Kernel. Dessa forma os maiores valores (cores quentes) ocorrem quando edificações maiores e de maior altura estão mais próximos, e menores valores (cores frias) onde as edificações são menores e de menor altura.

d) Cálculo do comprimento e largura das vias de acesso.

Uma vez traçados os eixos dos acessos viários e atribuídas suas devidas larguras, além do tipo, procede-se ao cálculo de valores indicativos da capilaridade. A capilaridade foi definida pela divisão do comprimento total dos acessos/vias pela área do setor.

5.9. Geração da base de dados geográficos

a) Investigação da melhor estrutura de dados para os arquivos resultantes em formato legível por software GIS - 3D ou 2,5D. Uma vez produzidos os arquivos com as feições essenciais para caracterização do setor/assentamento, foram associados os atributos geométricos e descritivos que atendem aos requisitos urbanísticos, além de sua facilidade de uso nos programas mais difundidos atualmente.

5.10. Controle de qualidade

O controle de qualidade (C.Q.) foi realizado tanto em termos quantitativos como qualitativos. Entende-se por quantitativa a análise numérica do produto, com base na posição relativa entre o dado produzido e seu respectivo controle/referência. Análise qualitativa é aquela que não produz valores numéricos, mas possibilita uma avaliação dos resultados, tanto em termos visuais como descritivos.

Os procedimentos em termos quantitativos foram:

a) Avaliação do erro posicional: Comparação das coordenadas dos pontos obtidos com pontos de controle disponíveis, dependendo do caso em estudo.

b) Avaliação da classificação: Cálculo dos valores de integridade, precisão e qualidade com base na comparação das áreas de superposição, omissão e comissão com os polígonos de controle.

A validação qualitativa foi considerada em todas etapas da pesquisa, por meio de:

a) Análise visual, ou seja, a sobreposição de pontos, linhas e polígonos com ortofotos e outras imagens disponíveis.

b) Opiniões e sugestões de especialistas das áreas de planejamento urbano, habitação social, fotogrametria e sensoriamento remoto, programação de software e computação.

Os principais dados de checagem no estudo de caso provêm de restituição (São Paulo e Campinas), de fotos (São Paulo) e de ortofotos (Campinas, São Paulo e Rio de Janeiro).

Somente para as seis áreas de São Paulo os dados de referência são provenientes da restituição dos Levantamentos Planialtimétricos Cadastrais - LEPACs realizados especificamente para favelas em diferentes datas. Campinas possui a restituição de edificações somente em áreas consolidadas e Rio não possui arquivos de restituição

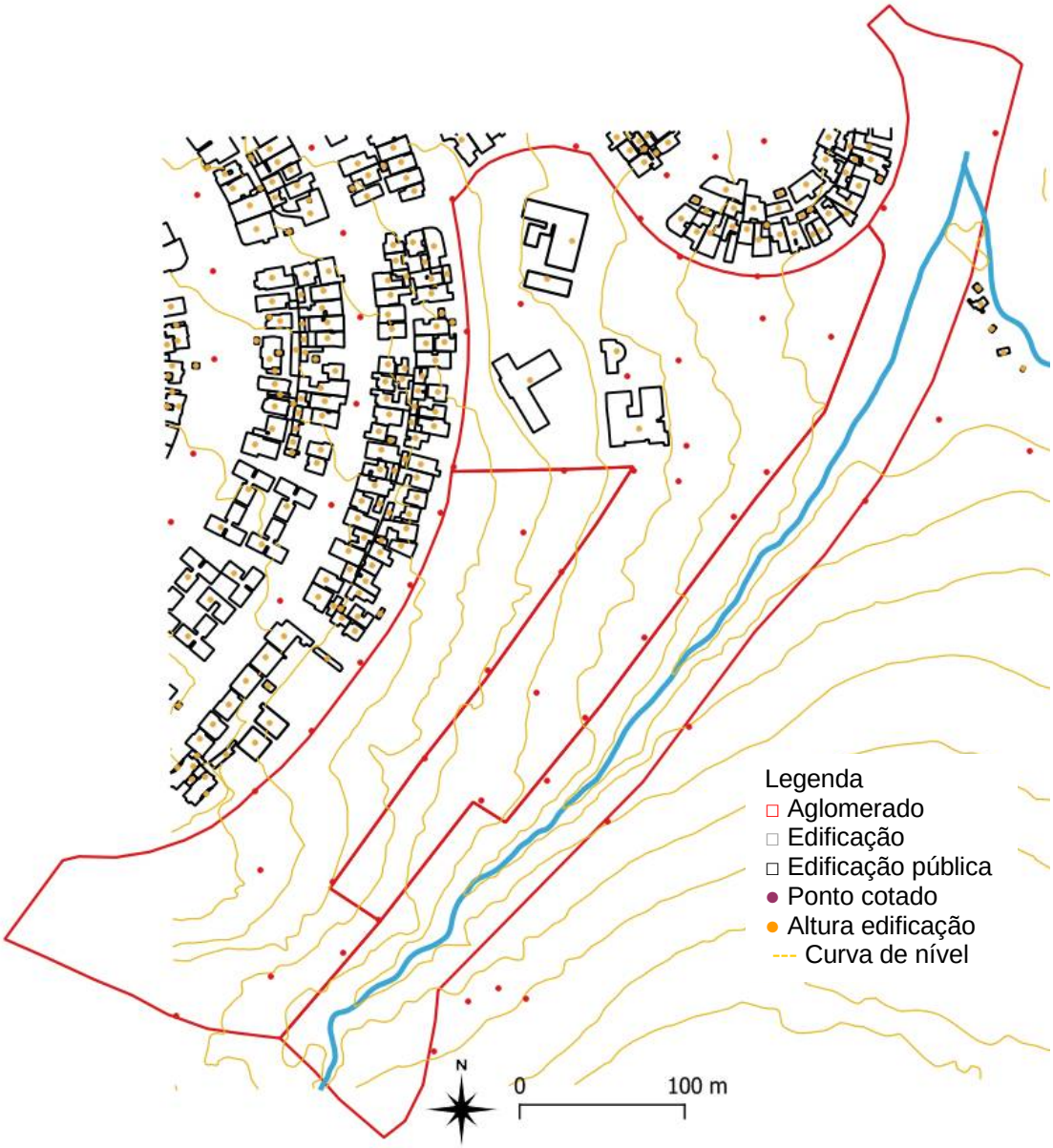
Na figura 5.45 a seguir é apresentado um exemplo do LEPAC de São Paulo com destaque para o atributo do número de pavimentos indicado pela etiqueta numérica e pela cor).

Figura 5.45 - Exemplo de LEPAC

Fonte: Secretaria de Habitação do Município de São Paulo

A figura 5.46. mostra um exemplo de arquivo de restituição de Campinas, no qual foram utilizados os centroides das edificações obtidos por esterorestituição digital para checar os resultados do processamento em edificações regulares, fora dos limites do aglomerado subnormal. As áreas informais da cidade não foram contempladas com a restituição das edificações com as respectivas alturas.

Figura 5.46 - Dados de checagem provenientes da restituição de Campinas - SP. Em vermelho o limite da área de estudo com ocupação irregular não



mapeada.

Fonte: Prefeitura de Campinas.

Para o Rio de Janeiro a referência foi considerada pela ortofotos (figura 5.47), limitando assim apenas a análise qualitativa dos resultados.

Figura 5.47 - Ortofoto Rio de Janeiro

PCRJ-A3

October 27, 2016

1:2,000

0 0.0175 0.035 0.07 mi

0 0.0375 0.075 0.15 km

Prefeitura da cidade do Rio de Janeiro

Capítulo 6. Estudos de Caso

6.1. Áreas de estudo

Foram selecionadas oito áreas, considerando a disponibilidade de dados que representassem diferenças na morfologia entre assentamentos. Essas áreas localizam-se em três regiões metropolitanas do país, Campinas - SP, Rio de Janeiro - RJ e São Paulo - SP

As áreas foram selecionadas como “amostras” no sentido de obter os parâmetros/métricas comparáveis, além de possuírem dados de referência para o controle de qualidade, exceto Rio de Janeiro cuja referência foram somente ortofotos mediante análise visual.

A dimensão das áreas de estudo é adequada para não serem divididas em subconjuntos de pontos (*tiles*), uma vez que, para esses projetos piloto, não há necessidade de onerar o esforço de processamento, também influenciado pela densidade de pontos do aerolevantamento.

A seguir é apresentada a síntese das áreas, e em seguida os respectivos resultados obtidos, visando a comparação e principalmente a representação das diferenças entre características analisadas pelos critérios do LIT-IBGE (topografia, verticalização, espaçamento e circulação/acesso).

Campinas - SP

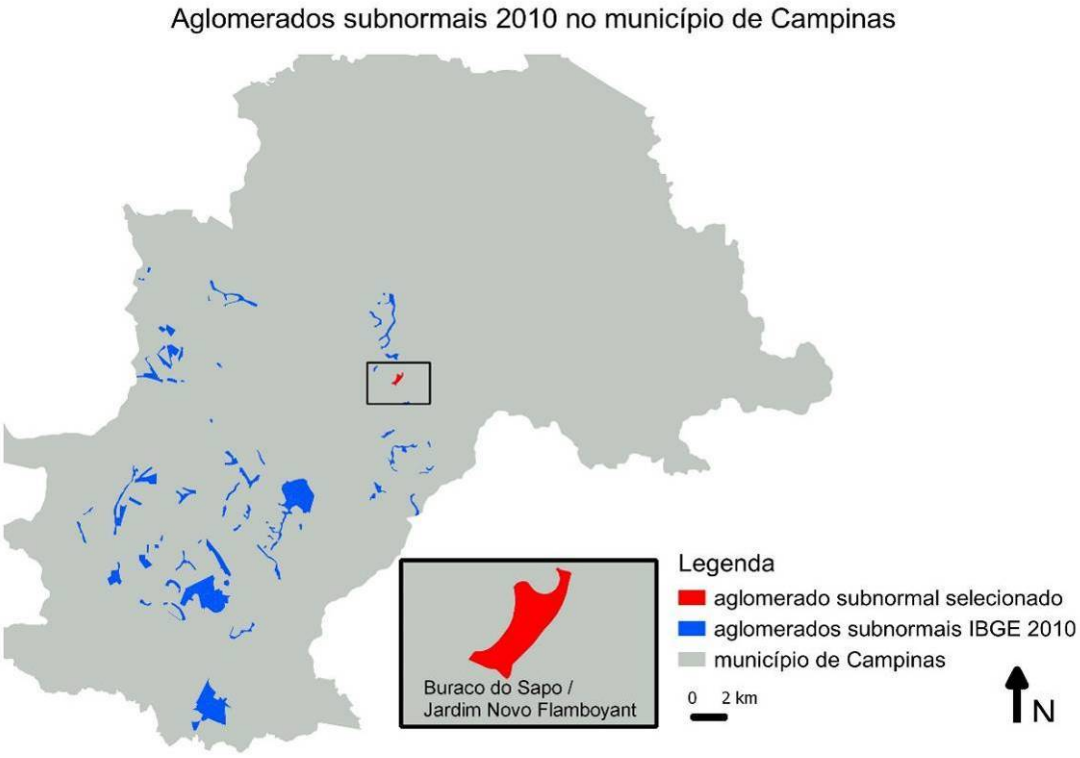
Campinas está distante 90 km da capital do estado, com população de 1.091.946 habitantes segundo censo IBGE 2010, 98,28% de população urbana, 388.275 domicílios, área de 796,4 km^2, altitude média de 680 m. Na cidade haviam 148,2 mil pessoas vivendo em 40 mil domicílios localizados em assentamentos precários (favelas), 12,9% de toda a sua população, segundo censo 2010 (IBGE). A percentagem de moradores em situação precária era o dobro da média nacional de 6%, e superava a da cidade de São Paulo em termos percentuais (10,8%). Conforme o levantamento, 16 mil das 40 mil submoradias (40%) estavam em área de risco.

Conforme levantamento de 2013 da prefeitura, existiam 92 favelas no município[33].

No município de Campinas há relativa homogeneidade entre as áreas dos aglomerados subnormais, verificada de forma visual a partir das imagens de ortofotos, Google aéreo e *Street View*. A área selecionada foi o aglomerado de três setores subnormais "Núcleo Residencial Jardim Novo Flamboyant", conhecido como "Buraco do Sapo", que possuía 672 domicílios em 2010, totalizando 136.624,75 m^2 de área.

O IBGE mapeou com auxílio da prefeitura 110 aglomerados subnormais que contém 252 setores censitários. A figura 6.48 mostra o limite do município e seus aglomerados, bem como a área selecionada para o estudo (destacada em vermelho).

Figura 6.48 - Aglomerados de setores subnormais selecionados em Campinas - SP



Fonte: IBGE, 2010 Disponível em: ftp://ftp.ibge.gov.br/Censos/Censo_Demografico_2010/Resultados_do_Universo/Agregados_por_Setores_Censitarios/

[33] (iG Paulista - 08/11/2013 - 08h38, acesso em 25/09/2016. Disponível em: http://correio.rac.com.br/_conteudo/2013/11/ig_paulista/119107-favelas-abrigam-148-mil-em-campinas.html)

Quanto à tipologia das edificações do aglomerado selecionado, predominam domicílios unifamiliares, de um a três pavimentos, com certa regularidade de ocupação, inclusive na maior parte dos casos obedecendo a um recuo para passeio de pedestres além da circulação de veículos. As edificações possuem geometria retangular variando entre 5 e 10 m de lado.

Quanto à morfologia do entorno, alguns assentamentos são localizados em beira de córrego e há vegetação esparsa de pequeno porte. As vias de acesso são pavimentadas ou de terra, e apresentam largura média de 8 m. A topografia apresenta relevo plano a moderado, com declividade entre 0 e 15%.

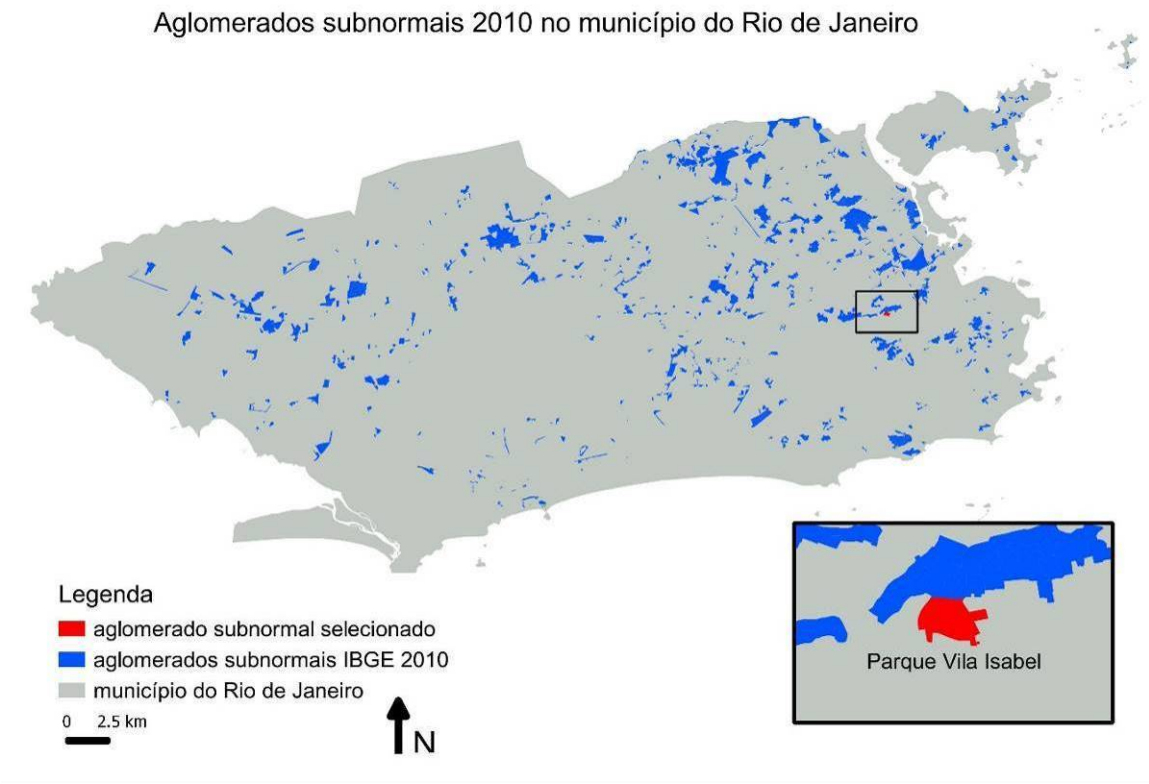
Os dados Lidar disponíveis em formato LAS, possuem densidade nominal média de 2 ppm^2 (na prática, em áreas de sobreposição das faixas de voo, a densidade aumenta para 3-4 ppm^2). Os dados de checagem são outros produtos oriundos do mesmo levantamento realizado pela Prefeitura de Campinas no ano de 2014: a) Ortofoto em escala 1:1.000; b) arquivos vetoriais restituídos em escala 1:1.000. Além disso, a base Google Street View é utilizada na checagem e caracterização.

Rio de Janeiro - RJ

A capital do estado do Rio de Janeiro, com uma população de 6.320.446 habitantes (censo 2010), área de 1.200 km^2, e altitude média de 2 m, é referência recorrente no tema da urbanização e favelização.

No município do Rio de Janeiro, foi selecionada uma área de maior declividade e maior densidade construída, o aglomerado “Parque Vila Isabel”, do qual foram selecionados seis setores subnormais, localizados na sua porção sul, que possuíam 1.655 domicílios em 2010, totalizando área de 77.788,45 m^2. Tais setores estão destacados em vermelho dentre os aglomerados subnormais da cidade na figura 6.49.

Figura 6.49- - Aglomerados de setores subnormais selecionados no Rio de Janeiro - RJ.



Fonte: IBGE Disponível em:
ftp://ftp.ibge.gov.br/Censos/Censo_Demografico_2010/Resultados_do_Universo/Agregados_por_Setores_Censitarios/

Na área teste verificou-se, por análise das ortofotos, que a tipologia das edificações é predominante com domicílios de um a três pavimentos, com irregularidade de ocupação, sem recuo para veículos, e restrita circulação de veículos. As edificações possuem geometria retangular variando entre 5 e 10 m de lado.

Quanto à morfologia do entorno, é um típico assentamento carioca, localizado em morro de alta declividade (maior que 30% em várias áreas), com massas de vegetação concentradas. As vias de acesso interno são de terra ou escadarias, e apresentam largura média de 1 m.

Os dados originais possuem densidade nominal de 10 ppm^2 e 2 ppm^2, para os anos de 2011 e 2013 respectivamente, entretanto os dados brutos foram disponibilizados somente para 2013 (2 ppm^2), enquanto para 2011 foram disponibilizados os modelos de superfície (MDS) já processados resultando em densidade média de 5 ppm^2. Os dados de checagem são

oriundos dos mesmos levantamentos realizados pela Prefeitura do Rio de Janeiro, disponíveis nos portais “Armazém de Dados” e “GeoRIO”.

A checagem foi realizada com base nas imagens Google Maps e Street View.

São Paulo - SP

A cidade mais populosa do Brasil está localizada no estado de mesmo nome, tem área de 1,5 mil km^2, e é “o núcleo de uma região metropolitana de 20 milhões de habitantes que forma uma única mancha urbana de cerca de 2,2 mil km^2. Tal mancha apresenta uma governança fragmentada em 39 municípios. A ausência de uma governança integrada coloca um importante desafio para a cidade de São Paulo” (SÃO PAULO, 2012). O município tem 355.756 domicílios em setores subnormais (IBGE, 2010), o que corresponde a 1.280.400 pessoas morando em setores subnormais no município, mais de 10% do total da população.

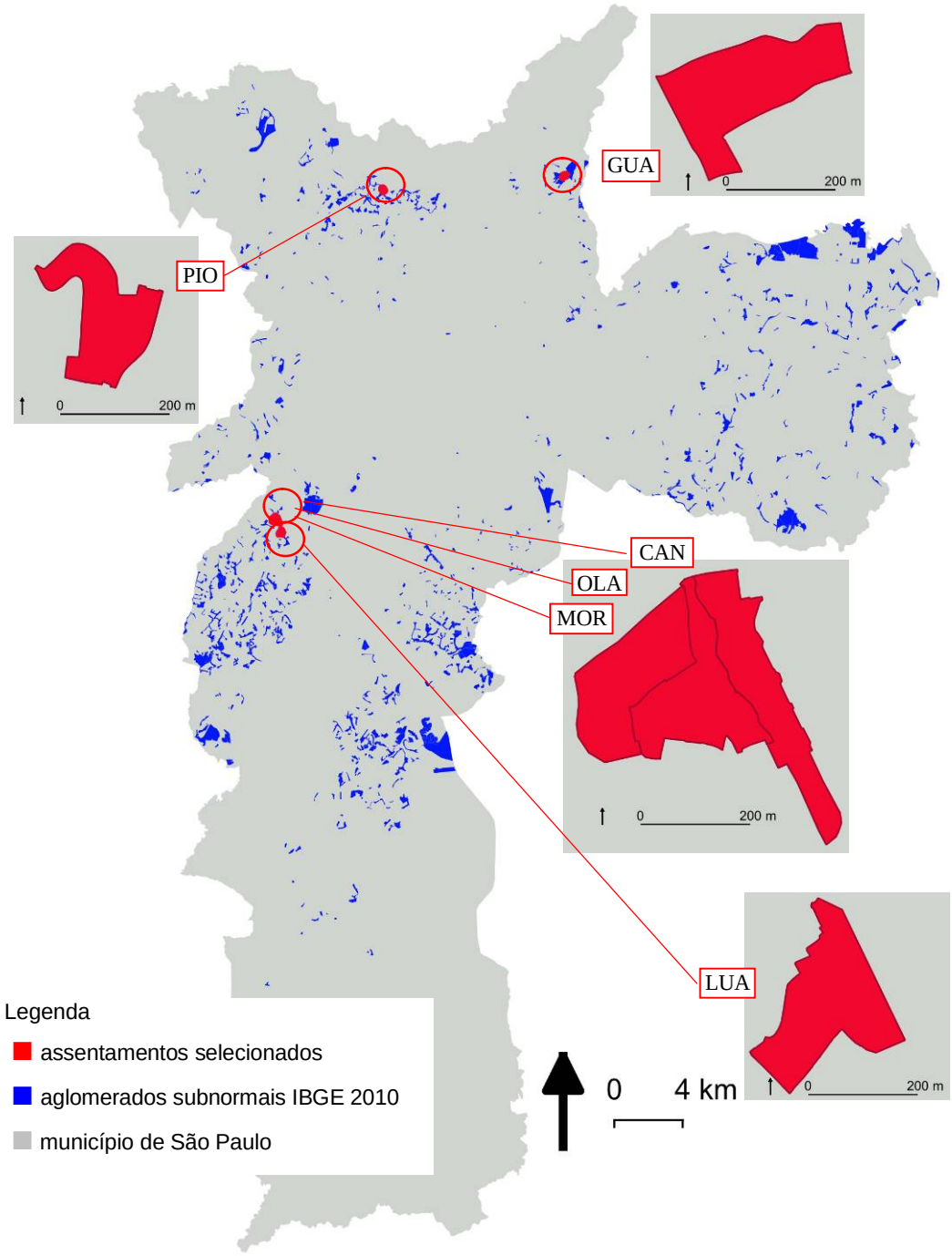
De acordo com os dados da *Revisão do Plano Diretor Estratégico: Habitação*, realizada pela Prefeitura Municipal de São Paulo (SÃO PAULO, 2013a), havia 438.739 domicílios nos cadastros de favelas e núcleos habitacionais[34] e 482.336 domicílios no cadastro de loteamentos irregulares. Para efeito de cálculo, visando uma estimativa da população e considerando 4 pessoas por domicílio em média (1 família por domicílio), temos 1.754.956 pessoas vivendo em favelas e 1.929.344 pessoas, em loteamentos irregulares, num total de 3.684.300 pessoas. Considerando os 11.244.369 habitantes, pode-se dizer que quase 33% da população de SP, vive em algum tipo de assentamento precário (favela, núcleo habitacional e loteamento irregular; cortiços não foram contabilizados).

A figura 6.50 mostra o limite do município e seus aglomerados (em azul), bem como as áreas selecionadas para o estudo (destacadas em vermelho com as respectivas siglas). Os nomes completos dos Aglomerados/Favelas/Loteamentos relativos às siglas adotadas são: GUA é

[34] Núcleos habitacionais são favelas total ou parcialmente urbanizadas

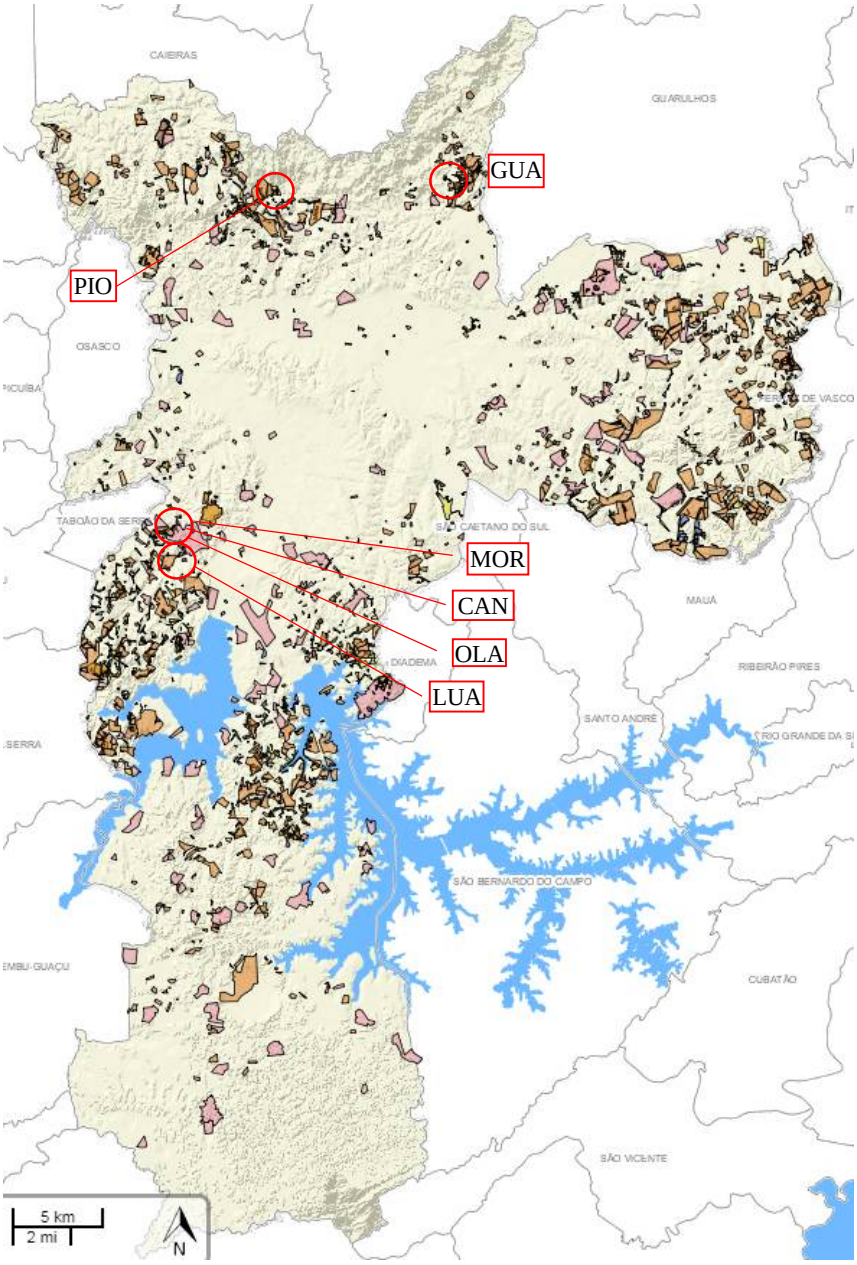
“Guapira”, PIO é “Morro do Piolho”, MOR é “Vila Morumbi”, CAN é “Canto do Rio Verde”, OLA é “Olaria” e LUA é “Morro da Lua”.

Figura 6.50 - Assentamentos precários selecionados em São Paulo - SP



As seis áreas foram selecionadas considerando a interseção, mesmo que parcial, de aglomerados subnormais, cadastro de favelas e loteamentos irregulares (Figura 6.51 - Geosampa35), zonas especiais de interesse social (ZEIS) (Ribeiro et al., 2016) e levantamentos planialtimétricos cadastrais (LEPAC).

Figura 6.51 - Mapas de favelas (amarelo) e loteamentos irregulares (rosa e laranja) segundo o cadastro da Secretaria Municipal de Habitação (disponível no Geosampa)



[35] http://geosampa.prefeitura.sp.gov.br

O levantamento Lidar foi realizado em 2017 com o sensor Optech Gemini aerotransportado com as seguintes características: Frequência 100-125 KHz; ângulo de varredura 18-25 graus; divergência do feixe 0,25 mrad; altura média de voo 700m, densidade média de 10 ppm^2. A Tabela 6.3 a seguir apresenta algumas características das seis áreas.

Tabela 6.3 - Características geométricas das áreas e pontos

Nome	Área (m^2)	N. pts. em edif.	N. de segmentos	dens. pts. em edif. (ppm^2)	Espaçamento (m)
GUA	44.915	619.609	637	17,98	0,24
PIO	41.184	594.470	521	16,87	0,24
MOR	38.611	218.468	291	9,24	0,33
CAN	34.187	120.101	208	7,37	0,37
OLA	33.471	185.518	233	8,87	0,34
LUA	42.507	258.782	383	9,75	0,32

Os LEPACs foram produzidos por restituição em escala 1:500 (voo 1:3.000). Tais levantamentos são realizados esporadicamente, motivo pelo qual suas datas variam. A quantidade N de edificações é apresentada na Tabela 6.4 em duas colunas separadas por um limiar para sua área de 20 m^2 visando a comparação após o processo de segmentação que leva em conta o número de 200 pontos no mínimo para cada segmento. Foi calculada a área total coberta por edificações em cada assentamento (coluna “Área construída 2D” na Tabela 6.4). O número máximo de pavimentos é apresentado na 8ª coluna para posterior comparação com os resultados. Aquelas edificações que estavam em construção/fundação à época do levantamento foram quantificadas na última coluna e seu número de pavimentos foi considerado zero.

Tabela 6.4. Características dos dados de referência para edificações dos assentamentos - LEPACs

Nome	Data do voo (mês/ano)	N poligs. área ≥ 20m^2	N poligs. área < 20m^2	Área Min (m^2)	Área Max (m^2)	Área construída 2D (m^2)	N max. de pavs.	N. poligs. em construção (pav.=0)
GUA	Nov/2011	445 (80 %)	110 (20%)	2,44	169,44	25315,92	4	12
PIO	Mar/2016	342 (83%)	69 (17%)	2,56	206,47	17574,71	4	2
MOR	Nov/2011	339 (83%)	70 (17%)	6,41	251,97	20588,44	4	3
CAN	Nov/2011	233 (59%)	160 (41%)	3,06	415,20	11696,27	2	8
OLA	Nov/2011	330 (87%)	50 (13%)	3,12	210,17	16410,41	4	5
LUA	Mar/2014	457 (72%)	177 (28%)	1,58	411,44	20886,99	5	15

6.2. Características de análise

Para cada área são apresentados os resultados do processamento de classificação, seguido pelas características e respectivos índices/métricas baseadas no LIT-IBGE, que ao final foram sintetizados em um quadro comparativo (quadro 6.7, pag. 189). A sequência de operações é a seguinte:

a) Classificação

b) Topografia - Declividade do terreno

c) Verticalização - Altura das edificações

d) Espaçamento - Densidade construída

e) Circulação e acesso

A classificação visou a atribuição das três classes principais solo, vegetação e edificação, com ênfase na investigação dos parâmetros mais adequados à detecção de edificações de tipo-morfologia desses assentamentos.

A topografia (declividade) foi calculada diretamente sobre os pontos Lidar do terreno, após a filtragem. O valor apresentado é a média para toda área.

A verticalização (altura) foi obtida pela normalização do Modelo Digital de Superfície (nDSM), para cada ponto Lidar. O valor apresentado é a MEDIANA para edificações delineadas (LoD1) e a MODA para aglomerados (LoD0). A justificativa para adotar esses valores foi apresentada no item 5.5.

O espaçamento (densidade) foi calculado pela “análise de vizinho mais próximo” descrita no item 5.8 - “Cálculo de índices”. Os valores apresentados são baseados nos centroides de todos polígonos delineados como edificações/aglomerados dentro da área do assentamento.

O mapa produzido pelo estimador Kernel foi adotado como mapa de síntese da densidade construída, levando em conta o espaçamento, a área e a verticalização, ou seja, a área construída.

O estimador Kernel é uma função de ponderação mais refinada que a média ou o inverso do quadrado da distância. Trata-se de uma generalização da média móvel local considerando sua variação gradual. Seus parâmetros são o raio de influência nos pontos vizinhos e uma função de estimação para “suavização”. O estimador de densidade Kernel produz uma representação matricial em mapas temáticos que representam quão próximos os pontos estão (certa medida de adensamento) ponderados por um atributo.

O estimador Kernel é definido por [36]:

$$\hat{z}_i = \frac{\sum_{j=1}^{n} k(\frac{d_{ij}}{\tau}) z_j}{\sum_{j=1}^{n} k(\frac{d_{ij}}{\tau})}, \; d_{ij} \leq \tau$$

Onde:
Zi = posição cujo valor deseja-se estimar
τ = raio
dij = distância euclidiana entre i-ésima posição e j-ésima amostra
k = função kernel quártico = $k(x, y, \tau) = \frac{3}{\pi\tau^2}(1 - \frac{d_{ij}^2}{\tau^2})^2$

O cálculo da área construída foi obtido pela multiplicação da área do polígono delineado como edificação pelo número de pavimentos inferido ou no caso do aglomerado, a área utilizada foi 1m^2 relativo aos pontos de uma grade. O coeficiente de aproveitamento (CA) do assentamento foi calculado pela divisão da área construída pela área total.

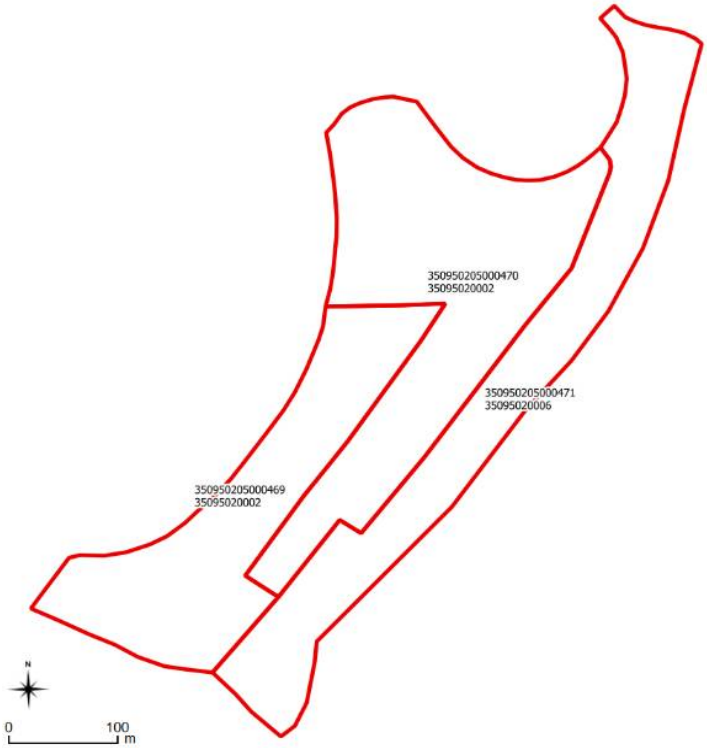
A circulação/acesso foi calculada após o traçado manual dos eixos do sistema viário. As larguras foram obtidas manualmente sobre as imagens disponíveis (Lidar, ortofotos ou Google), e o valor médio calculado para todas vias desenhadas. Considerou-se “capilaridade” do assentamento a razão entre a soma dos comprimentos das vias e a sua área total.

[36] Camargo, Fucks, Câmara. Análise espacial de superfícies. In: Druck, S.; Carvalho, M.S.; Câmara, G.; Monteiro, A.V.M. (eds) "Análise Espacial de Dados Geográficos". Brasília, EMBRAPA, 2004 (ISBN: 85-7383-260-6). Disponível em http://www.dpi.inpe.br/gilberto/tutoriais/analise/cap3.pdf

6.3. Resultados: Campinas - SP

O perímetro do aglomerado Buraco do Sapo, compreende três setores censitários subnormais, observados na figura 6.52 a seguir.

Figura 6.52- - Aglomerado subnormal “Buraco do Sapo”. Cada setor é identificado pelo “Número do Setor Censitário” (superior) e do “Aglomerado Subnormal” (inferior).



Fonte: IBGE, 2010

Nos setores 350950205000**469** e 350950205000**470**, predomina uma tipologia construtiva que apesar de informal e irregular, apresenta um certo ordenamento no seu tecido urbano, com arruamento, calçada e residências visualmente definidas, apesar destas não atenderem a todas as exigências previstas na legislação de edificação (como recuos, ventilação, aeração, taxa de ocupação, etc). Tais características podem ser observadas na figura 6.53.

Já no setor 350950205000**471,** notam-se áreas mais adensadas e precárias concentradas na beira do córrego (setor 350950205000**471**), visíveis na ortofoto da figura 6.53.

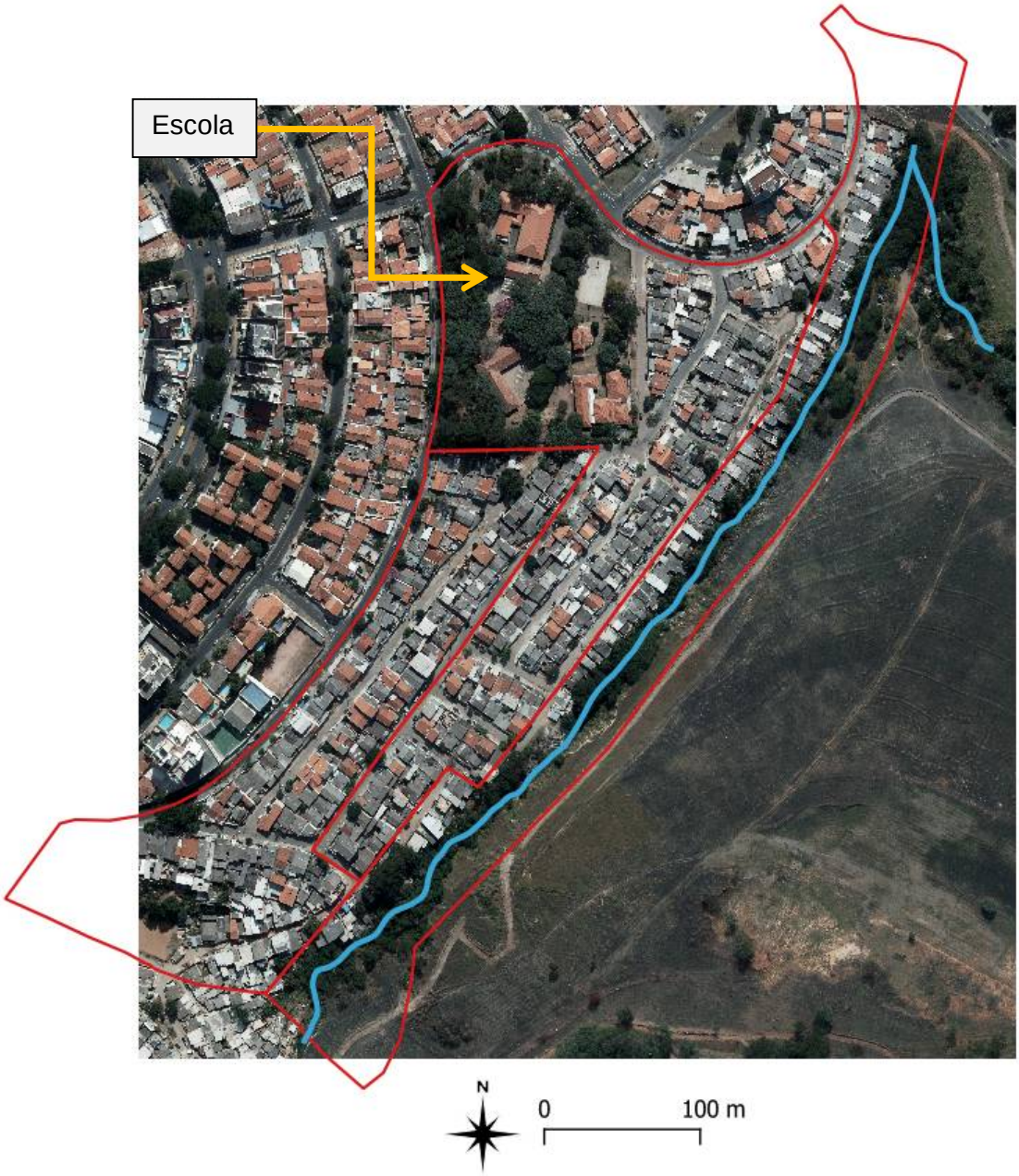
Figura 6.53- - Tipologia construtiva do aglomerado “Buraco do Sapo”.

Fonte: Google Street View

Vale destacar que nos setores subnormais, há eventualmente equipamentos contidos em sua área e que a sua rápida expansão muitas vezes extrapola os limites definidos pelo IBGE. No “Buraco do Sapo” nota-se a escola EMEF/EJA[37] Raul Pila a noroeste e a expansão da ocupação precária ao sul (figura 6.54).

Figura 6.54- - Aglomerado (2010) sobre ortofoto (2014).

[37] EMEF - Escola Municipal de Ensino Fundamental, EJA - Educação de Jovens e Adultos

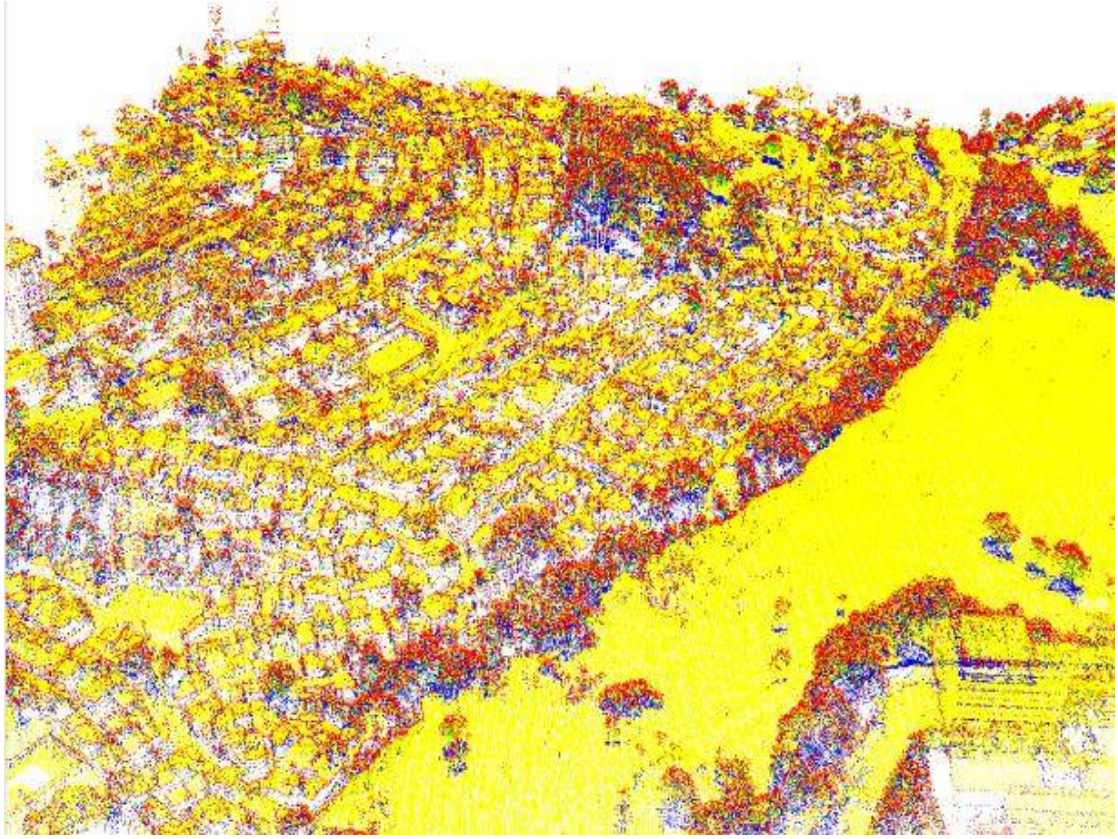


Fonte: Prefeitura de Campinas e IBGE.

6.3.1. Classificação

A figura 6.55, a seguir, foi colorida segundo o número de retornos, de tal forma que a morfologia tem sua primeira representação.

Figura 6.55- - Aglomerado subnormal “Buraco do Sapo”. Imagem colorida pelo número de retornos: amarelo (único retorno), azul (3º retorno), verde (2º retorno) e vermelho (1º retorno)



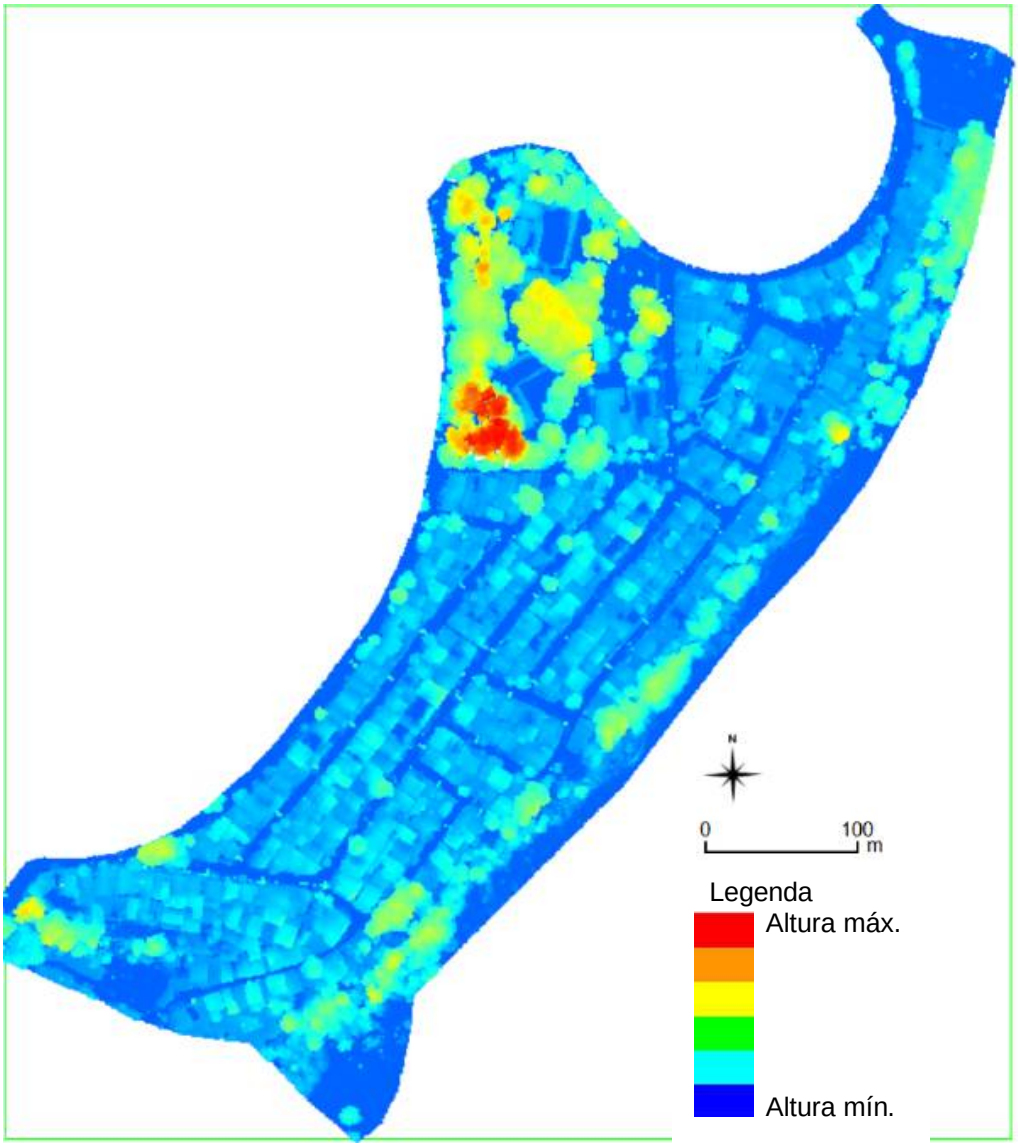
A beirada do córrego (limite sudeste do aglomerado) e a área escolar (à noroeste) ficam evidentes pela alta densidade de vegetação (múltiplos retornos em vermelho na figura 3.6). Vale destacar um aspecto importante do assentamento precário, que é a escassa presença de vegetação em suas áreas mais consolidadas, bem como a arborização viária. De forma geral, a presença de vegetação costuma ser mais intensa em áreas formais, em edificações com lotes maiores (como ocorre na área da escola neste estudo de caso), e em áreas de preservação ambiental ou impróprias à ocupação (como nas áreas de preservação permanente - APP em torno de córregos e nascentes, quando respeitadas).

Os principais parâmetros adotados na classificação foram:

- Passo (*step*) = 8 m
- Relevo (*steep-hills*) = 6 (*fine* = relevo moderado)
- Pico (*spike*) = 1 m
- Intervalo (*offset*) = 0,05 m

O Modelo Digital da Superfície normalizado (MDSn) é apresentado na figura 6.56, que passa a desconsiderar o relevo natural para realizar operações sobre os pontos não-solo.

Figura 6.56 - Modelo Digital da Superfície Normalizado - MDSn. Mapa hipsométrico das alturas em relação ao solo



Fonte: Autor.

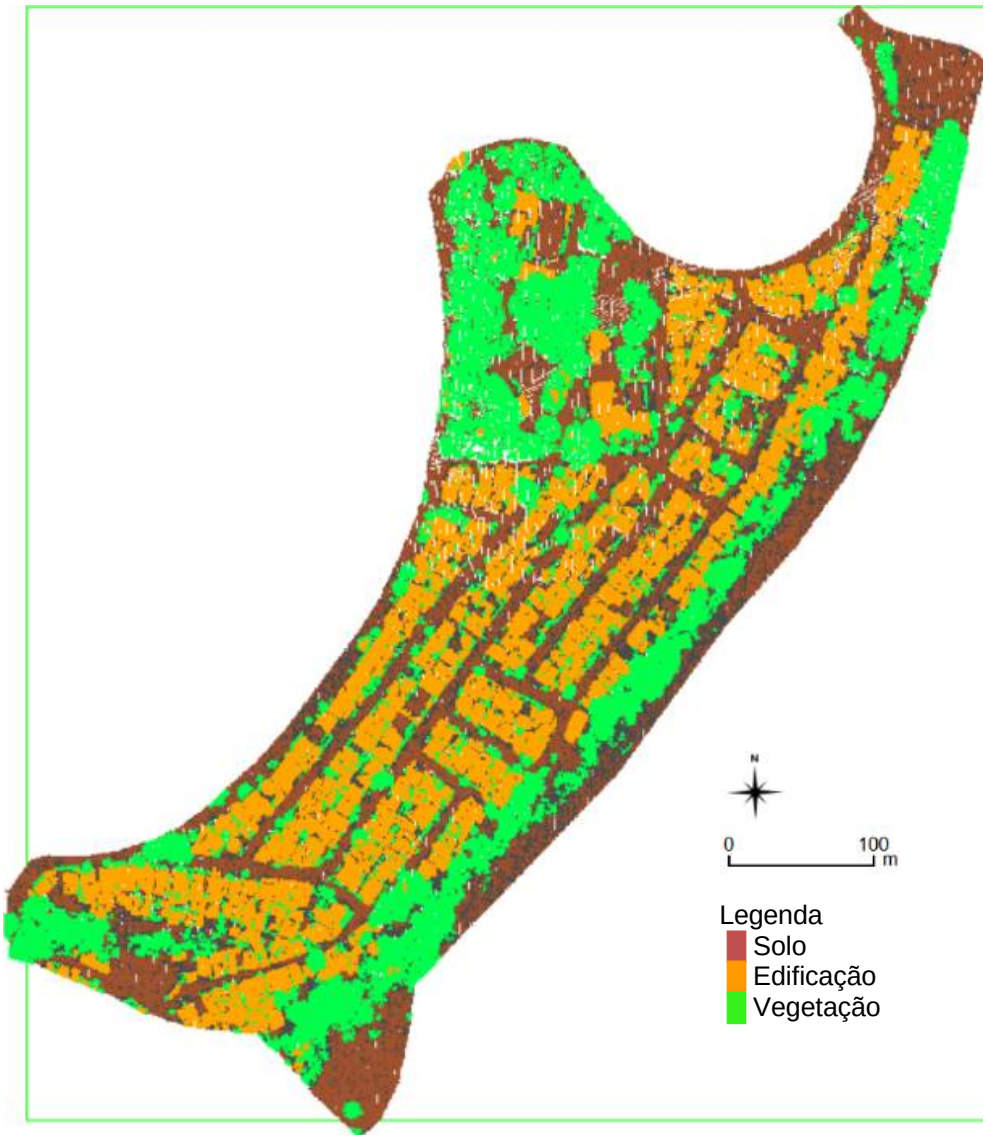
A visualização da figura 6.56 permite, através das cores, perceber que as maiores alturas (em vermelho, seguida pelo amarelo) são pertencentes a vegetação e que as edificações (azul) têm uma altura muito semelhante entre si.

A seguir foi realizado o processamento de classificação dos pontos, separando edificação, vegetação e solo, e registrando o atributo “classe” conforme o padrão ASPRS. O resultado é apresentado na figura 6.57.

Os principais parâmetros adotados nesta etapa foram:

- Altura mínima de objetos (*ground-offset*) = 2 m
- Desvio do plano (*planar*) = 0,1 m
- Rugosidade (*rougness*) = 0,4 m
- Área de pesquisa (*search-step-area*) = 2 m

Figura 6.57- - Resultado da classificação (comando *lasclassify - lastools*)



Fonte: Autor

Na comparação visual com ortofotos, constatou-se que a maioria das edificações (em laranja) foi bem classificada, bem como o sistema viário classificado como solo (em marrom) e a vegetação (em verde).

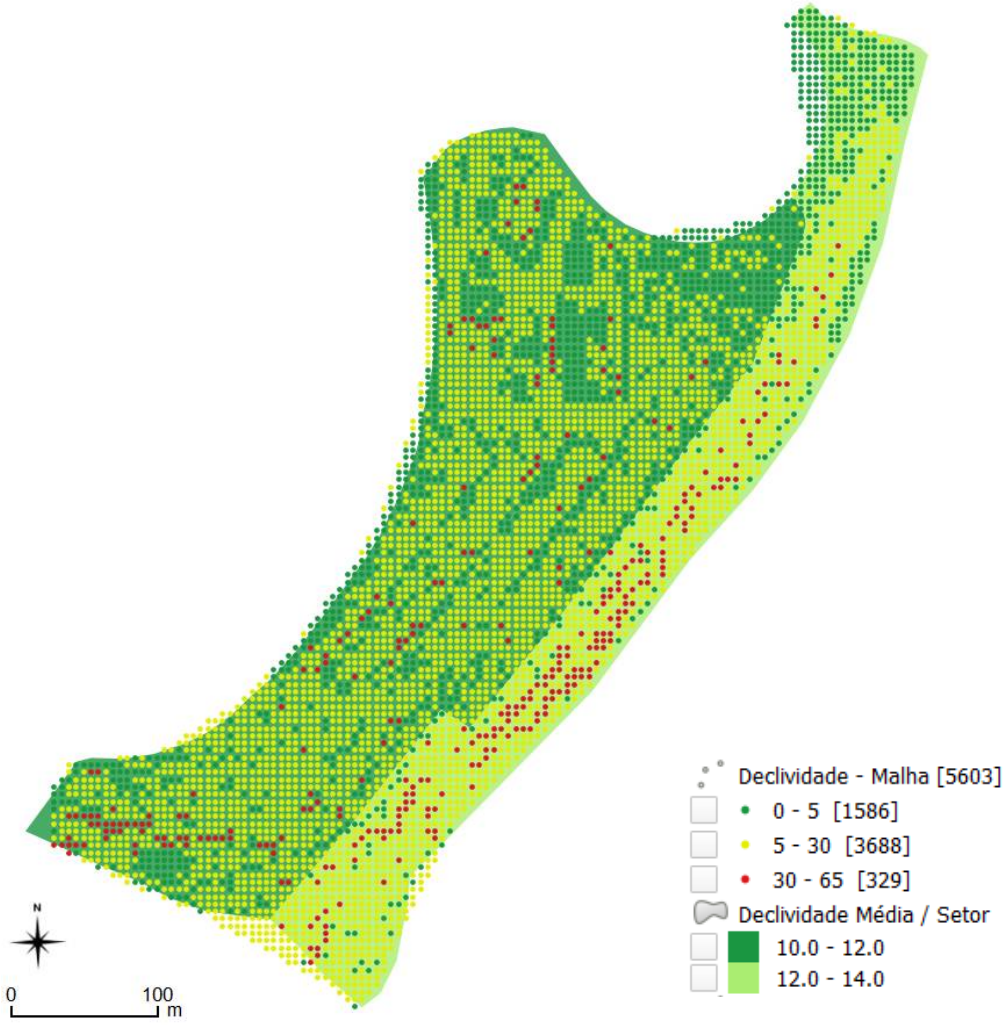
6.3.2. Topografia - Declividade do terreno

O principal parâmetro adotado na geração da grade foi:

- Espaçamento da grade (*step*) = 5 m

A representação por pontos categorizados segundo as três classes adotadas pelo IBGE no LIT: 0 a 5 % (relevo plano), 5 a 30% (relevo moderado) e acima de 30% (relevo acentuado), é apresentada na figura 6.58 a seguir.

Figura 6.58- - Declividade do terreno em pontos da grade (5 x 5 m) e na média por setor.

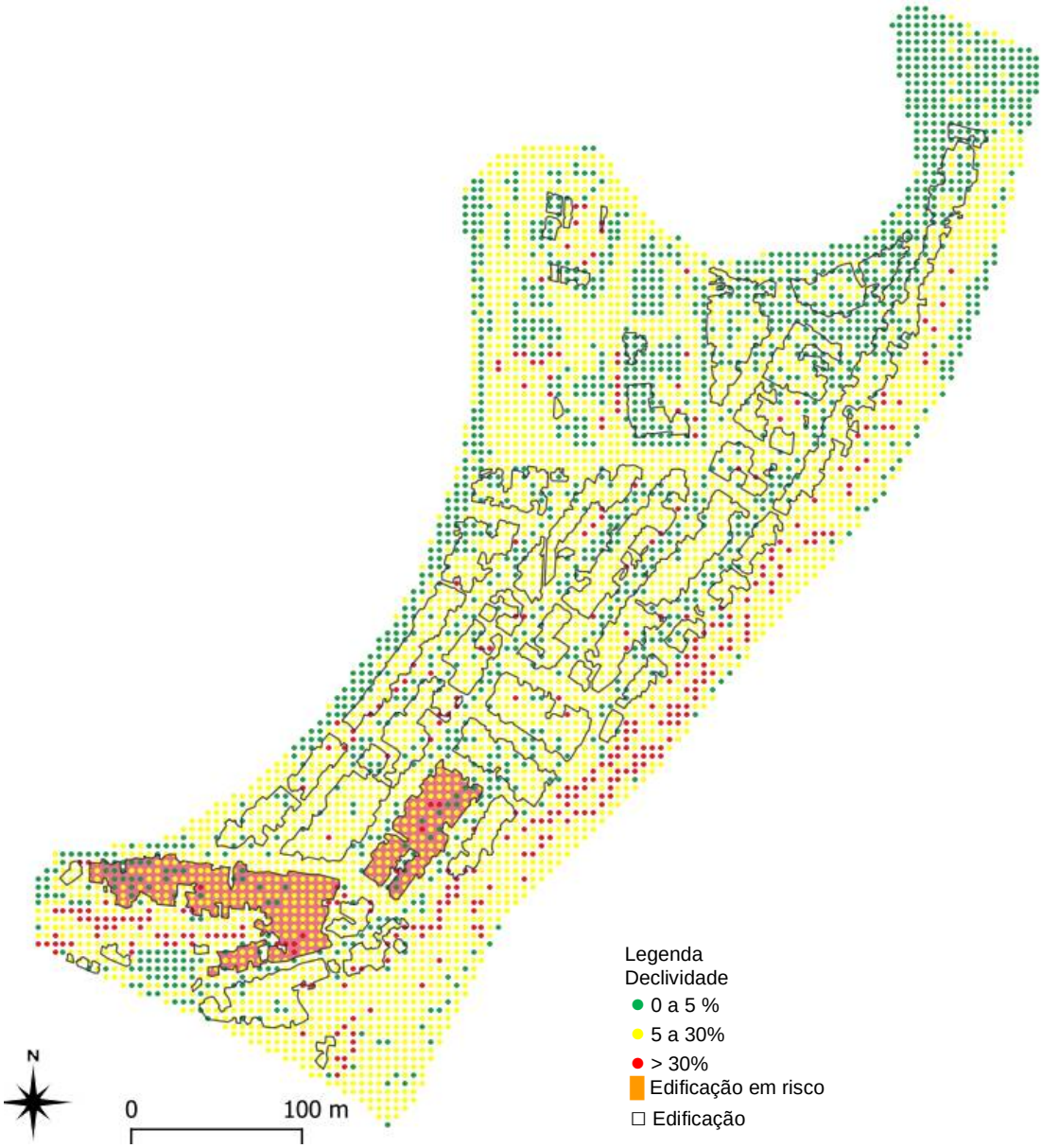


Fonte: Autor.

Nota-se que alguns pontos isolados de alta declividade (até 65%), em vermelho na figura, são erros de classificação (edificação ou vegetação classificados como terreno). A maioria dos pontos (amarelo) possui declividade entre 5 e 30 %, ou seja, considerada moderada pelo critério LIT-IBGE, entretanto a média da área do setor resulta entre 10 e 12% (verde escuro na figura).

O resultado da sobreposição é apresentado na Figura 6.59 a seguir. Embora tenha-se calculado um valor médio da declividade para o aglomerado como um todo, efetivamente a ocorrência de um trecho de declividade maior que 30% em um aglomerado é suficiente para vetar a ocupação como prevenção do risco ao deslizamento ou outro tipo de risco ligado à topografia acentuada (área delimitada em laranja).

Figura 6.59- - Sobreposição dos aglomerados ao mapa de declividade. Conjuntos de mais de quatro pontos da grade de valor maior que 30% contidos em aglomerados são considerados “risco”



6.3.3. Verticalização - Altura das edificações

Foram calculados, além da altura de cada edificação, os valores agregados por setor. A associação do valor da altura depende do delineamento dos polígonos, que teve como parâmetro a concavidade[38] = 1,5 m. O resultado é apresentado na figura 6.60.

Figura 6.60- - Resultado do delineamento das edificações com parâmetro de concavidade 1,5m

[38] Concavidade (*concavity*) é o valor (em metros) da menor feição a ter seu contorno delineado

Fonte: Autor (polígonos) e Prefeitura de Campinas (ortofoto).

Nota-se na figura 6.60 que os polígonos gerados são agregados de várias edificações, limitando o uso do centroide como representação da densidade, como veremos adiante. Ficou evidente a restrição da densidade original que limita a concavidade a 1,5m, e consequentemente produz o delineamento agregado.

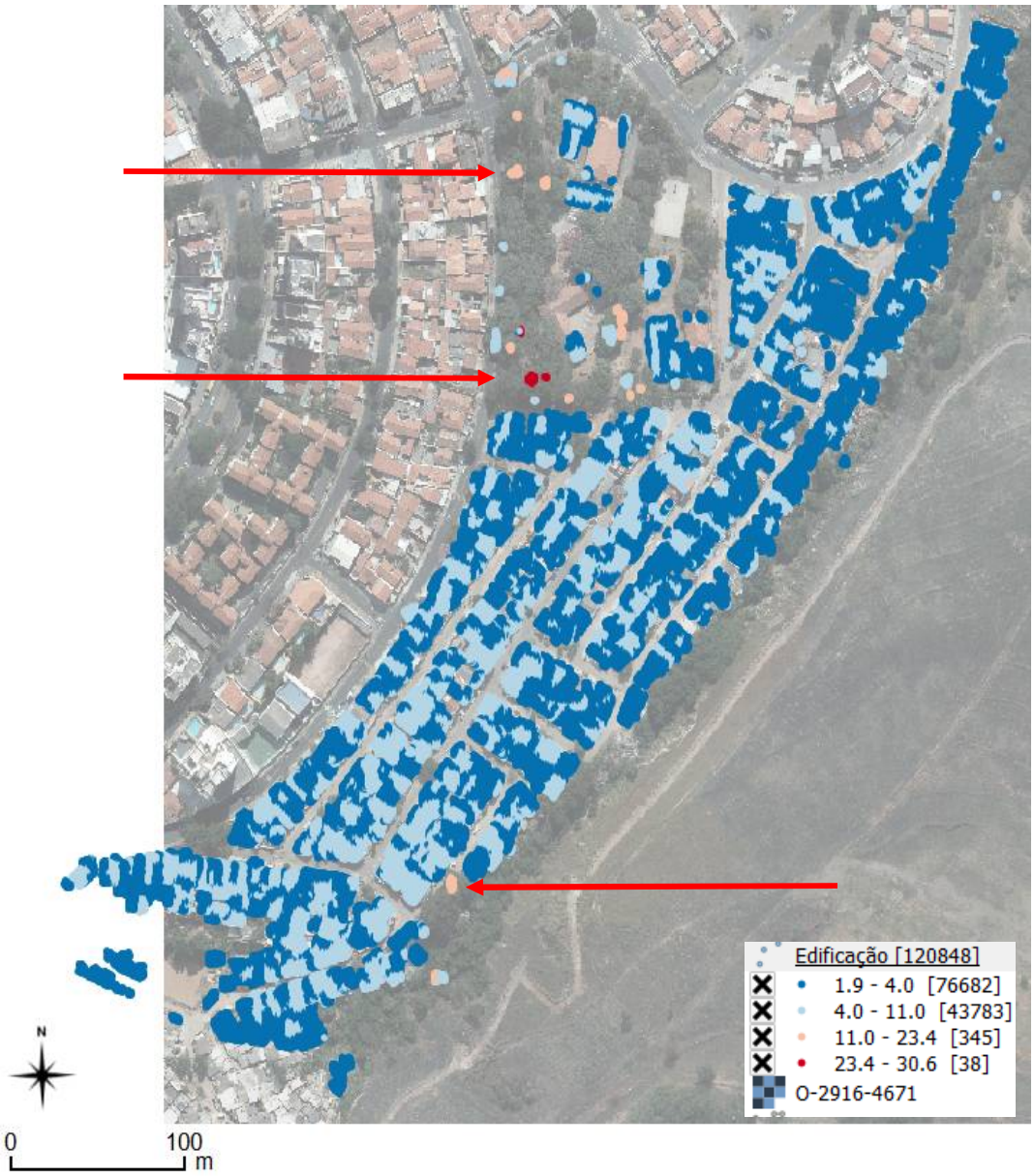
Nesta etapa houve o desafio de individualizar a edificação a densidade de 2 ppm^2. Ainda que no aglomerado “Buraco do Sapo” há certa uniformidade na verticalidade (entre um e dois pavimentos), o cálculo das estatísticas para a altura é prejudicado, uma vez que o intervalo entre mínima e máxima é muito grande, conforme resultados por polígono delineado (p. ex. para um polígono, os valores mínimo e máximo são respectivamente 1,95m e 9,62m).

Uma vez que não foi possível delinear uma edificação para cada polígono, a moda foi calculada como valor representativo para a predominância

dentre os valores das alturas do aglomerado. Para isso, as alturas foram arredondadas para múltiplos de 1m.

A análise visual permite afirmar que valores acima da maior moda (6m) são resultado de erros de classificação, pois são pontos de vegetação. Na figura 6.61, os pontos Lidar de altura superior a 11m estão em laranja e vermelho, e evidentemente localizados na vegetação arbórea dentro da escola municipal. Nota-se o predomínio de alturas entre 1,9 e 4,0 m em azul escuro, em seguida de alturas entre 4 e 11m, em azul claro, nas edificações deste aglomerado.

Figura 6.61 - Pontos de edificação classificados por altura (os números na legenda indicam a quantidade de pontos em cada intervalo de altura). Pontos de vegetação classificados erroneamente como edificação aparecem em laranja e vermelho (setas indicando a localização).



Fonte: Autor.

O valor da moda da altura do conjunto de pontos internos a cada polígono delineado foi então atribuído ao centroide.

A figura 6.62 apresenta o resultado com visível redução na quantidade de polígonos em relação à quantidade de edificações da ortofoto, conforme já comentado anteriormente, em virtude do delineamento ter agregado várias edificações.

Figura 6.62- - Delineamento de edificações com altura calculada pela moda

Fonte: Autor.

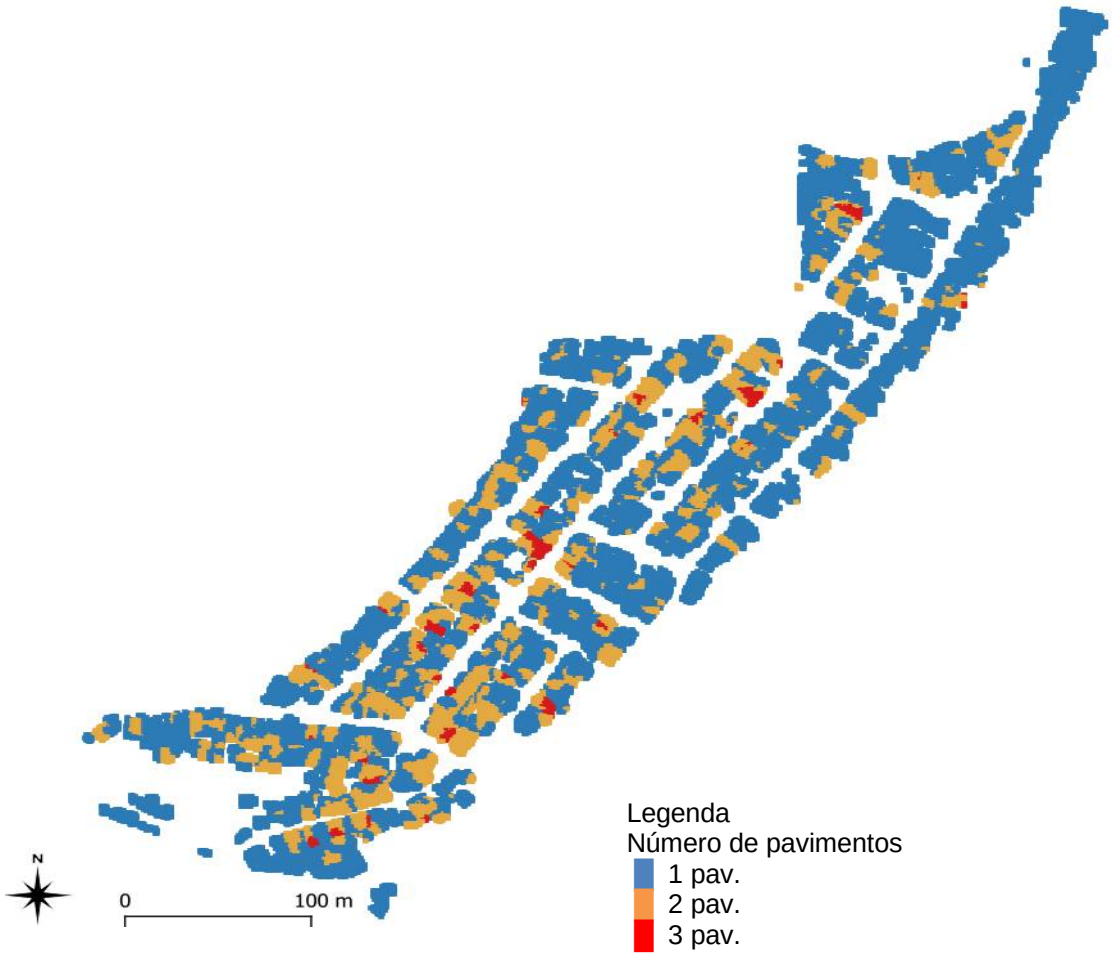
Como resultado do indicador de verticalização do aglomerado, foi calculada a média das MODAS das alturas dos centroides de cada setor e do aglomerado, como forma de generalização para o nível de detalhe e a escala de análise. Pela análise da MODA a predominância foi de alturas de 3m e a média foi 3,3m, ou seja, UM pavimento.

A figura 6.63 apresenta os aglomerados com o número de pavimentos. Apenas um polígono dentro da área da escola teve altura de dois pavimentos.

Figura 6.63 - Aglomerados de edificações com número de pavimentos

Após a geração da grade de 1m de espaçamento, o resultado da atribuição de pavimentos em função da altura foi considerado mais adequado figura 6.64).

Figura 6.64 - Número de pavimentos em grade de 1m



6.3.4. Espaçamento - Área construída

Uma limitação em função do delineamento incipiente das edificações, é o agrupamento de várias unidades em um único polígono, e portanto, único centroide. Por isso, a análise foi realizada com base nos pontos Lidar classificados como edificação, generalizados para uma distribuição em grade de espaçamento 1m e não nos centroides de polígonos como será o caso nas outras áreas de estudo.

Se calculada a estatística do vizinho mais próximo, o resultado será o próprio espaçamento de 1m adotado na grade e o índice Z (muito negativo) revela o adensamento dos pontos, conforme apresentado no Quadro 6.6.

	Distância média observada (m)	Distância média esperada (m)	Índice do vizinho mais próximo:	Número de pontos:	Z-Score:

“Buraco do Sapo”	1,0	1,4	0,718	40.706	-108,73

Quadro 6.6 - Estatística do vizinho mais próximo para a grade de 1 m das edificações

Da mesma forma, para efeito de comparação o mapa de densidade (estimador kernel) foi gerado tanto para o centroide do aglomerado (figura 6.65) como para os pontos da grade (figura 6.66), e o resultado no segundo mapa foi bem mais representativo que no primeiro.

Figura 6.65- - Mapa da densidade construída - a partir dos centroides

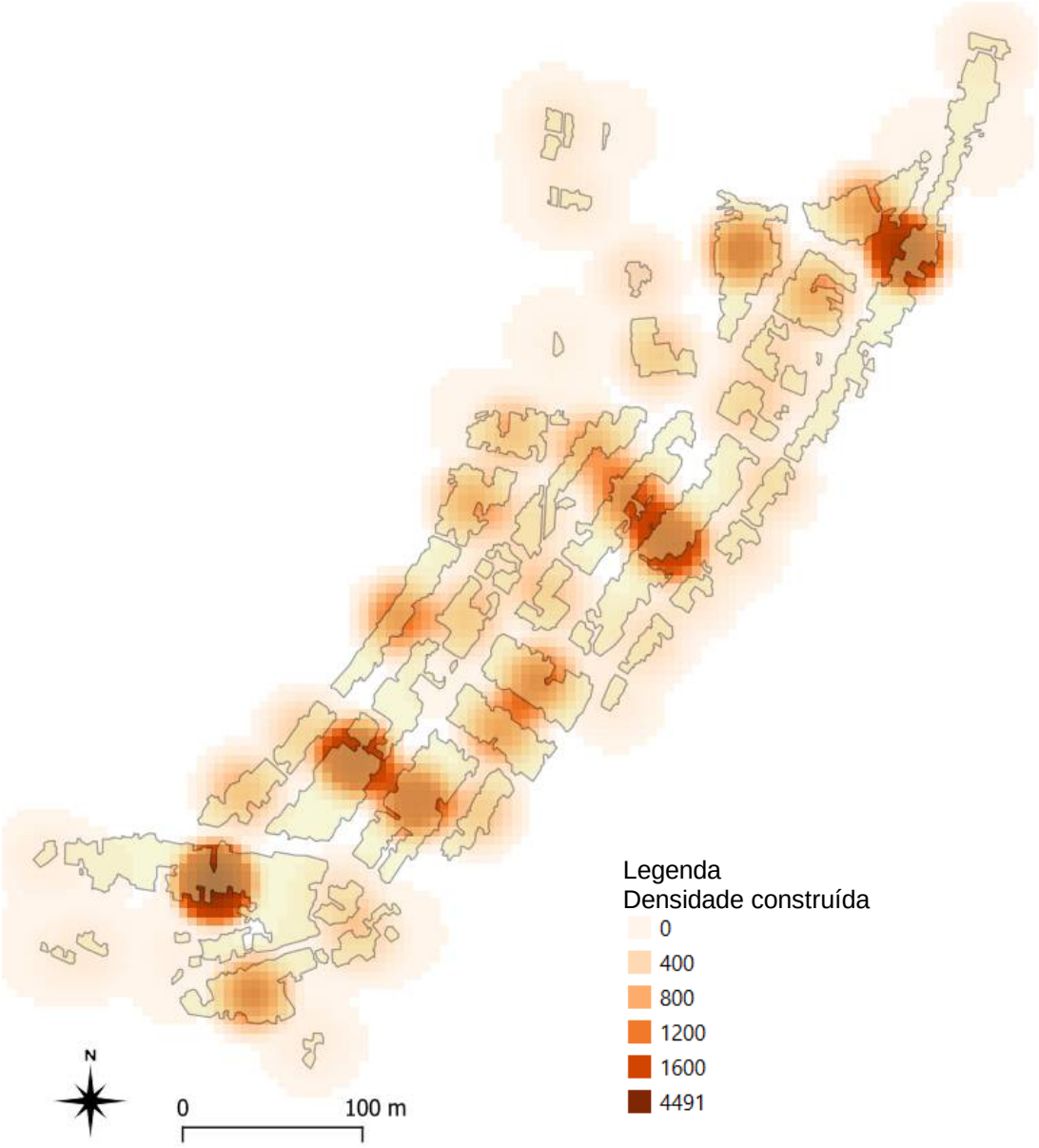
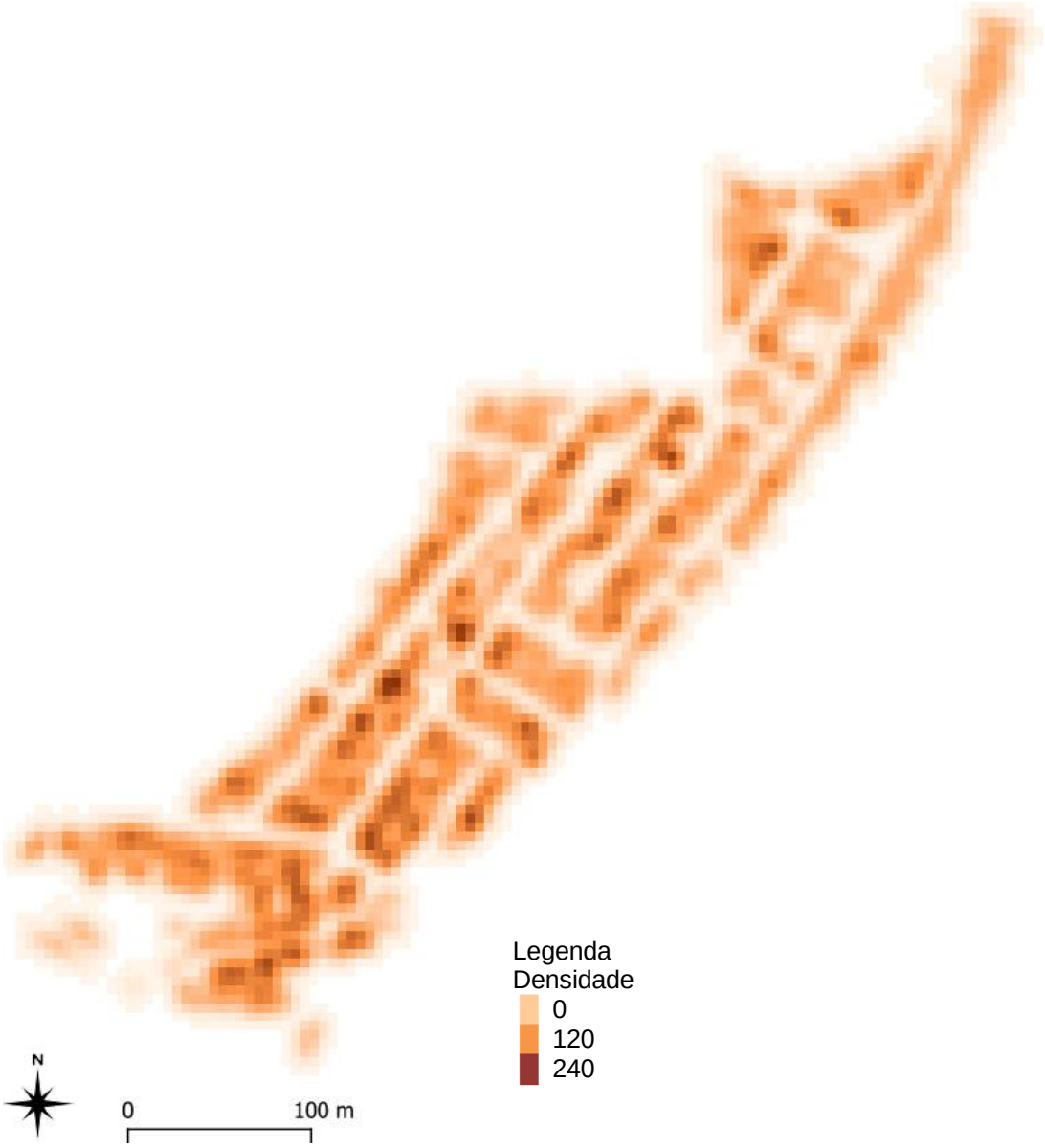


Figura 6.66- - Mapa da densidade construída - a partir da grade 1m



A área construída foi calculada de duas formas diferentes, para efeito de comparação. Primeiro, pela área do delineamento das edificações multiplicada pelo número de pavimentos inferido pela moda; para o delineamento obtido, o resultado é 39.947,0 m^2 x 1 = 39.947,0 m^2. Segundo, pela soma dos pontos de edificação na grade de 1m, cada ponto sendo considerado como 1m^2 de área multiplicada pelo número de pavimentos inferido pela altura; o resultado obtido foi 52.424,0 m^2; neste cálculo do segundo caso, foi descontada a área da escola.

O Coeficiente de Aproveitamento (CA) foi calculado pela área construída obtida no segundo caso, dividida pela área total do aglomerado, resultando 52.424,0 m^2 / 136.624,75 m^2= 0,384.

6.3.5. Circulação e acesso

A maioria das vias de acesso (em verde na figura 6.67) possui largura mínima de 4 m, o que configura um arruamento passível de trânsito de veículos, para uma área de ocupação precária, no qual não há vias estreitas (não há cores vermelha e roxa).

Figura 6.67- - Vias de acesso

Com base no traçado realizado, foi realizada uma simulação estatística dos atributos, para orientar o uso das métricas. Esses resultados

são apresentados na tabela a seguir (tabela 6.5). Foram adotados o comprimento de cada eixo viário e o atributo “largura”. Para dimensionar a regularidade da largura das vias foi adotado, o desvio padrão (“dp larg”) como métrica dessa característica.

Tabela 6.5- - Estatística dos atributos de vias de acesso
∑ compr / área do aglomerado = capilaridade; 3547,44m / 136.624,75m^2 = 0,026 m/m^2
O dp larg é o desvio padrão da média das larguras

∑ compr. (m)	larg media (m)	moda das larg (m)	dp larg (m)	N	capilaridade (m/m^2)
3547,44	9,75	9,0	3,07	18	0,026

6.4. Resultados: Rio de Janeiro - RJ

A tipologia construtiva do aglomerado (figura 6. 68) tem características típicas de favela como ausência de recuos entre os lotes, lotes pequenos, residências com alturas variadas, traçado desordenado, não atendimento às legislações de parcelamento e edificação, etc., sendo visível nas imagens sua verticalização e adensamento.

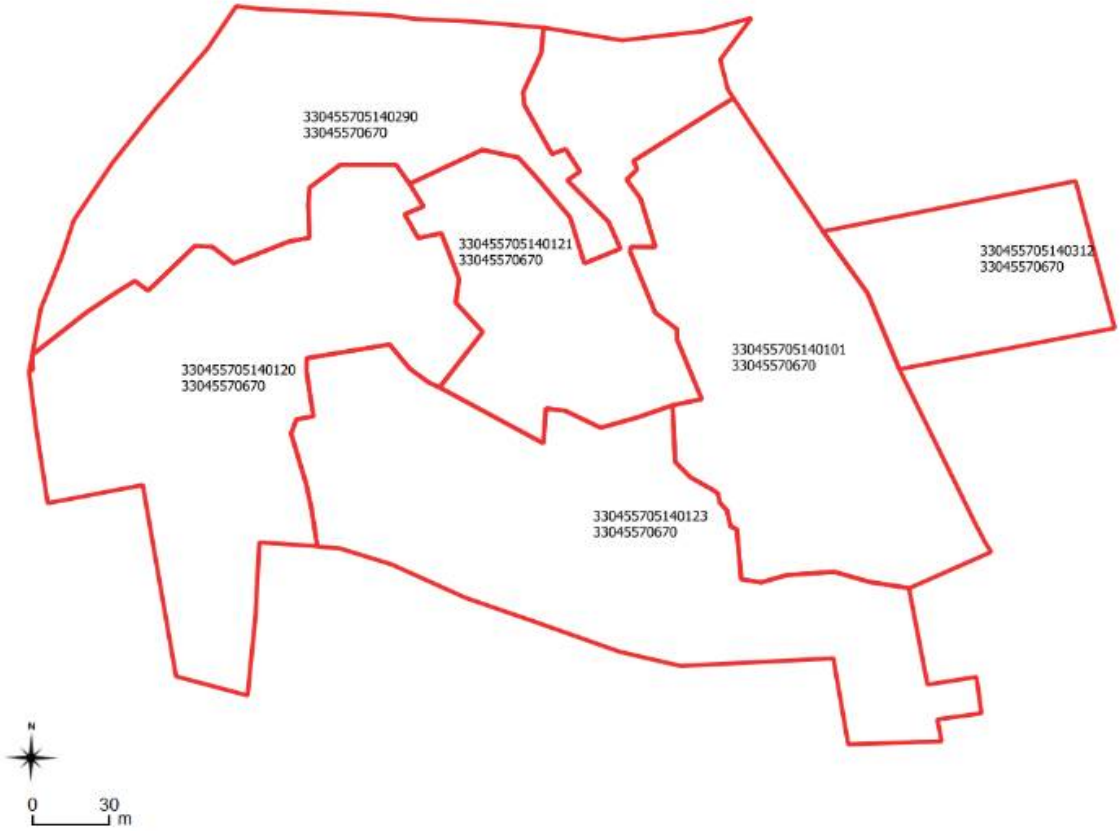
Figura 6.68- - Tipo-morfologia do aglomerado.

Fonte: Google 3D e Street View

Em virtude do adensamento domiciliar[39], a parte sul do aglomerado (área selecionada para o estudo) “Parque Vila Isabel” é formada por seis setores subnormais, conforme a figura 6.69 a seguir.

[39] O IBGE considera que o aglomerado deve conter entre 51 e 350 domicílios, e caso esse número seja maior, deve-se dividi-lo em quantos setores forem necessários para manter esse limite (IBGE, 2014)

Figura 6.69- - Aglomerado Subnormal “Parque Vila Isabel” (parcial - área sul). Cada setor é identificado pelo “Número do Setor Censitário” (código superior) e do “Aglomerado Subnormal” (código inferior).



Fonte: IBGE, 2010

A imagem Google (2016) indica a alta densidade de área edificada e sua ocupação, excetuando-se áreas de vegetação em terreno com declividade acentuada (figura 6.70).

Figura 6.70- - Aglomerado “Pq. Vila Isabel” (2010) sobre imagem Google (2016).

Fonte: Google

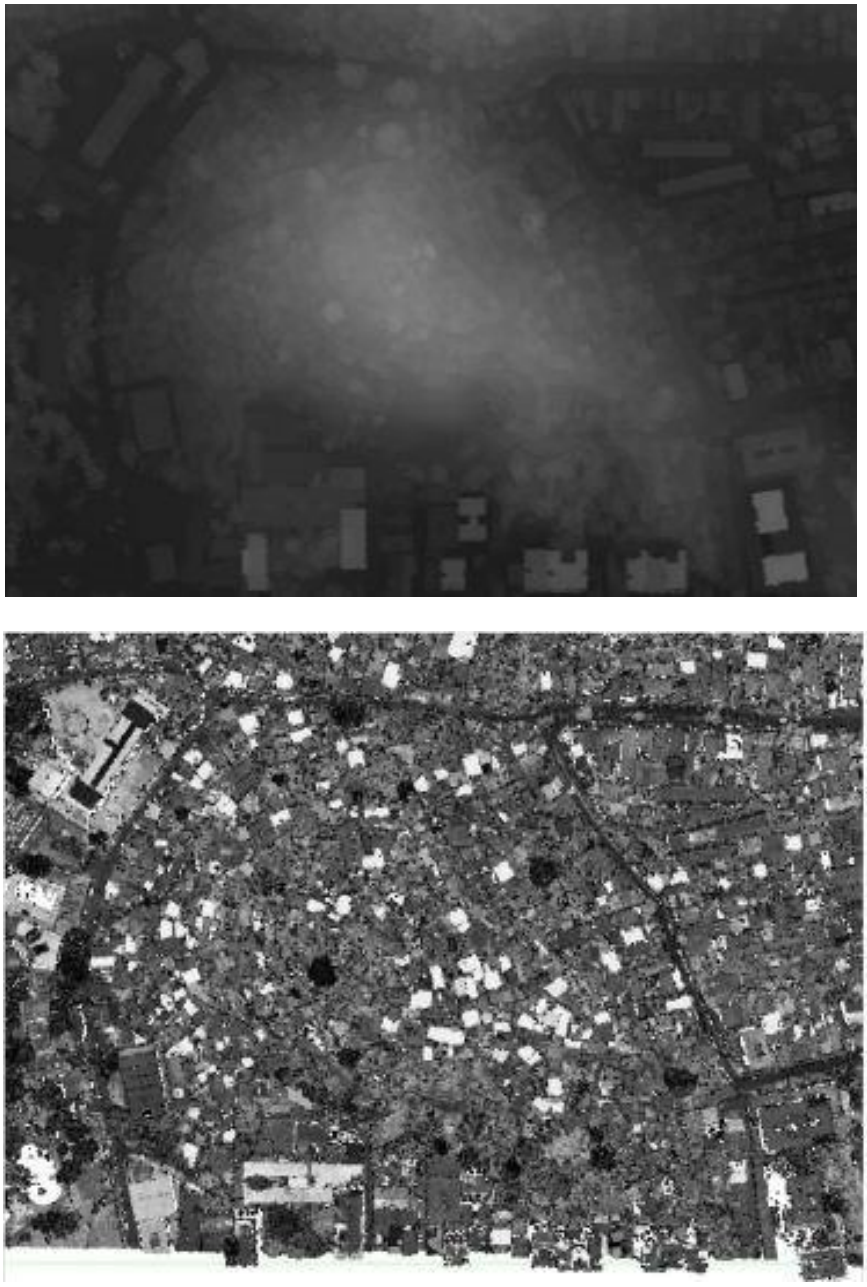
6.4.1. Classificação

Os principais parâmetros adotados no processamento, de acordo com os conceitos vistos no item 4.4, foram:

- Filtragem Solo/Não solo (g*round* + *height*)
    - Passo (*step*) = 8m;
    - Relevo (*steep-hills*) = 8 (*ultra fine* = relevo acentuado);
    - Pico (*spike*) = 1m
- Classificação (*classify*)
    - Altura mínima de objetos (*ground-offset*) = 2 m;
    - Desvio do plano (*planar*) = 0,1 m;
    - Rugosidade (*rougness*) = 0,4 m;
    - Área de pesquisa (*search-step-area*) = 2 m
- Poligonação (*boundary*)
    - Concavidade = 1 a 2 m;

As imagens intensidade são consequência da reflectância de cada material e ângulo de incidência do feixe Laser. A aplicação de limiares a imagem de contraste foi útil como dado adicional para a detecção de bordas e visualização das edificações (figura 6.71). A imagem à esquerda indica menor granularidade, o que facilitou a detecção de grandes edificações, enquanto à direita foi possível observar as pequenas edificações em realce (tons claros) e a vegetação com baixa intensidade (tons escuros).

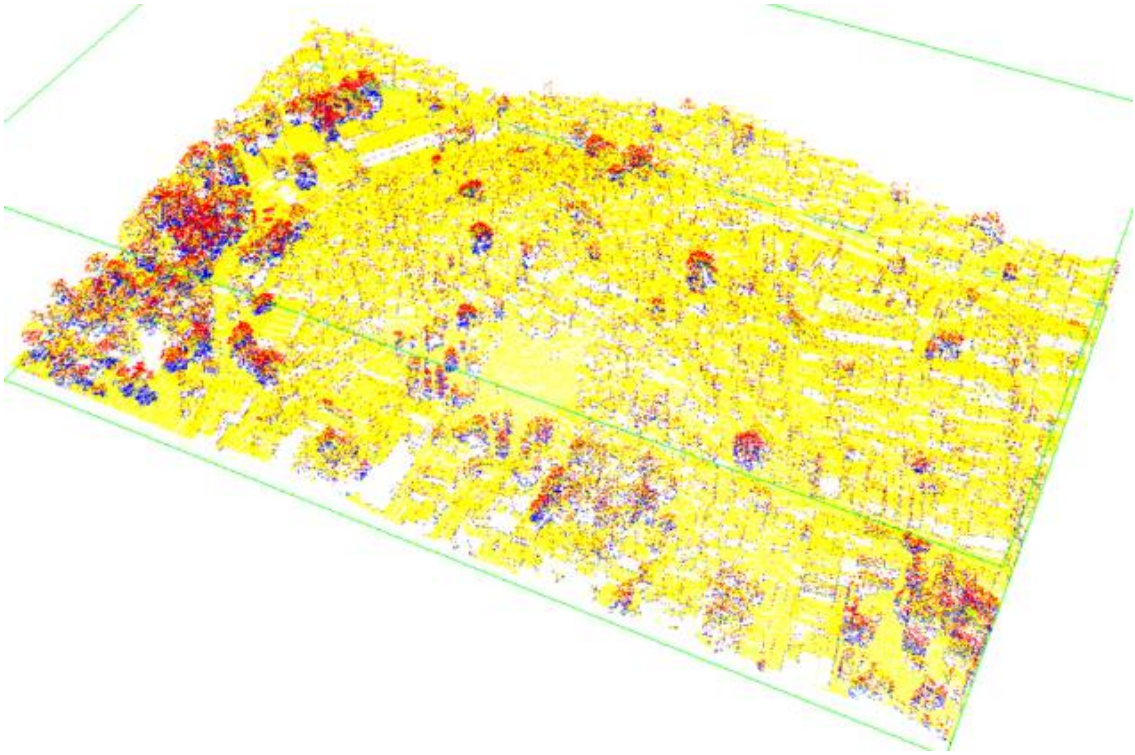
Figura 6.71 - Imagem intensidade com diferentes contrastes nas tonalidades



Fonte: Autor.

A vegetação pode ser visualizada pela diferenciação de cores e pelo número de retornos. A figura 6.72 mostra baixa concentração de vegetação (múltiplos retornos) em azul, verde e vermelho a oeste do setor, visto aqui em perspectiva.

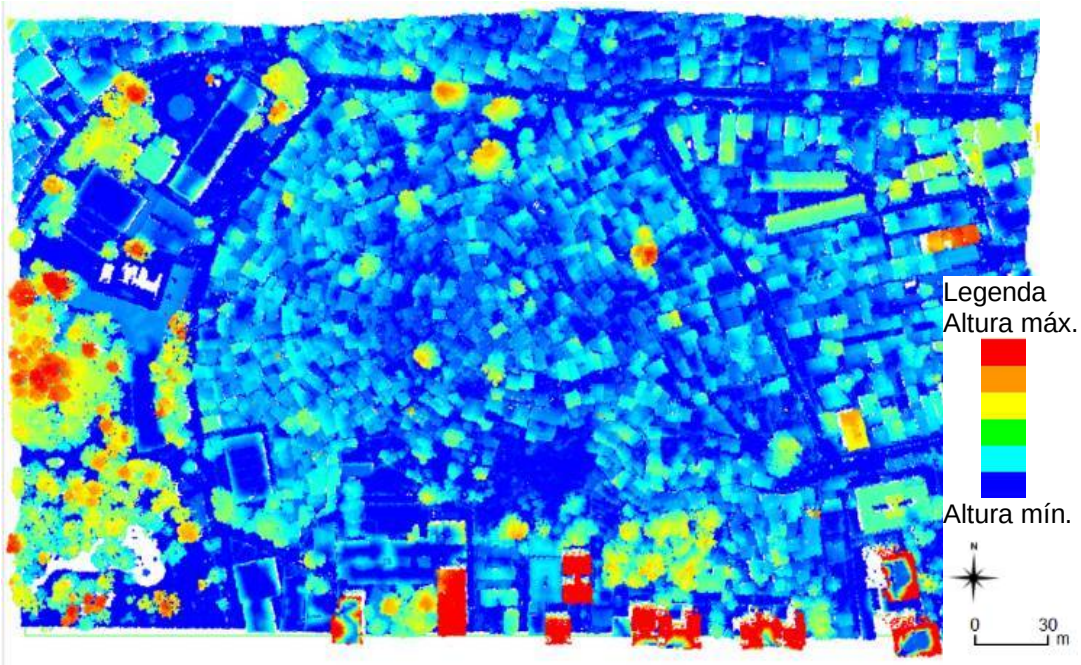
Figura 6.72 - Arquivo 2013 bruto. Imagem colorida pelo número de retornos: amarelo = único, azul (3º.), verde (2º.) e vermelho (1º.) = múltiplos.



Fonte: Autor.

O processamento de separação de solo e não-solo foi realizado com sucesso e seus resultados são utilizados para determinação das alturas de todos pontos não-solo. O modelo de superfície normalizada (MDSn) é apresentado na figura 6.73. Entretanto, edificações de maiores dimensões (galpões e edifícios públicos principalmente), têm apenas seus pontos de borda com altura corretamente determinada. A oeste do setor temos vários casos, nos quais se notam os maiores retângulos com tonalidade clara somente na borda, e a parte interna em tonalidade escura (altura do solo).

Figura 6.73- - MDSn: As cores representam alturas em relação ao solo (a opção "*compute height*" armazena o valor calculado como atributo na classe "usuário").

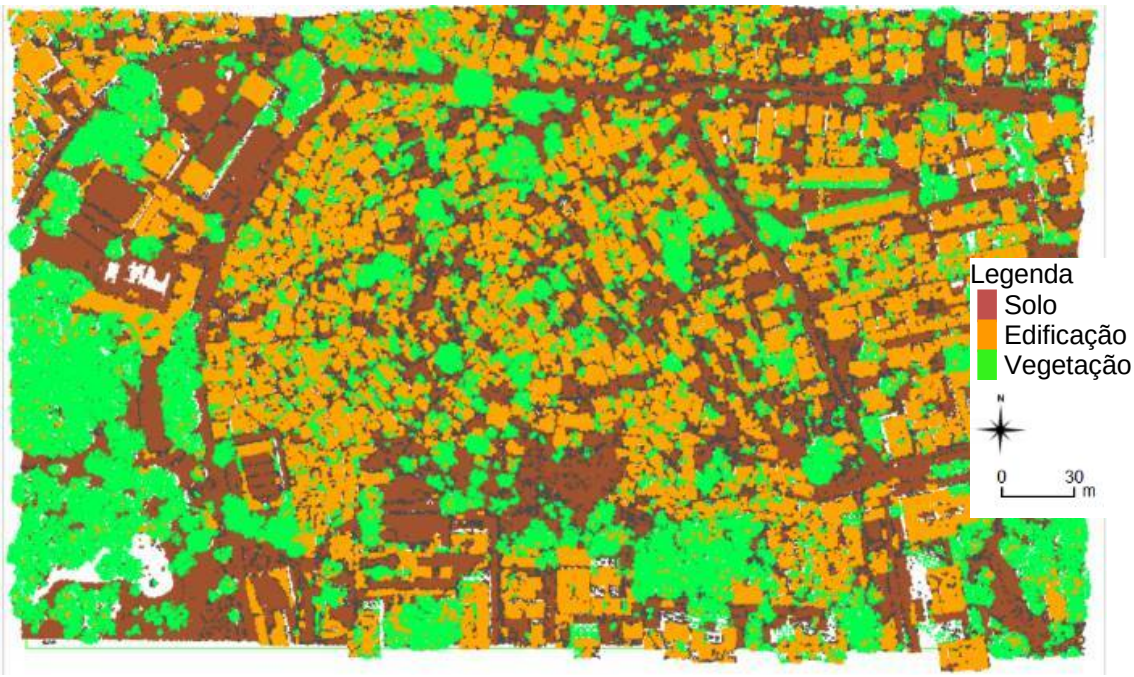


Fonte: Autor.

Nota-se a noroeste na imagem, por exemplo, edificações maiores em área, com altura zero na sua parte interna (azul). entretanto, as pequenas edificações, que são o objetivo do processamento, puderam ser identificadas em sua maioria pela altura em relação ao solo, pois a imagem mostra a coloração mais clara (azul claro) em toda parte interna dos pequenos retângulos. A ocupação formal por edifícios de alturas maiores, nas bordas sul e oeste, foi bem representada.

O resultado da classificação é apresentado na figura 6.74. Nota-se que a maior parte deste assentamento é ocupado por edificações de dimensões semelhantes (menos de 10 m de lado) e as áreas de solo exposto e vegetação não ocupadas, são aquelas de maior declividade, conforme será visto no próximo item de análise.

Figura 6.74- - Resultado da classificação



Fonte: Autor.

6.4.2. Topografia - Declividade do terreno

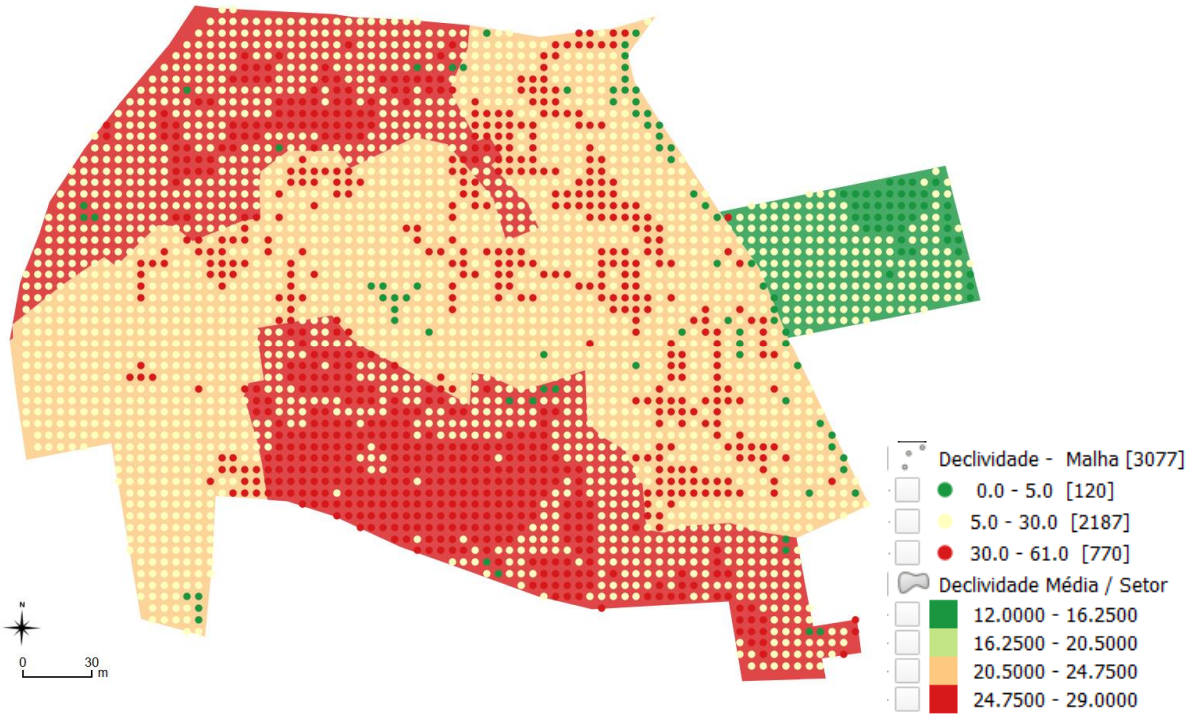
O principal parâmetro adotado nesta etapa foi:

- Espaçamento da grade (*step*) = 5 m

A representação por pontos categorizados segundo as três classes adotadas pelo IBGE no LIT: 0 a 5 % (relevo plano), 5 a 30% (relevo moderado) e acima de 30% (relevo acentuado), é apresentada na figura 6.75 a seguir.

Nota-se que a maior declividade, na representação por pontos da grade em vermelho, foi localizada com precisão, e que na média do setor influenciou para um valor também alto (áreas vermelhas) de forma coerente. Nas áreas amarelas, entretanto, temos a ocorrência de pontos de alta declividade, o que na maior parte representa corretamente uma pequena distância em desnível, mas também registrou o “desnível” entre terreno e edificação, resultado do erro de classificação. O setor mais moderado (declividade entre 5 e 30% na maior parte dos pontos) resultou em uma média de menos de 5% (setor em verde, mais a leste).

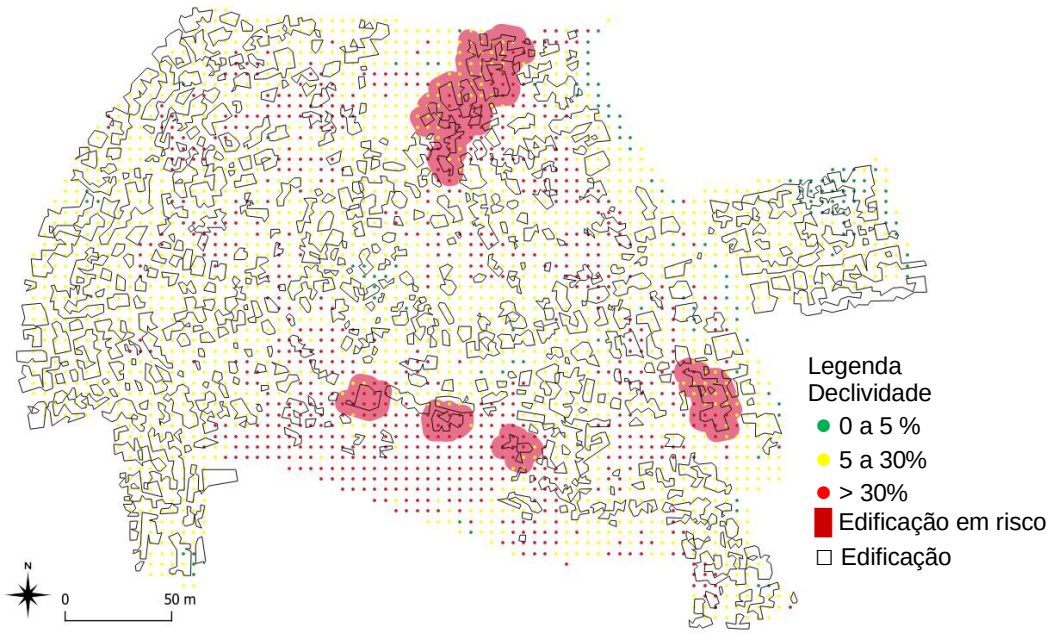
Figura 6.75- - Declividade na grade 5 x 5 m e média por setor



Fonte: Autor.

Ainda que a média seja 30%, a sobreposição das edificações indica os locais de atenção para risco de deslizamento ou restrições mais severas, se no mínimo quatro pontos (em vermelho) estiverem contidos em qualquer polígono. O resultado da sobreposição é apresentado na Figura 6.76 a seguir.

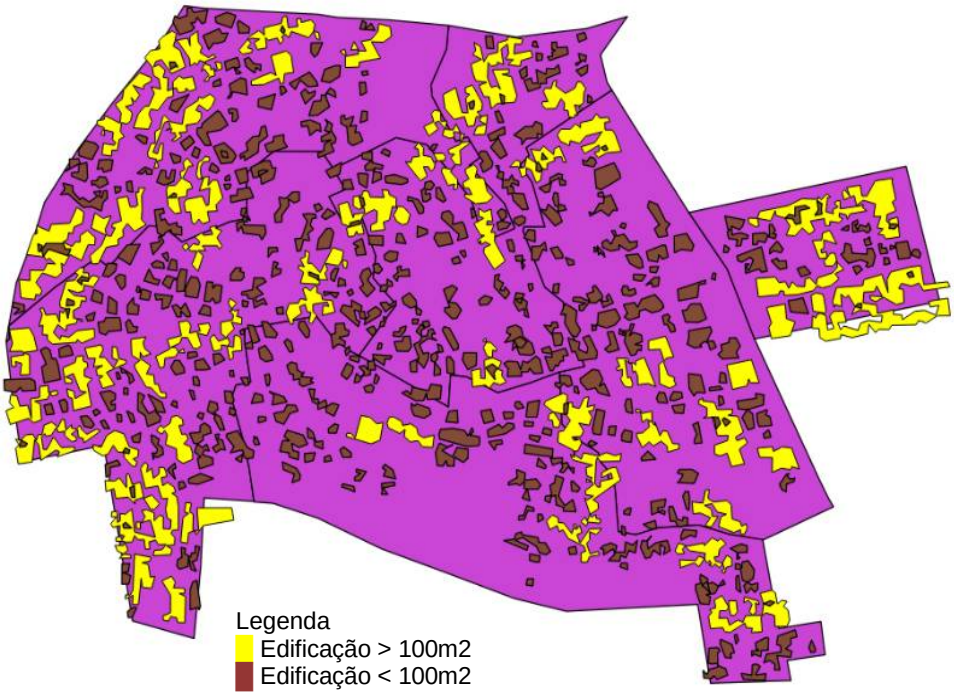
Figura 6.76- - Sobreposição das edificações ao mapa de declividade. Conjuntos de mais de quatro pontos da grade de valor maior que 30% contidos em edificações são considerados “risco”



6.4.3. Verticalização - Altura das edificações

Embora a densidade do levantamento seja maior que no caso anterior de Campinas, o resultado do delineamento com parâmetro concavidade de 1m, produziu polígonos que ainda agregam várias edificações sem que se obtenha cada uma como única feição (relação Verdadeira Positiva da classificação, ou relação 1 para 1 entre produto e checagem). Realçando essa agregação, na Figura 6.77 foram destacados em amarelo os polígonos de área maior que 100 m^2, o que é raro para edificações nesta área.

Figura 6.77 - Resultado do delineamento das edificações com parâmetro de concavidade 1m (*concavity*). As áreas em amarelo são maiores que 100m^2, o que indica o erro presente na individualização da edificação.



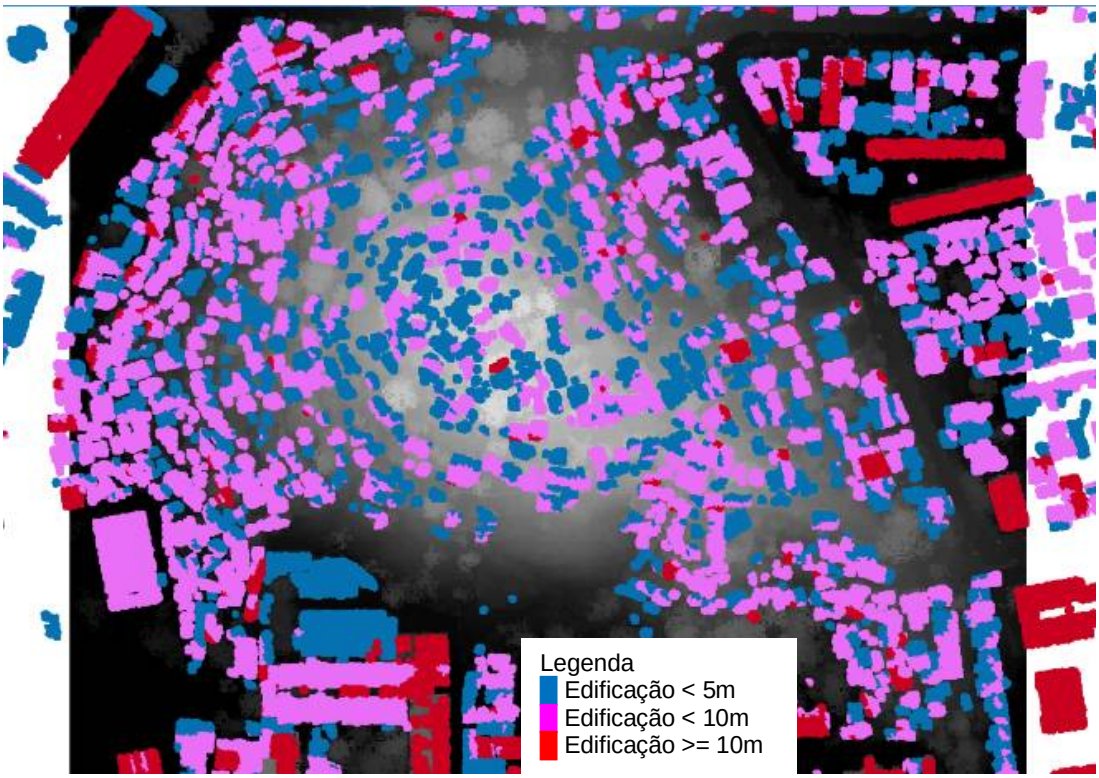
Fonte: Autor.

Para cada polígono delineado, foi calculada a mediana das alturas, que por sua vez foi associada ao centroide da edificação hipotética (polígono). As figuras a seguir, mostram os pontos Lidar categorizados em cores por altura (figura 6.78) e o resultado do cálculo da altura mediana nos centroides (figura 6.79).

A primeira figura mostra em rosa os pontos com altura entre 5 e 10 m e em azul altura menor que 5m. Vale destacar a pouca ocorrência de pontos em vermelho (altura maior que 10m), representando raras edificações com mais de 3 pavimentos ou exemplares arbóreos erroneamente classificados.

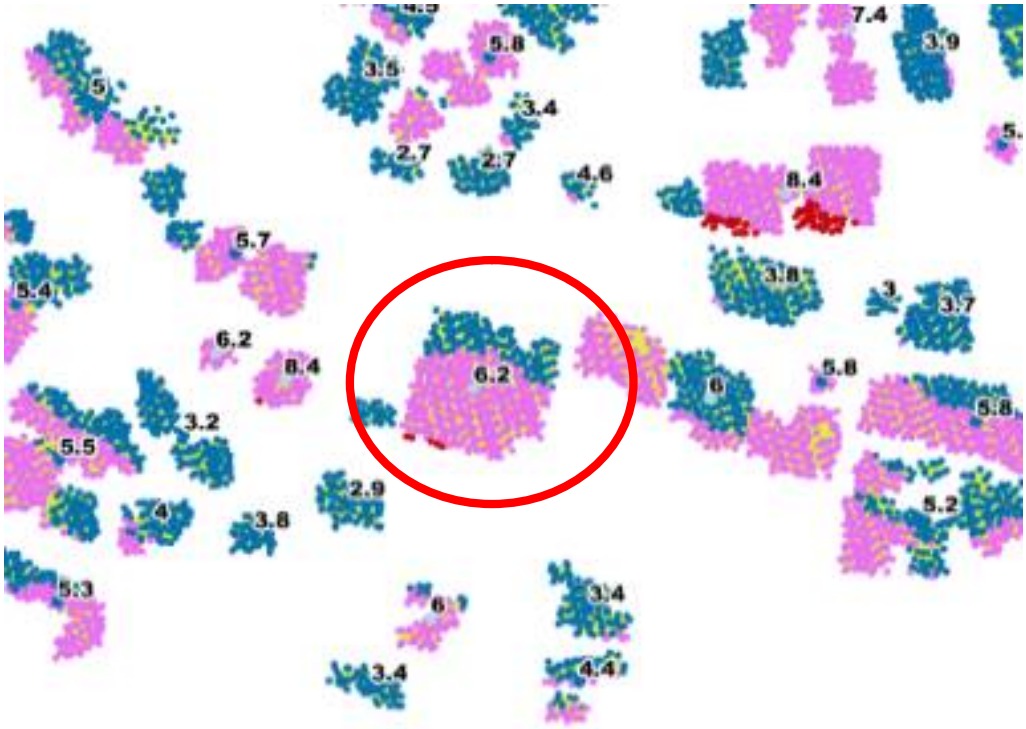
A segunda é uma ampliação de uma área específica, que procura destacar a detecção com sucesso da variação da altura em uma edificação, em função da inclinação do terreno. Especificamente, uma delas bem caracterizada como retângulo no centro da figura, cuja altura média é 6,2m, apresenta coerentemente uma face em azul (voltada para a parte mais alta do terreno) e a outra em vermelho (voltada para a parte mais baixa do terreno).

Figura 6.78 - Pontos de edificação categorizados por altura



Fonte: Autor.

Figura 6.79 - Centroide da edificação hipotética com altura calculada a partir dos pontos Lidar.



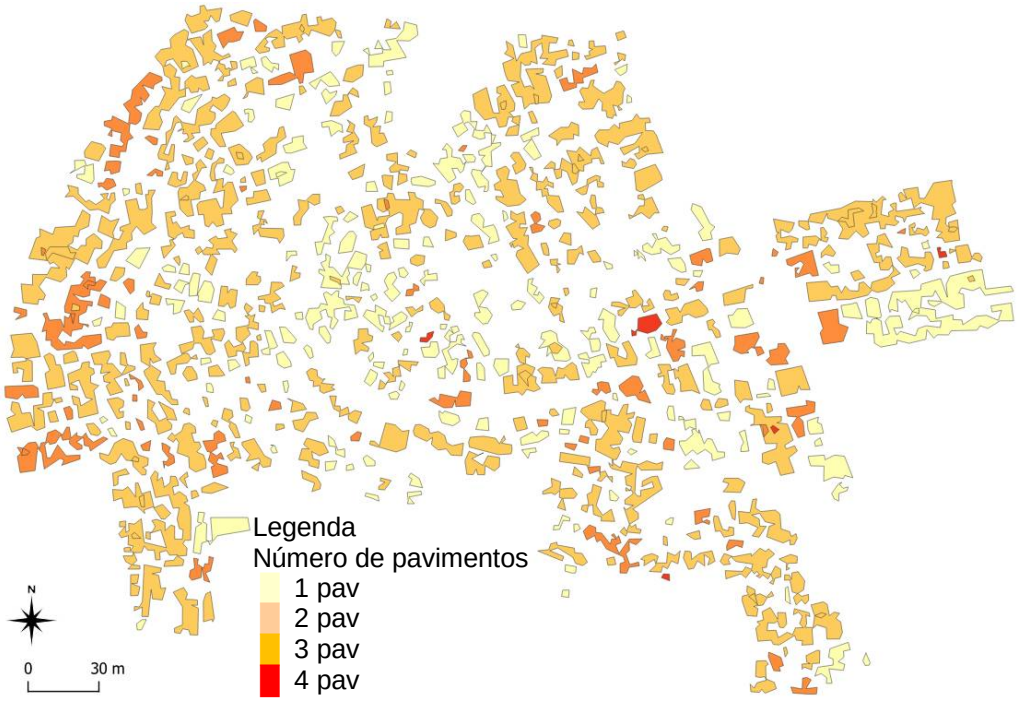
A seguir foi generalizado o valor de altura por setor censitário. O valor em metros associado a cada setor representa a média das alturas dos centroides das edificações hipotéticas, ainda que ocorram alturas de até 12,59m, os valores são semelhantes nos seis setores (entre 5 e 6 m).

No último nível de generalização foi calculada a média entre os setores para um valor associado ao aglomerado, permitindo inferir o número médio de pavimentos da área (figura 6.80).

O índice inter quartis (IQR) foi de 3,0m permitindo inferi-lo como um limiar para mudança de um para dois pavimentos. Foi adotado o limiar de 4,5 para o térreo por incluir a estrutura de telhado e 3,0 m para os pavimentos superiores. A função adotada para atribuição do número de pavimentos foi:

```
case
when "medianH"<2  then '0'
when "medianH"<=4.5 then '1'
when "medianH"<=7.5 then '2'
when "medianH"<=10.5 then '3'
when "medianH"<=13.5 then '4'
end
```

Figura 6.80 - Número de pavimentos



A análise do atributo “número de pavimentos” obtido resultou em uma predominância de dois pavimentos para o aglomerado. Embora a moda das alturas seja 3,0m, 50% das edificações tem altura entre 3,5 e 6,5m.

Como mencionado anteriormente, esta média deve ser usada com cautela, uma vez que as edificações variam em altura ou mesmo regras construtivas que definam o pé-direito adequado.

6.4.4. Espaçamento - Área construída

Com base nas edificações hipotéticas obtidas no passo anterior procede-se à estatística de vizinho mais próximo e geração do mapa de Kernel.

A tabela 6.6 a seguir apresenta os resultados por setor e para todo aglomerado.

Tabela 6.6 - Estatísticas de Vizinhança (Vizinho Mais Próximo) dos centroides de edificações por setor e para o total do aglomerado.

Setor	Distância média observada (m)	Distância média esperada (m)	Índice do vizinho mais próximo:	Número de pontos:	Z-Score:
290	7,929	19,202	0,413	77	-9,855
121	7,439	18,838	0,395	80	-10,354
120	7,086	14,395	0,492	137	-11,369
123	7,100	17,472	0,406	93	-10,952
101	7,730	18,064	0,428	87	-10,209
312	7,659	33,044	0,232	26	-7,494
agsn “V.Isabel”	7,437	7,528	0,988	500	-0,518

Para a interpretação teórica do índice do vizinho mais próximo, vale observar o valor próximo de 1,0 para a área total do aglomerado, enquanto cada setor apresenta valores bem menores. Assim, no nível de detalhe/escala do aglomerado a distribuição é próxima da normal, pois ao generalizar a análise, as diferenças entre cheios e vazios são atenuadas. Já no nível de detalhe/escala do setor, ficam evidentes os agrupamentos, sobretudo no menor

setor (312) cujo índice foi 0,232 com apenas 26 pontos. O índice Z[40] indica um alto grau de significância desses agrupamentos, uma vez que está em torno de -10 vezes o desvio padrão.

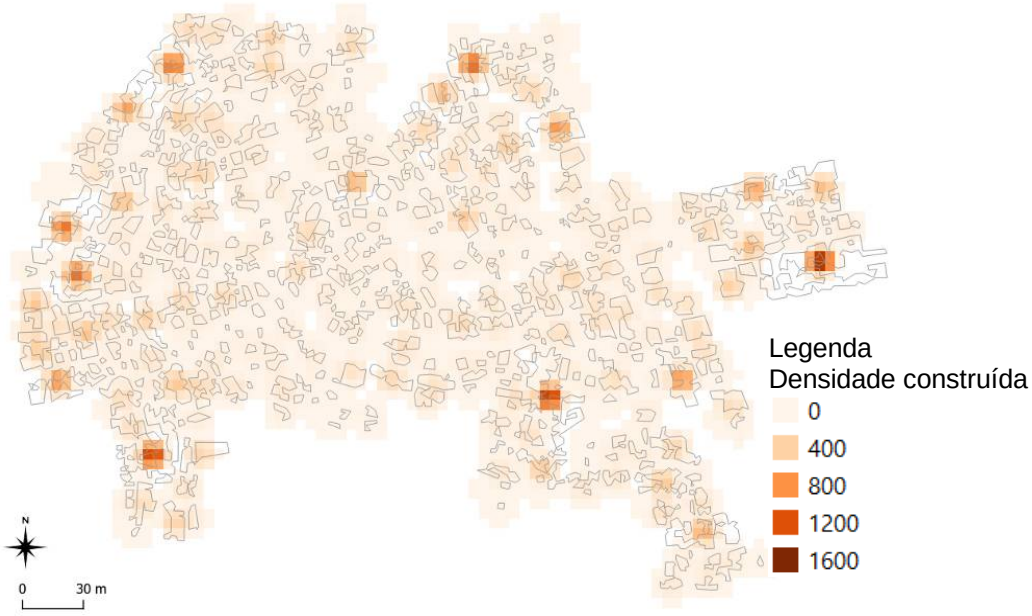
O mapa síntese a seguir (figura 6.81) tem o caráter de representação das componentes da edificação com seu volume (3D), uma vez que os pixels (5 m) representam o valor resultante da quantidade de pontos em sua área de influência (kernel) ponderado pelo atributo “altura”.

Outro fator de influência na geração do mapa da figura 6.81 é a predominância de edificações com dois pavimentos (a moda das alturas foi 3,0m e a média foi 5,4m). Ao considerar a densidade construída igual à área plana multiplicada pelo número de pavimentos, foi calculada a área construída para as diferentes agregações (edificação, setor e aglomerado).

Os parâmetros adotados na geração do mapa de densidade pelo estimador kernel têm base na etapa anterior. Uma vez que a distância média observada foi 7,43m, o raio de pesquisa adotado a partir de cada ponto foi 10m. Para interpolação para a grade de 5m x 5m, adotou-se a função Kernel “Quártica (biponderada)” com base no atributo de área construída.

Figura 6.81 - Mapa de densidade construída. A densidade considera a área construída na ponderação do estimador Kernel

[40] Relembrando, o índice “Z” é um fator do desvio-padrão e quanto mais afastado de zero (positivo ou negativo) maior a dispersão ou agrupamento dos pontos, pois valor próximo de zero indica a distribuição normal hipotética, ou seja, não há dispersão ou agrupamento aparente.



Foram detectadas 500 edificações na área do aglomerado (= 77.788,45 m^2 = 0,077788 km^2), resultando em uma ocupação do solo de 6.440 edif/km^2.

O censo 2010 contabilizou 1.655 domicílios na área do aglomerado, resultando pela mesma lógica em uma “densidade domiciliar” de 21.275,7 dom/km^2.

O mapa da densidade representa uma ocupação não homogênea. Neste mapa a verticalização somada à concentração contribuem para uma análise mais precisa da densidade se comparado com a representação bidimensional da ocupação do solo.

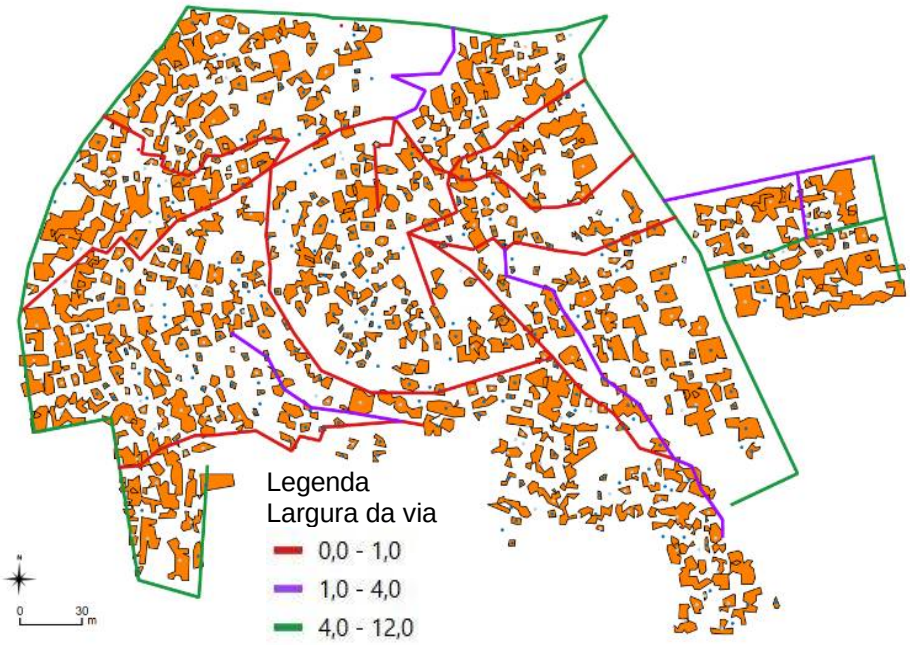
A área construída foi calculada para cada polígono delineado, pela multiplicação de sua área pelo número de pavimentos inferido, resultando 51.747,5m^2.

No cálculo do Coeficiente de Aproveitamento (CA) foi utilizada a área construída considerada mais precisa, ou seja, 51.747,5m^2 dividida pela área do aglomerado de 77.788,45 m^2, resultando em um CA = 0,665.

6.4.5. Circulação e acesso

As vias de acesso foram desenhadas manualmente (figura 6.82) com base nas ortofotos e imagens Google.

Figura 6.82 - Vias de acesso, polígonos e centroides de edificação



Com base no traçado realizado, foi realizada uma simulação estatística dos atributos, para orientar o uso das métricas. Esses resultados são apresentados na tabela 6.7 a seguir. Foram adotados o comprimento de cada eixo viário e o atributo “largura”.

Tabela 6.7 - Estatística dos atributos de vias de acesso

(∑ compr / área do aglomerado = capilaridade) 2938,58 / 77.788,45 = 0,038 m/m^2

∑ compr. (m)	larg media (m)	larg moda (m)	dp larg (m)	N	capilaridade (m/m^2)
2938,58	2,80	1,0	3,33	23	0,038

Para considerar a regularidade da largura das vias, o desvio padrão da média é um parâmetro adequado como métrica dessa característica.

6.5. Resultados: São Paulo - SP

Dois fatores merecem destaque para análise dos resultados de São Paulo: a densidade de pontos no levantamento foi em média 10 ppm^2 e foi realizada a etapa de segmentação dos pontos classificados como edificação.

As seis áreas estão localizadas em três diferentes regiões da cidade. GUA e PIO são típicas favelas da zona norte da cidade, com relevo acentuado. LUA na zona sul, tem a particularidade do campo de futebol, que é uma área “preservada” ao longo dos anos embora a verticalização venha aumentando. As outras três áreas são adjacentes e representam três tipo-morfologias diferentes, evidenciando a heterogeneidade em uma mesma região (zona sul). MOR é um típico loteamento irregular de vulnerabilidade social baixa, com vias pavimentadas, quadras bem delimitadas e lotes demarcados. OLA é uma área com parte aglomerada, e parte urbanizada. CAN é uma favela de alto índice de vulnerabilidade social e alto risco de escorregamento. Na figura 6.83 são apresentados exemplos da tipo-morfologia das seis áreas

Figura 6.83 - Tipo-morfologia nas seis áreas

MOR, OLA e CAN

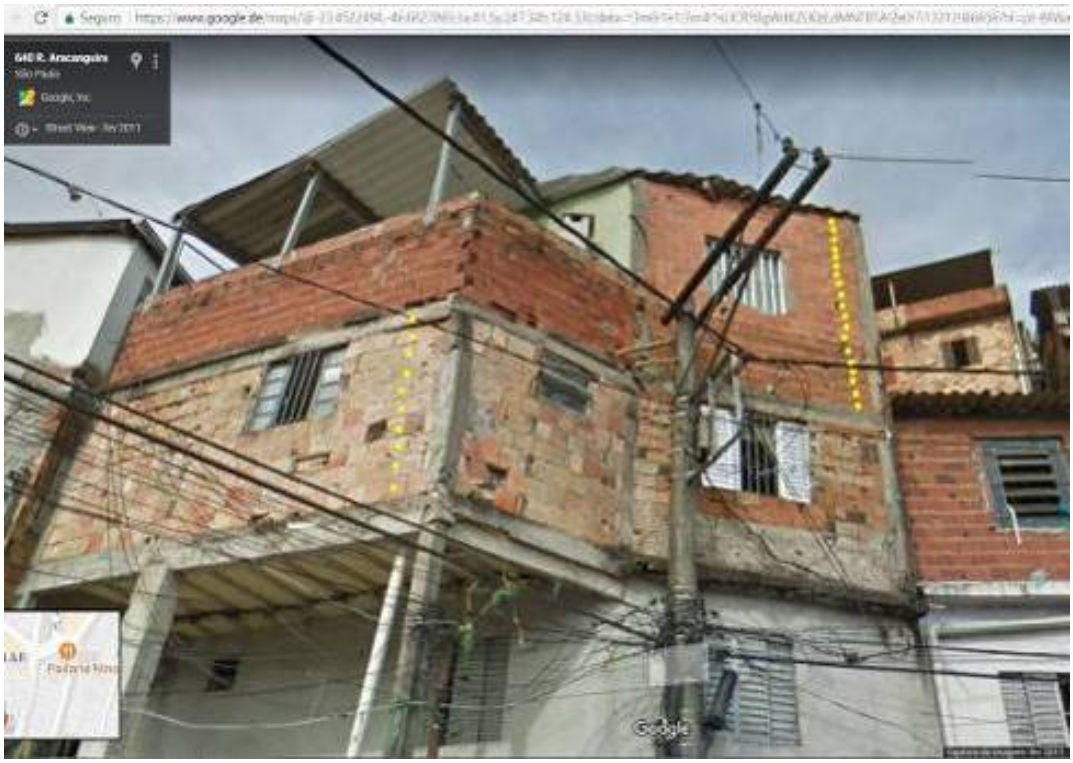
CAN

OLA

MOR

GUA

PIO

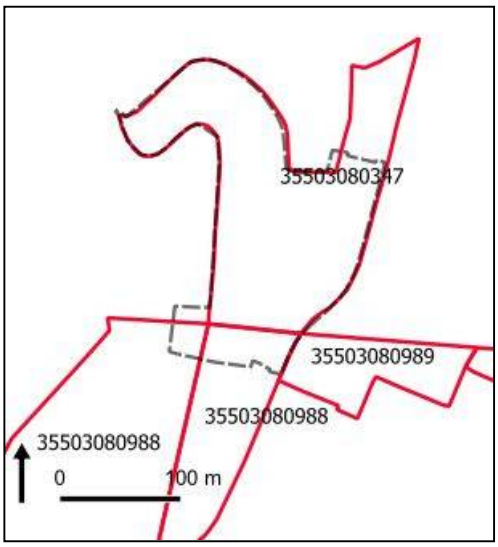


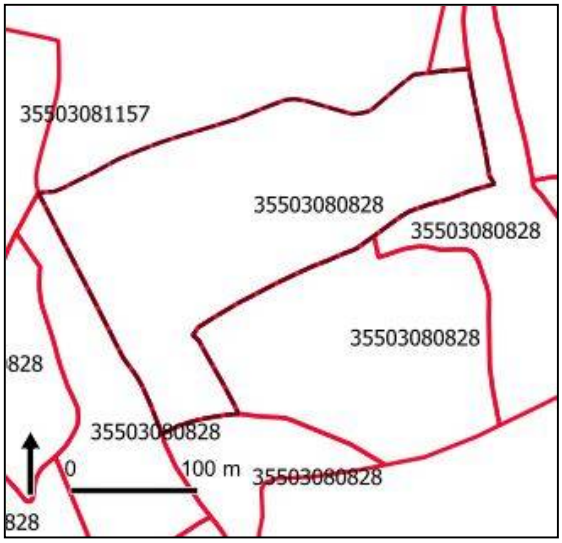
LUA

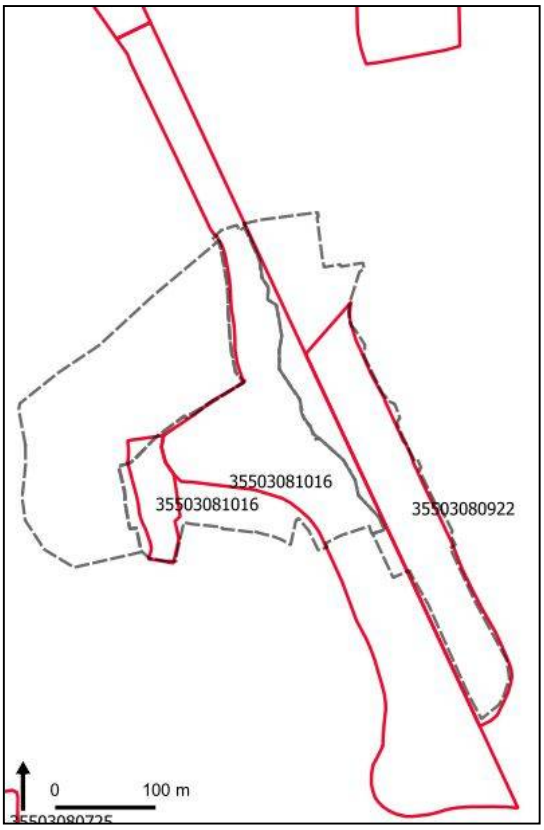
Fonte: Google 3D e Street View

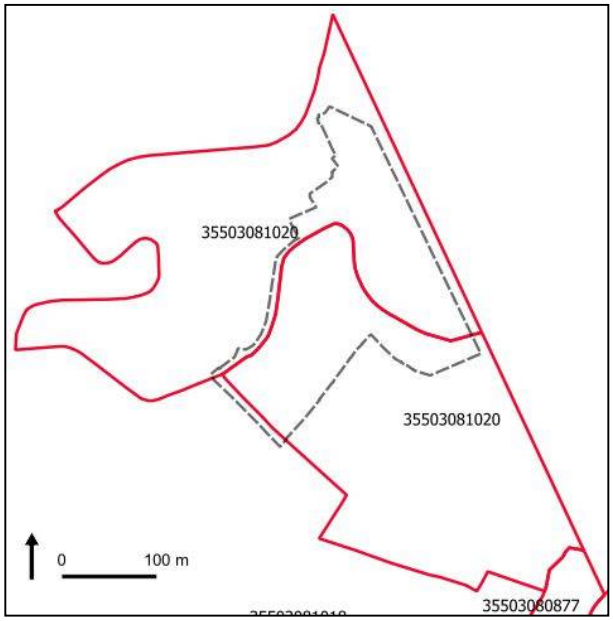
Os limites dos setores não coincidem com os limites de favelas, nem tampouco de LEPACs (figura 6.84). Na medida do possível a sobreposição foi observada priorizando a LEPAC para viabilizar o controle de qualidade.

Figura 6.84 - Setores censitários e LEPACs das seis áreas de São Paulo









Setor censitário LEPAC

6.5.1. Classificação

Os principais parâmetros adotados foram:

- Filtragem Solo/Não solo

    - Passo (*step*) = 5 m;

    - Relevo (*steep-hills*) = moderado;

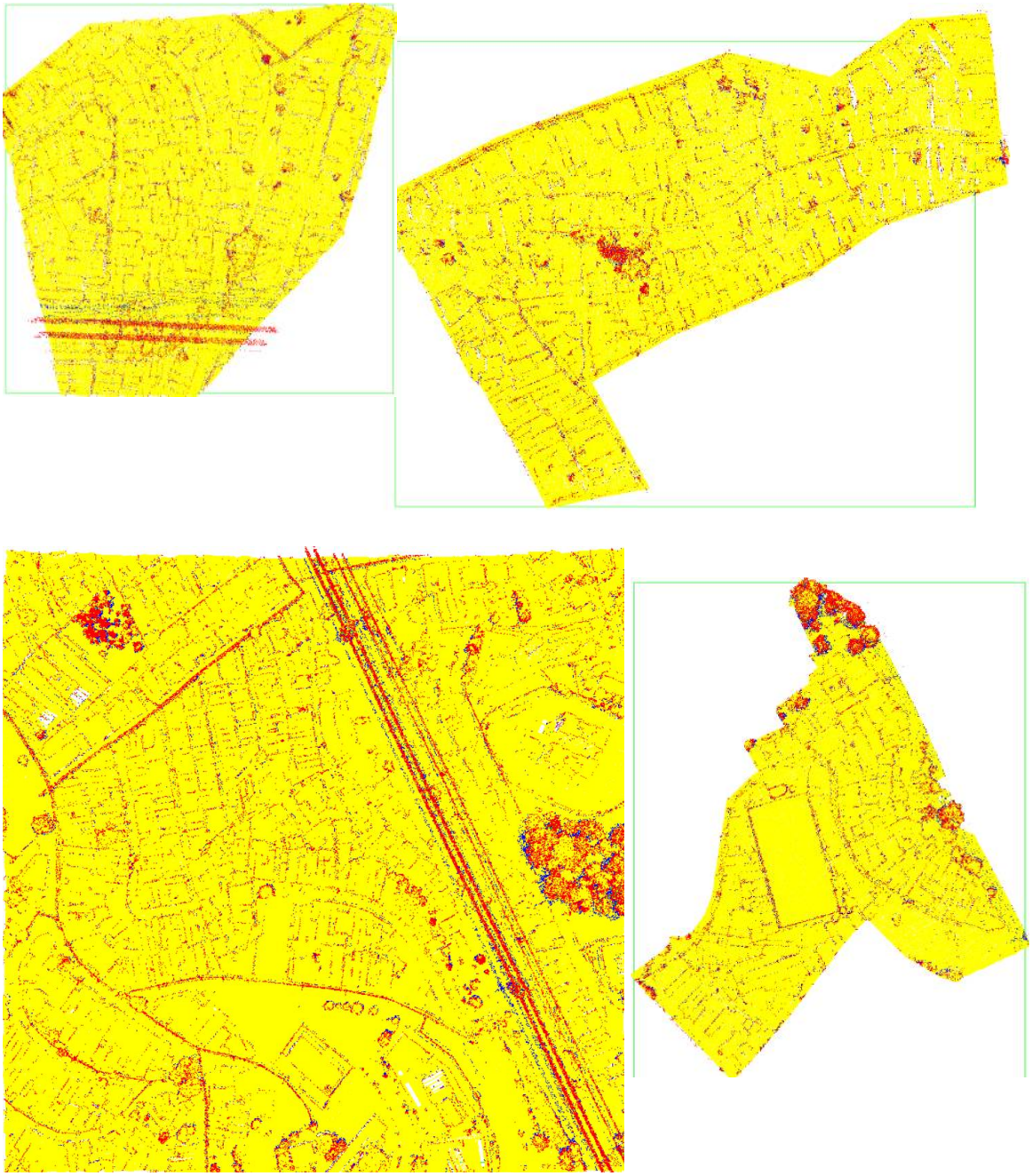
    - Pico (*spike*) = 0,5 m

- Poligonação (*boundary*)

    - Concavidade = 1,0 m;

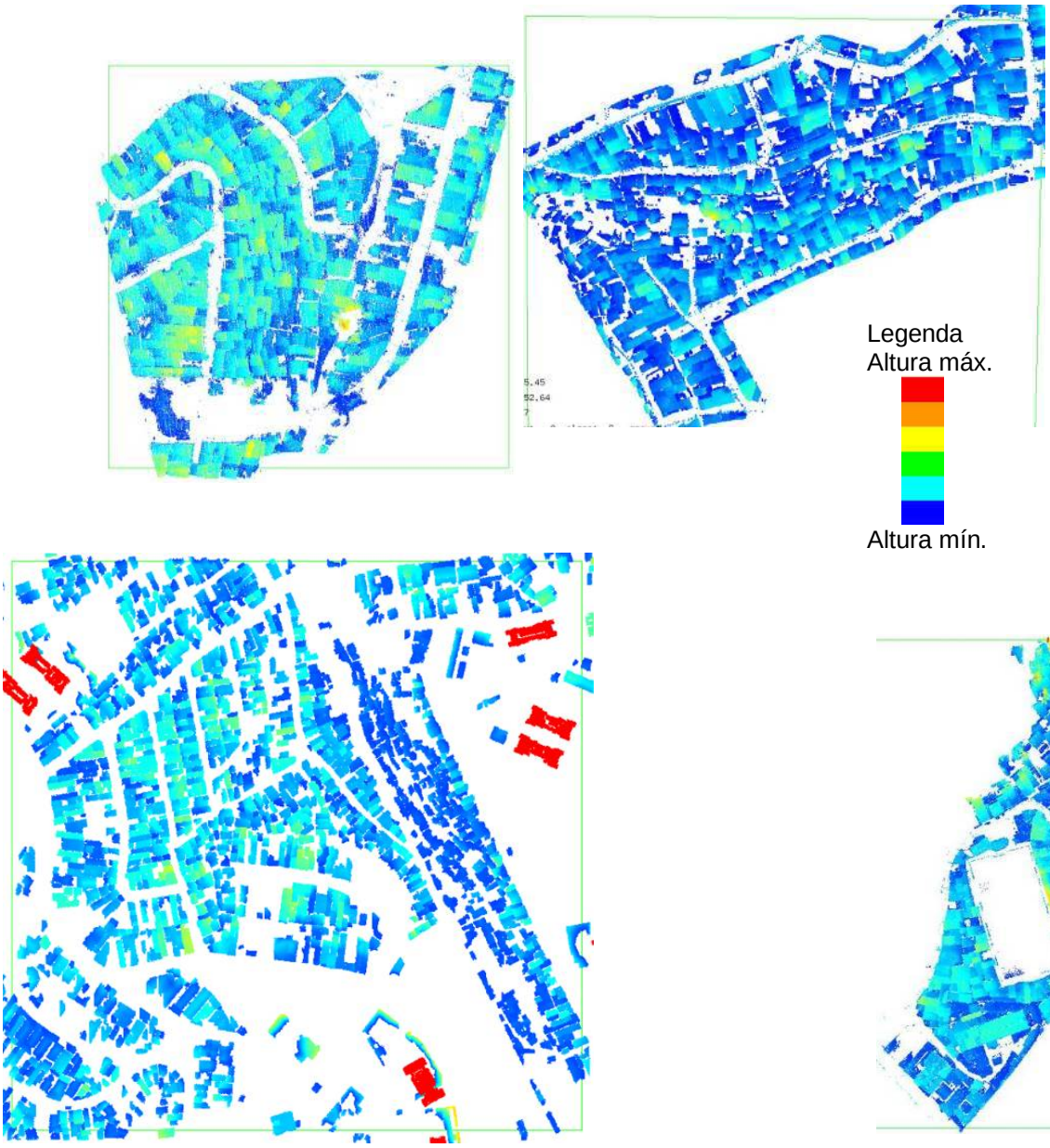
A visualização pelo número de retornos é apresentada na figura 6.85, com evidente predominância de amarelo (único retorno) e vermelho (múltiplos).

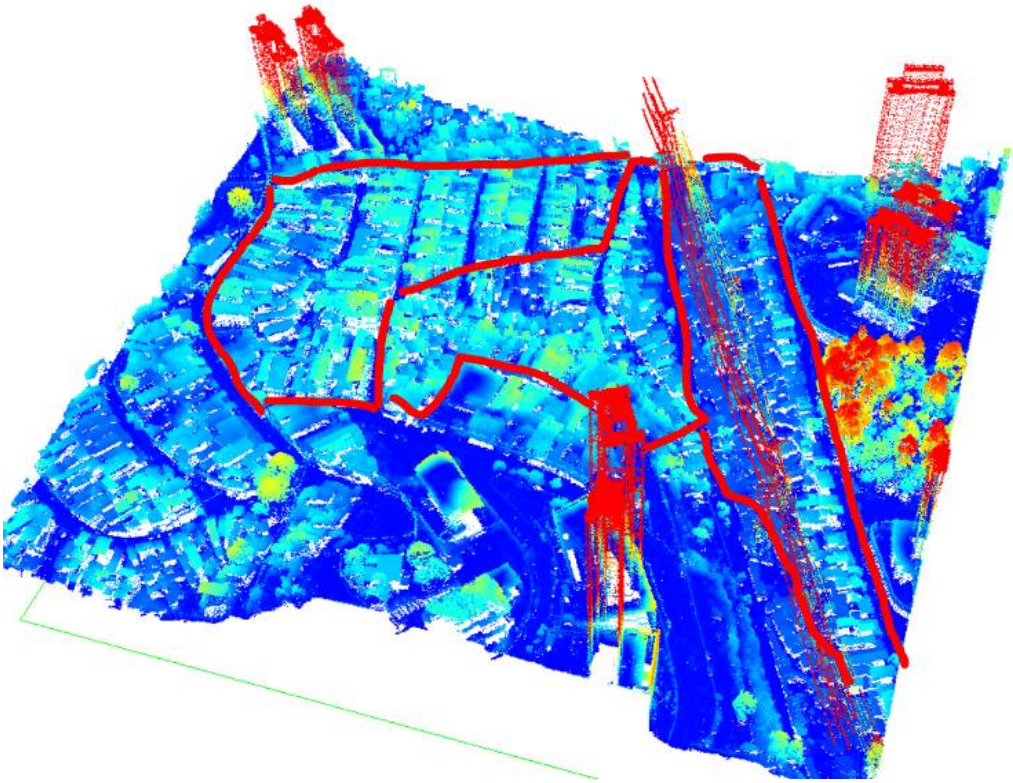
Figura 6.85 - Imagem colorida pelo número de retornos:
amarelo = único; azul (3º), verde (2º) e vermelho (1º) = múltiplos.



O Modelo Digital da Superfície Normalizado (MDSn) é apresentado na figura 6.86.

Figura 6.86 - Modelo Digital da Superfície Normalizado - MDSn. Mapa hipsométrico das alturas em relação ao solo, inclusive com as áreas MOR, OLA e CAN em perspectiva



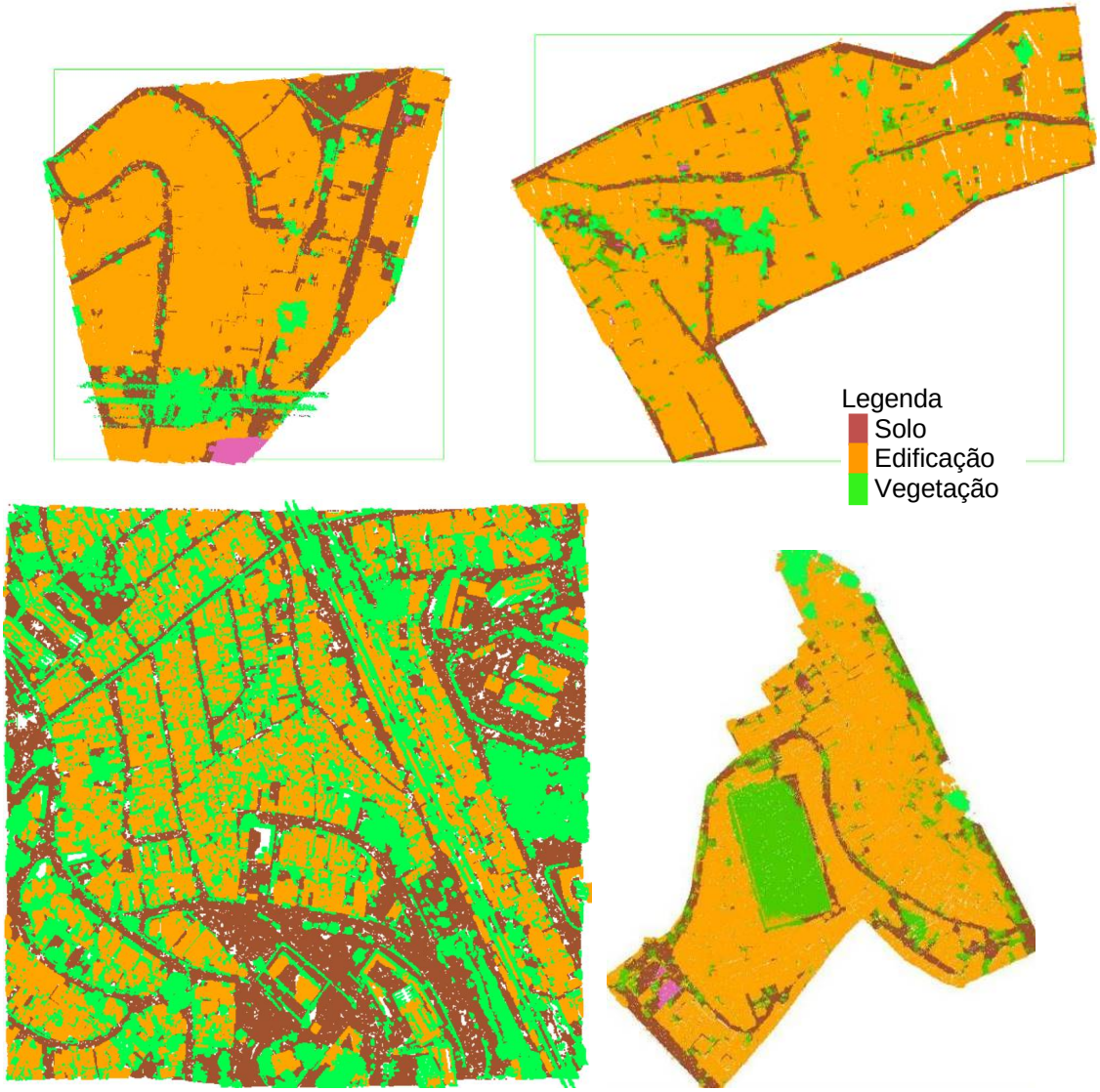


A seguir foi realizada a classificação dos pontos, separando edificação, vegetação e solo, e registrando o atributo “classe” conforme o padrão ASPRS. O resultado é apresentado na figura 6.87.

Os principais parâmetros adotados nesta etapa foram:

- Altura mínima de objetos (*ground-offset*) = 1,5 m
- Desvio do plano (*planar*) = 0,2 m
- Rugosidade (*rougness*) = 0,4 m
- Área de pesquisa (*search-step-area*) = 5 m

Figura 6.87- - Resultado da classificação



6.5.2. Segmentação das edificações

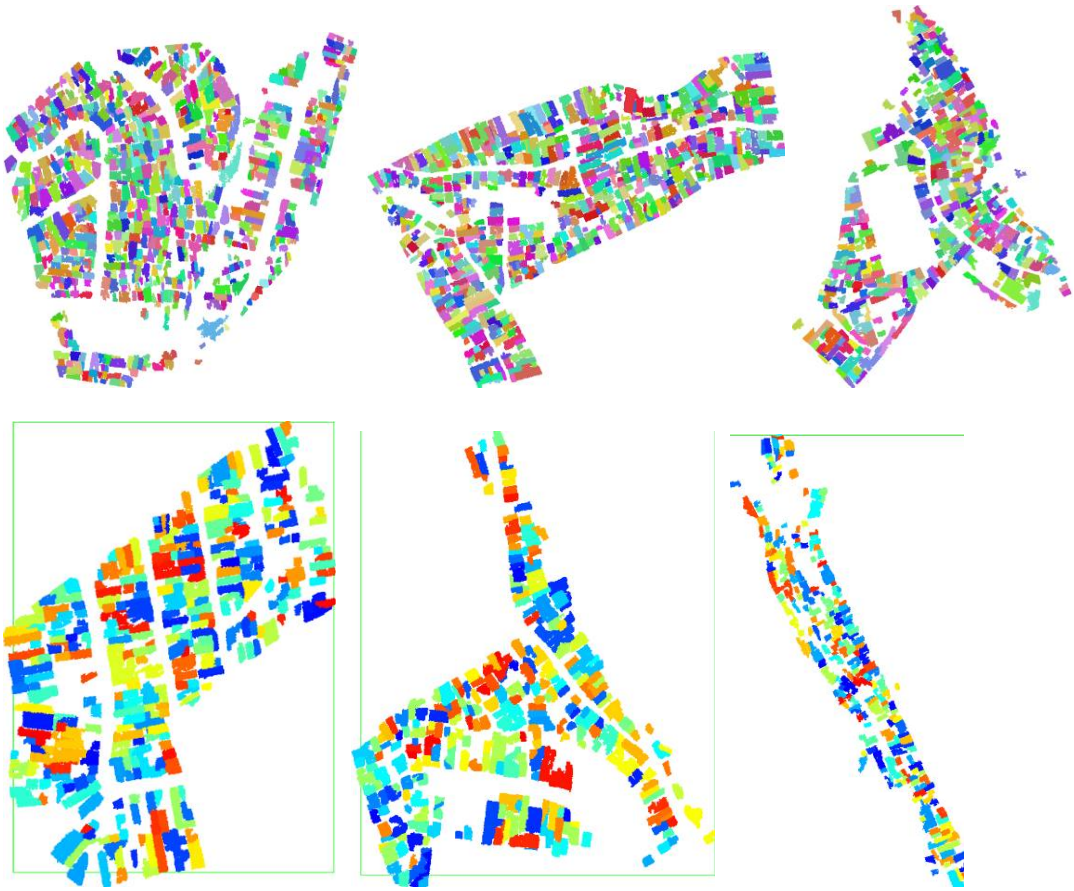
Inicialmente foi realizada uma análise exploratória para determinação dos parâmetros de segmentação, de tal forma que houvesse um conjunto de valores consensuais que atendesse às seis áreas. Esses valores são apresentados na Tabela 6.8.

Tabela 6.8 - Parâmetros para segmentação

Parâmetro	Valor
Distância horizontal máxima dos vizinhos (m)	0,8
Ângulo máximo entre o vetor normal do ponto candidato e o plano de crescimento (graus)	45
Distância vertical máxima entre o ponto candidato e o plano de crescimento (m)	0,4
Tamanho mínimo do segmento (número de pontos)	200

Foram utilizadas fotos aéreas para verificação visual dos resultados da segmentação. As cores são aleatórias, apenas para diferenciar os pontos que pertencem a um mesmo segmento, uma vez que foi atribuído um número sequencial para cada um deles. O resultado do processamento é apresentado na Figura 6.88.

Figura 6.88 - Segmentos obtidos nas seis áreas de estudo de São Paulo.



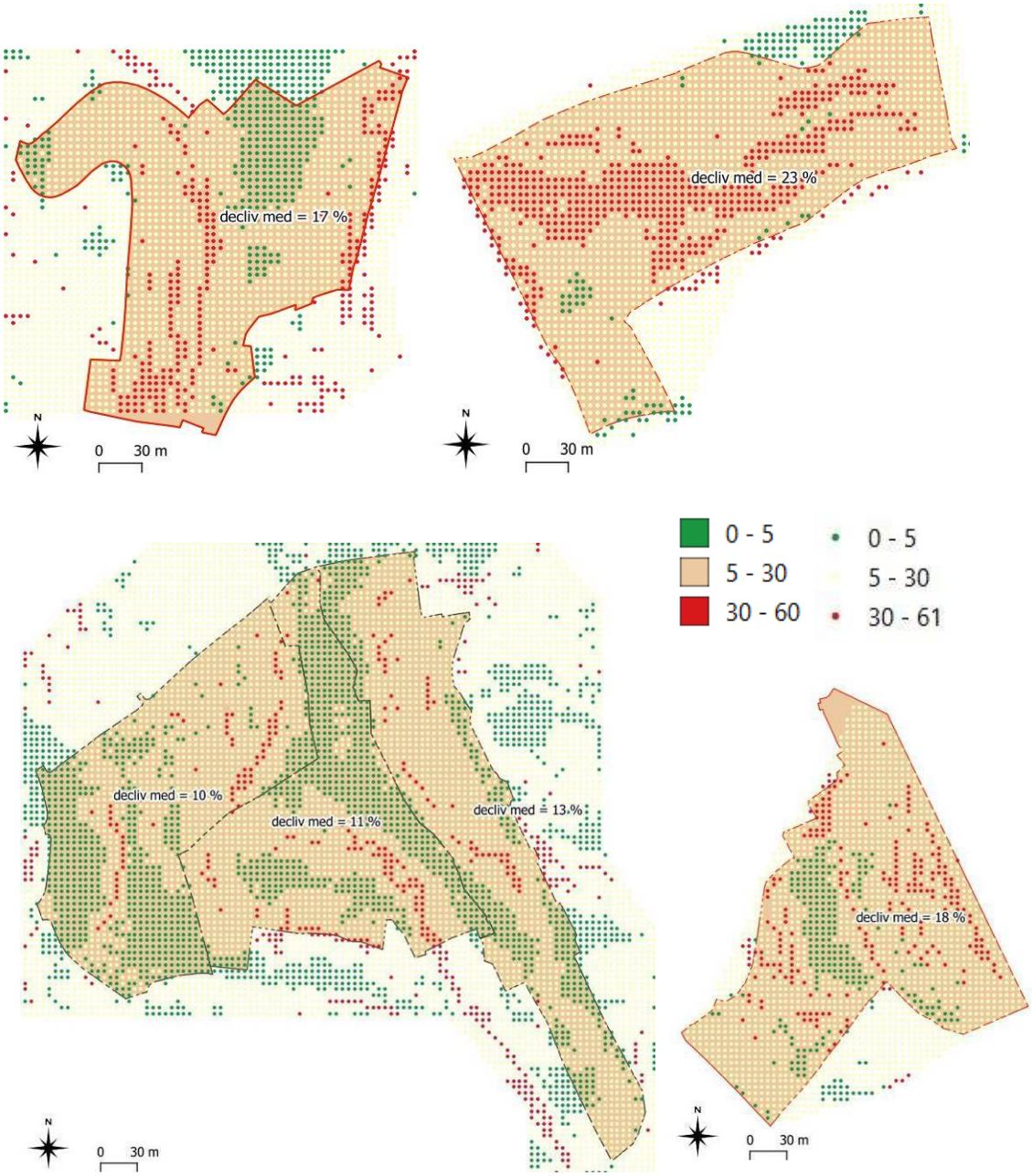
6.5.3. Topografia - Declividade do terreno

O principal parâmetro adotado na geração da grade foi:

- Espaçamento da grade (*step*) = 5 m

A representação por pontos categorizados segundo as três classes adotadas pelo IBGE no LIT: 0 a 5 % (relevo plano), 5 a 30% (relevo moderado) e acima de 30% (relevo acentuado), é apresentada na figura 6.89 a seguir.

Figura 6.89- - Declividade do terreno em pontos da grade (5 x 5 m) e na média por setor.



A sobreposição da grade aos polígonos delineados como edificações, efetivamente produziu o mapa de atenção para risco de deslizamento ou restrições mais severas. O resultado da sobreposição é apresentado na Figura 6.90 a seguir.

Figura 6.90- - Sobreposição das edificações ao mapa de declividade. Conjuntos de mais de quatro pontos da grade de valor maior que 30% contidos em edificações são considerados como de “risco”

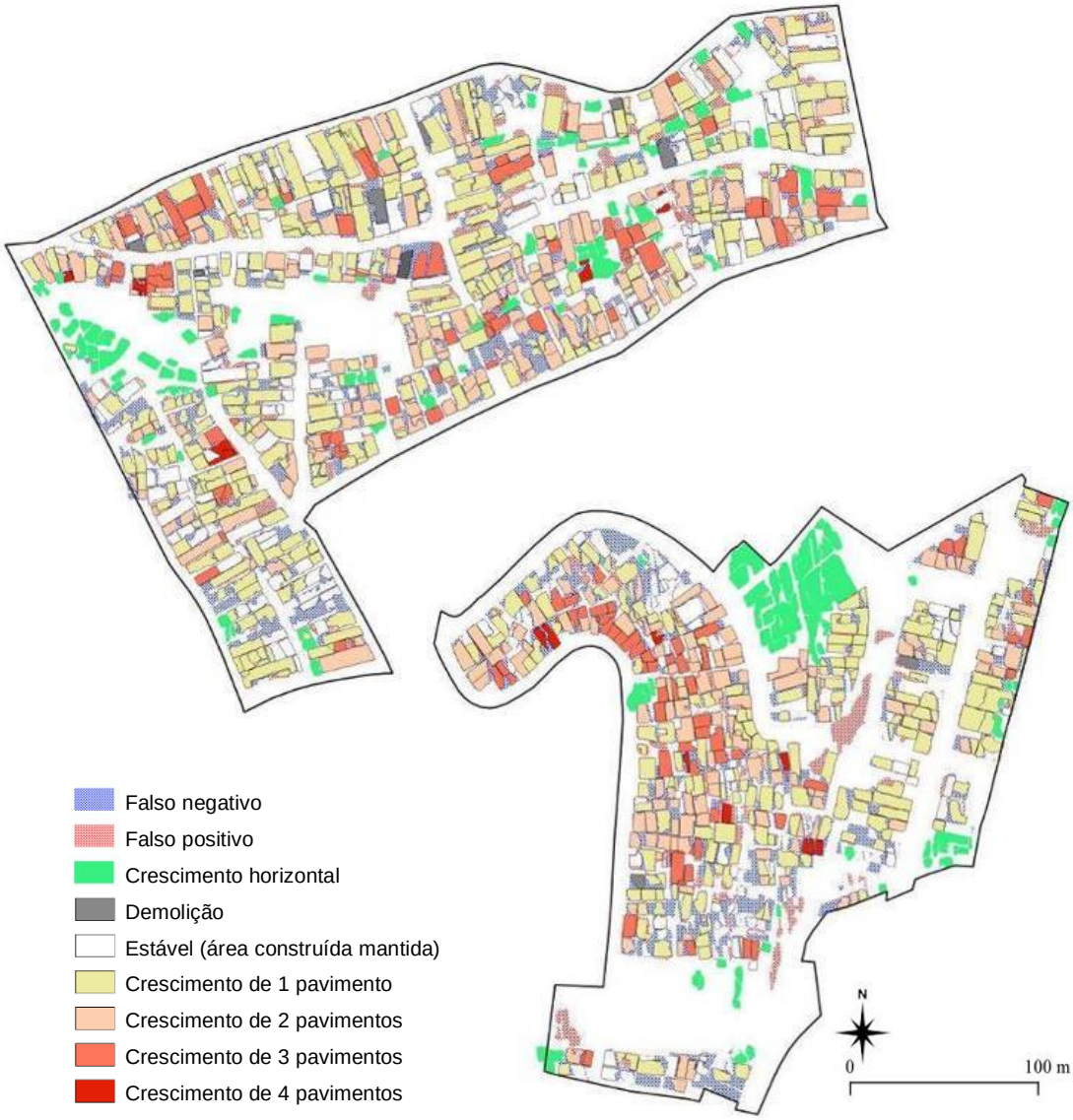
6.5.4. Verticalização - Altura das edificações e crescimento da área construída

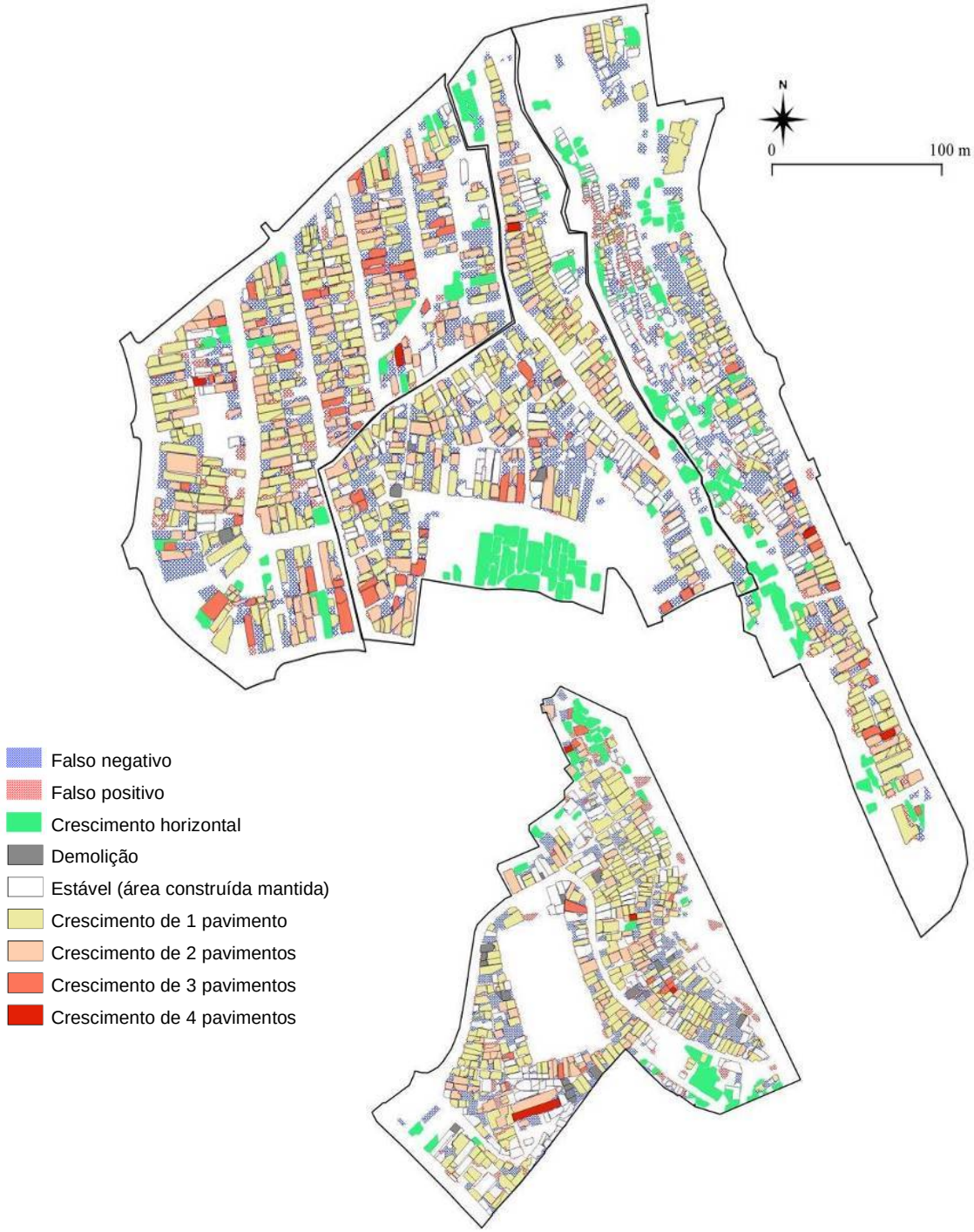
Devido ao uso de levantamentos de referência específicos de edificações subnormais (LEPACs) de datas anteriores ao aerolevantamento, foi

possível adicionalmente, estimar o crescimento da área construída em metros quadrados e consequentemente em número de pavimentos.

Na figura 6.91, os resultados da diferença entre número de pavimentos, da data do LEPAC até o levantamento Lidar, são apresentados em escala de cores. O caso da diferença negativa, foi interpretado como demolição (em cinza) e diferença nula como manutenção da área construída (em branco). Além das edificações delineadas também são apresentados os erros de omissão (falso negativo) e comissão (falso positivo) segundo o critério de sobreposição de áreas. Edificações que surgiram após o LEPAC e foram detectadas no levantamento Lidar, foram interpretadas como crescimento horizontal (em verde).

Figura 6.91 - Comparação dos resultados com LEPACs





A análise numérica da área construída está resumida na Tabela 6.9 com a contagem de polígonos separadamente de acordo com os tamanhos abaixo e acima de 20 m^2; no entanto, foram detectados pequenos edifícios com menos de 200 pontos (coluna “Área mínima”) devido à distribuição heterogênea na nuvem de pontos. A área plana coberta por polígonos de edificação foi computada na 6ª coluna. Os números mínimo e máximo de pavimentos foram apresentados para medir a verticalização das áreas, sendo o valor 0 (zero) definido para aquelas edificações em construção que ainda não atingiram

altura de um pé direito. Finalmente, a última coluna apresenta a contagem de polígonos detectados como novas edificações (crescimento horizontal).

Tabela 6.9 - Resultado da área construída em 2017

Sigla	N. poligs área ≥ 20m^2	N. poligs área < 20m^2	Área Min (m^2)	Área Max (m^2)	Área edif. proj. (m^2)	N. min. pav.	N. max. pav.	N. edif. novas
GUA	440	197 (31%)	2,64	199,26	25222,22	1	7	87
PIO	347	220 (39%)	1,97	220,92	19269,05	1	7	70
MOR	277	14 (5%)	11,39	321,07	17983,47	0	6	20
CAN	201	8 (4%)	16,1	275,20	11893,68	1	5	56
OLA	249	12 (5%)	12,96	358,57	15602,54	1	5	11
LUA	363	20 (5%)	4,73	467,31	20586,41	1	6	33

A Tabela 6.10 apresenta os CAs do levantamento de referência - LEPAC (4ª coluna) e do resultado do levantamento Lidar (6ª coluna) com base nos valores da área construída. A última coluna apresenta o crescimento do CA como variação da densidade construída.

Tabela 6.10 - CA e crescimento da área construída

Sigla	Área (m^2)	Área construída de referência (m^2)	CA na data do LEPAC (referência)	Área construída Lidar (m^2)	CA Lidar	Crescimento do CA
GUA	44915,28	43785,61	0,97	74509,46	1,65	68%
PIO	41184,06	32962,86	0,80	63259,45	1,53	74%
MOR	38611,39	37953,27	0,98	59315,48	1,53	55%
CAN	34187,88	12872,67	0,37	22943,92	0,67	29%
OLA	33471,34	29962,93	0,89	46760,18	1,39	50%
LUA	42507,56	36671,74	0,86	53152,2	1,25	39%

6.5.5. Espaçamento - Área construída

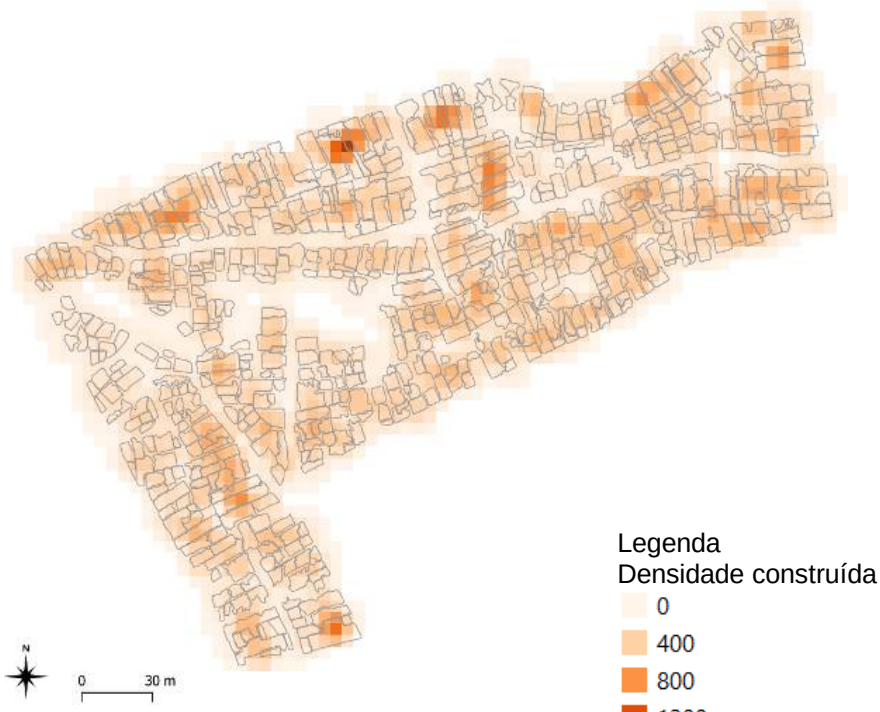
Com base nas edificações hipotéticas obtidas no passo anterior procedeu-se à estatística de vizinho mais próximo e geração dos mapas de densidade. A tabela 6.11 a seguir apresenta os resultados para cada área e especificamente para o conjunto MOR, CAN e OLA por serem adjacentes.

Tabela 6.11 - Estatísticas de Vizinhança (Vizinho Mais Próximo) dos centroides de edificações por área de estudo.

Sigla	Distância média observada (m)	Distância média esperada (m)	Índice do vizinho mais próximo:	Número de pontos:	Z-Score:
GUA	5,19	5,92	0,88	637	-5,96
PIO	4,90	5,95	0,82	451	-7,20
MOR	6,49	6,95	0,93	291	-2,19
CAN	6,70	10,65	0,63	207	-10,22
OLA	6,64	8,34	0,80	261	-6,28
LUA	6,10	7,16	0,85	383	-5,54
MOR+OLA+CAN	6,57	7,96	0,83	759	-9,22

O mapa da figura 6.92 representa a densidade construída composta pela área construída e seu espaçamento, uma vez que os pixels (5 m) representam o valor resultante da quantidade de pontos em sua área de influência (kernel) ponderado pelo atributo “altura”.

Figura 6.92 - Mapas de densidade construída


Legenda
Densidade construída
0
400
800
1200
1600
N
0
30 m

N
0
30 m

6.5.6. Circulação e acesso

As vias de acesso foram desenhadas manualmente (figura 6.93) com base nos pontos classe “solo”, ortofotos e imagens Google.

Figura 6.93 - Vias de acesso e edificações

Com base no traçado manual, os atributos foram sumarizados como índices e métricas da circulação em cada área. Os resultados de comprimento, largura e capilaridade são apresentados na tabela 6.12 a seguir.

Tabela 6.12 - Estatística dos atributos de vias de acesso
(compr.=comprimento; larg.=largura; dp=desvio padrão)

sigla	∑ compr.	larg. média	larg. moda	dp. larg.	N	capilaridade
GUA	1402,5	4,4	1,0	3,5	13	0,0312
PIO	814,6	5,0	0,5	4,2	5	0,0198
MOR	817,5	9,1	10,0	2,7	9	0,0212
CAN	1225,6	5,3	6,0	4,0	13	0,0358
OLA	854,4	5,9	2,0	4,2	15	0,0255
LUA	1885,9	5,1	0,5	5,0	50	0,0444

sigla	área	soma compr. via	capilaridade
GUA	44.915	1402,5	0,0312
PIO	41.184	814,6	0,0198
MOR	38.611	817,5	0,0212
CAN	34.187	1225,6	0,0358
OLA	33.471	854,4	0,0255
LUA	42.507	1885,9	0,0444

6.6. Comparação das áreas amostrais

Para uma comparação entre assentamentos foi admitido um nível de generalização nos índices compatível com a LIT IBGE, de tal forma que nuances e valores extremos, que foram obtidos, fiquem reservados para a análise local.

Uma síntese dos valores obtidos para as áreas amostrais, é apresentada no quadro 6.7 a seguir.

Quadro 6.7 - Comparação de índices/métricas entre os assentamentos

sigla	topografia	verticalização	densidade	circulação
CAM	**moderada** (10%)	Minh = 1,95; Maxh = 9,62 Mediana = 3,0; Média = 3,3; Moda = 3,0; **1 pavimento** (moda)	(Z = -108,7; Viz = 0,71; DistM = 1) Ac =52.424,0; **CA = 0,38**	∑comp =3547,4 Capil =0,026 **modaLarg = 9,0**
RIO	**acentuada** (30%)	Minh = 2,1; Maxh = 12,9 Mediana = 5,4; Média = 5,4; Moda = 3,0; **2 pavimentos** (moda)	Z = -0,52; Viz = 0,99 DistM = 7,43 Ac =51.747,5; **CA = 0,66**	∑comp =2938,6 Capil =0,038 **modaLarg = 1,0**
GUA	**moderada** (23%)	Minh = 1,8; Maxh = 15,8 Mediana = 6,2; Média = 6,4; Moda = 6,0; **2 pavimentos** (moda)	Z = -5,96; Viz = 0,88; DistM = 5,19 Ac = 74.509,5; **CA =1,65**	∑comp =1402,5 Capil =0,031 **modaLarg = 1,0**
PIO	**moderada** (17%)	Minh = 1,6; Maxh = 16,2 Mediana = 7,1; Média = 7,2; Moda = 9,9; **3 pavimentos** (moda)	Z = -7,20; Viz = 0,82 DistM = 4,90 Ac = 63.259,5; **CA =1,53**	∑comp =814,6 Capil =0,019 **modaLarg = 0,5 e 10,0**
MOR	**moderada** (10%)	Minh = 1,0; Maxh = 14,4 Mediana = 7,0; Média = 7,3; Moda = 5,8; **2 pavimentos** (moda)	Z = -2,19; Viz = 0,93 DistM = 6,49 Ac = 59.315,5; **CA =1,53**	∑comp =817,5 Capil =0,021 **modaLarg = 10,0**
CAN	**moderada** (13%)	Minh = 1,5; Maxh = 12,0 Mediana = 3,6; Média = 4,4; Moda = 2,4; **1 pavimento** (moda)	Z = -10,22; Viz = 0,63 DistM = 6,70 Ac = 22.943,9; **CA =0,67**	∑comp =1225,6 Capil =0,036 **modaLarg = 12,0**
OLA	**moderada** (11%)	Minh = 2,2; Maxh = 12,4 Mediana = 6,5; Média = 6,7; Moda = 3,0; **1 pavimento** (moda)	Z = -6,28; Viz = 0,80 DistM = 6,64 Ac = 46.760,2; **CA =1,39**	∑comp =854,4 Capil =0,025 **modaLarg = 2,0**
LUA	**moderada** (18%)	Minh = 1,8; Maxh = 14,1 Mediana = 5,8; Média = 5,8; Moda = 2,8; **1 pavimento** (moda)	Z = -5,54; Viz = 0,85 DistM = 6,10 Ac = 53.152,2; **CA =1,25**	∑comp =1885,9 Capil =0,044 **modaLarg = 0,5**

Topografia

Enquanto em Campinas o aglomerado possui relevo moderado, no Rio de Janeiro ocorre o oposto, relevo acentuado, característica corroborada pela métrica da declividade média, 10% e 30% respectivamente. São Paulo tem as seis áreas com declividade moderada, entre 10% a 23%.

A análise da topografia natural da área como um todo, segundo a lógica do LIT IBGE, tem a função de destacar aquelas áreas que contenham restrições à ocupação, no entanto, a sobreposição da ocupação existente indica a necessidade de intervenção imediata por se tratarem de áreas de risco a deslizamento. Por essa ótica, todas as áreas possuem edificações em terreno de declividade maior que 30%. GUA em São Paulo é a mais crítica, e CAM em Campinas é a que tem menos ocorrência de edificações em situação de risco.

Verticalização

A síntese da verticalização foi obtida pelo número predominante de pavimentos, ou seja, a moda do valor inferido pela moda das alturas. PIO é a área mais verticalizada com três pavimentos e a única das oito considerada acentuada pela LIT.

Densidade

Os coeficientes de aproveitamento (CAs) de São Paulo são maiores, exceto na área CAN. A comparação resultou de acordo com a realidade observada nas áreas: CAM de fato tem menor CA e GUA o maior. Rio provavelmente não foi alto devido aos trechos de alta declividade e vegetação não ocupados dentro dos limites do assentamento.

A distância média observada (DistM), em torno de 6m para todas as áreas representa indiretamente a dimensão de cada edificação além de seu espaçamento bastante semelhante, com exceção de CAM pois nela a análise foi apenas simbólica (distância de 1m na grade). A análise da média do vizinho mais próximo (Viz) e do índice Z indicou o evidente agrupamento das edificações, uma vez que todos Viz foram menores que UM e todos os Z foram negativos. A área CAN foi a mais agrupada por conta de seu valor Viz de 0,63 (o menor dos oito) e também por Z de -10,22 (o mais negativo) indicando homogeneidade desse agrupamento. No outro extremo está o RIO, ainda que seus valores indicam o agrupamento (Viz de 0,99 e Z de -0,52) em comparação com as outras áreas é o menos agrupado e mais heterogêneo.

Circulação

Segundo o LIT IBGE a largura predominante é o índice adotado para comparar os assentamentos. Sendo CAN um assentamento disposto ao longo da margem de um córrego e limitado por uma via pavimentada do lado oposto de largura 12,0m, o acesso é evidentemente maior; no outro extremo a área PIO possui predomínio de vielas de 0,5m de largura, possibilitando acesso exclusivamente a pé.

A métrica de capilaridade foi introduzida para comparação da circulação interna do assentamento independentemente do modo (veículo ou

pedestre). LUA resultou no maior valor, igual a 0,044 m/m^2 e o PIO o menor, igual a 0,019 m/m^2.

6.7. Avaliação da qualidade

Foi realizada avaliação da qualidade em relação a detecção das edificações e a precisão altimétrica em cada área de estudo, dependendo da disponibilidade de dados de referência. A detecção do número de pavimentos justifica a ênfase na precisão altimétrica, ainda que os pontos de controle no terreno tenham sido adquiridos com qualidade posicional planimétrica também.

A área de Campinas possui como produto da restituição, a camada de centroides com a respectiva altura além do perímetro das edificações formais, para a mesma data do levantamento Lidar (foi realizado um único voo com os dois sensores a bordo da aeronave). A comparação do delineamento, bem como da altura das edificações produzidas, foi realizada pela sobreposição dessas camadas.

No Rio de Janeiro, apenas ortofotos estavam disponíveis e não há restituição das edificações. A partir dessas ortofotos, bem como das imagens intensidade, os centroides dos aglomerados produzidos foram comparados visualmente por sobreposição.

Nas seis áreas de São Paulo a verificação foi realizada quanto à precisão posicional (Padrão de Exatidão Cartográfica classe A - PEC A), integridade, acurácia e qualidade do delineamento. A verificação da precisão posicional dos produtos do aerolevantamento foi um dos objetos de contratação para todo o município, do qual são apresentados os resultados naqueles pontos próximos às áreas de estudo. A qualidade do delineamento foi verificada pela sobreposição do mesmo com a camada de edificações e suas alturas dos LEPACs, objeto de contratação da Prefeitura em épocas anteriores.

O nível de qualidade dos resultados foi calculado conforme as métricas de “integridade” e “acurácia”, segundo Rutzinger et al. (2009).

6.7.1. Precisão posicional

São Paulo

A seguir na Tabela 6.13 são apresentados os resultados na avaliação posicional da altimetria para São Paulo (somente pontos próximos às áreas de estudo) e para Campinas (entorno do assentamento).

Tabela 6.13 - Listagem das coordenadas e erros altimétricos nos pontos de controle próximos às áreas de estudo - São Paulo - SP

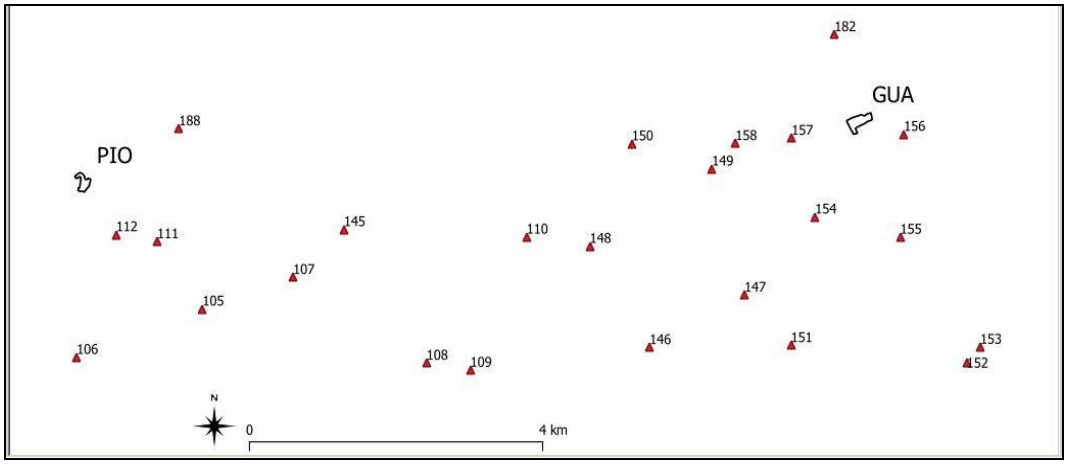
Num	E	N	KnownZ	LaserZ	DifZ	Verificação no bloco
322	323697.119	7385526.844	737.909	738.322	0.413	Average dz +0.270 Minimum dz +0.098 Maximum dz +0.413 Average magnitude 0.270 Root mean square 0.285 Std deviation 0.092
382	323363.123	7384142.283	732.600	732.989	0.389	
310	320664.622	7385241.220	753.436	753.807	0.371	
315	321684.520	7388871.205	733.262	733.593	0.331	
318	322359.287	7387573.635	745.298	745.626	0.328	
320	322670.332	7386445.990	796.723	797.045	0.322	
313	321227.448	7387902.299	735.790	736.109	0.319	
311	320672.939	7386608.029	750.406	750.692	0.286	
407	320294.144	7383573.431	783.219	783.450	0.231	
400	321775.986	7383698.623	747.090	747.313	0.223	
406	318047.841	7384069.368	780.186	780.380	0.194	
316	322709.956	7388875.623	752.561	752.754	0.193	
312	320231.297	7386739.092	741.508	741.694	0.186	
321	322841.379	7385487.936	750.251	750.419	0.168	
367	323295.886	7387022.095	821.557	821.655	0.098	
151	337735.523	7403201.237	769.570	769.825	0.255	Average dz +0.154 Minimum dz +0.052 Maximum dz +0.255 Average magnitude 0.154 Root mean square 0.166 Std deviation 0.067
149	336657.554	7405553.173	787.95	788.200	0.250	
154	338065.039	7404913.686	739.540	739.760	0.220	
155	339225.834	7404644.328	737.760	737.979	0.219	
152	340133.560	7402972.206	729.390	729.585	0.195	
153	340317.268	7403178.951	729.350	729.523	0.173	
158	336978.511	7405891.739	755.510	755.665	0.155	
182	338328.692	7407341.655	757.020	757.153	0.133	
156	339276.367	7406015.100	819.480	819.604	0.124	
147	337100.306	7403871.884	744.150	744.263	0.113	
150	335564.105	7405888.460	787.890	787.998	0.108	
157	337743.948	7405961.965	749.080	749.157	0.077	
146	335806.838	7403174.167	799.560	799.635	0.075	
148	334989.824	7404522.812	757.890	757.942	0.052	
109	333360.603	7402872.742	784.010	784.247	0.237	Average dz +0.156 Minimum dz +0.089 Maximum dz +0.237 Average magnitude 0.156 Root mean square 0.163 Std deviation 0.049
111	329088.232	7404584.298	742.170	742.371	0.201	
108	332762.852	7402966.594	744.520	744.716	0.196	
106	327990.084	7403043.391	744.200	744.395	0.195	
105	329706.696	7403687.753	739.450	739.607	0.157	
110	334128.395	7404645.698	765.040	765.183	0.143	
188	329385.496	7406088.040	784.850	784.977	0.127	
107	330942.614	7404108.188	748.820	748.930	0.110	
145	331635.547	7404745.999	810.800	810.907	0.107	
112	328528.311	7404677.643	746.170	746.259	0.089	

Fonte: Mapeamento Digital do Município de São Paulo, 2017-2019

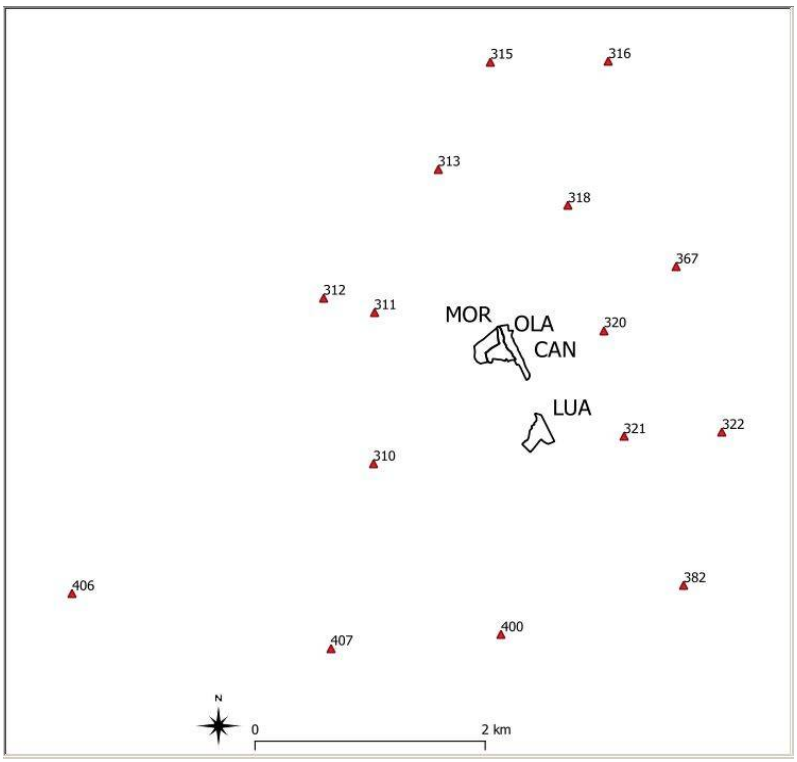
São apresentados na Figura 6.94 a seguir, a localização dos pontos de controle próximos às seis áreas de São Paulo.

Figura 6.94 - Distribuição dos pontos de controle

Norte - 24 pontos próximos a PIO e GUA



Sul - 15 pontos próximos a MOR, OLA, CAN e LUA



Fonte: Mapeamento Digital do Município de São Paulo, 2017-2019

Os valores do erro médio quadrático - EMQ (*root mean square - rms*) nas três regiões das áreas de estudo foram iguais a 0,285m, 0,166m e 0,163m, revelando a boa precisão posicional que cumpriu o especificado no termo de referência técnica daquele levantamento.

Além dos relatórios de erro posicional altimétrico, também foi analisada a densidade de pontos, considerando apenas o primeiro retorno e excetuando os ruídos, de forma a garantir o mínimo especificado de 5 ppm^2 na contratação da Prefeitura de São Paulo. A Tabela 6.14 apresenta as folhas verificadas na região das áreas de estudo.

Tabela 6.14 - Verificação da densidade pontos

(a) Norte - Folhas próximas a PIO e GUA

Block	Points	Area	Density
3214-423.	2 739 079/	317710=	8.62
3214-444.	2 556 357/	317713=	8.05
3214-452.	2 556 428/	317676=	8.05
3216-121.	5 345 421/	317823=	16.82
3216-364.	3 336 738/	317674=	10.50
3216-452.	2 780 584/	317588=	8.76
3232-251.	3 305 714/	317569=	10.41
3232-412.	4 014 437/	317571=	12.64
3232-413.	4 813 591/	317585=	15.16
3232-414.	4 804 339/	317560=	15.13
3232-432.	4 583 265/	317474=	14.44
3232-454.	4 803 434/	317490=	15.13
3241-113.	4 326 670/	317483=	13.63
3243-121.	5 423 272/	317358=	17.09
3243-151.	6 633 721/	317336=	20.90
3434-124.	4 402 090/	318649=	13.81
3434-364.	2 982 229/	318537=	9.36
3434-423.	3 980 529/	318488=	12.50
3434-442.	3 092 661/	318501=	9.71
3434-444.	2 998 465/	318490=	9.41
3434-164.	4 140 290/	318580=	13.00
3434-332.	4 211 799/	318570=	13.22
3434-333.	4 034 825/	318583=	12.66
3434-341.	5 926 160/	318668=	18.60
3434-352.	2 997 262/	318595=	9.41
3436-122.	3 224 142/	318574=	10.12
3436-132.	3 077 718/	318527=	9.66
3436-212.	3 567 619/	318479=	11.20
3436-214.	3 801 828/	318469=	11.94
3436-231.	3 744 411/	318408=	11.76
3436-241.	3 488 732/	318482=	10.95
3436-252.	3 353 096/	318411=	10.53
3436-262.	3 516 044/	318362=	11.04
3443-153.	4 845 918/	318367=	15.22
3443-333.	3 971 949/	318297=	12.48
3443-342.	3 452 684/	318357=	10.85
3443-352.	3 327 223/	318310=	10.45
3443-363.	3 429 876/	318275=	10.78
3443-364.	3 275 725/	318251=	10.29
3443-413.	3 429 023/	318250=	10.77
3443-414.	3 691 146/	318225=	11.60
3443-423.	3 617 127/	318202=	11.37
3445-134.	3 397 088/	318230=	10.67
3445-164.	3 476 753/	318209=	10.93
3445-242.	3 460 687/	318172=	10.88
3445-261.	3 644 302/	318101=	11.46

(b) Sul - Folhas próximas a MOR, OLA, CAN e LUA

Block	Points	Area	Density
2326-252.	3 776 320/	318728=	11.85
2342-162.	3 752 360/	318739=	11.77
2342-212.	2 737 673/	318712=	8.59
2342-233.	3 616 552/	318630=	11.35
2342-264.	3 645 999/	318584=	11.44
3315-313.	4 195 805/	318624=	13.17
3315-331.	3 649 106/	318539=	11.46
3315-353.	3 583 157/	318555=	11.25
3331-111.	2 933 363/	318592=	9.21
3331-121.	3 817 291/	318543=	11.98
3331-131.	3 304 326/	318496=	10.37
3331-141.	3 248 567/	318571=	10.20
3331-322.	3 371 091/	318478=	10.59

Fonte: Mapeamento Digital do Município de São Paulo, 2017-2019

Campinas

A verificação foi realizada em 63 pontos cotados no sistema viário consolidado. Esses pontos foram escolhidos por estarem nitidamente identificáveis no nível do terreno, tanto na restituição quanto na nuvem de pontos Lidar.

A Tabela 6.15 a seguir apresenta as coordenadas medidas na nuvem de pontos de terreno e os respectivos valores provenientes da restituição. A correção da altura geoidal foi realizada com base no modelo disponível (Emplasa S.A. - Empresa Paulista de Planejamento Metropolitano de São Paulo) possibilitando estimar o erro como a diferença entre as altitudes ortométricas.

Tabela 6.15 - Coordenadas, ondulação geoidal e erros altimétricos nos pontos de controle no entorno do assentamento “Buraco do Sapo” - Campinas - SP

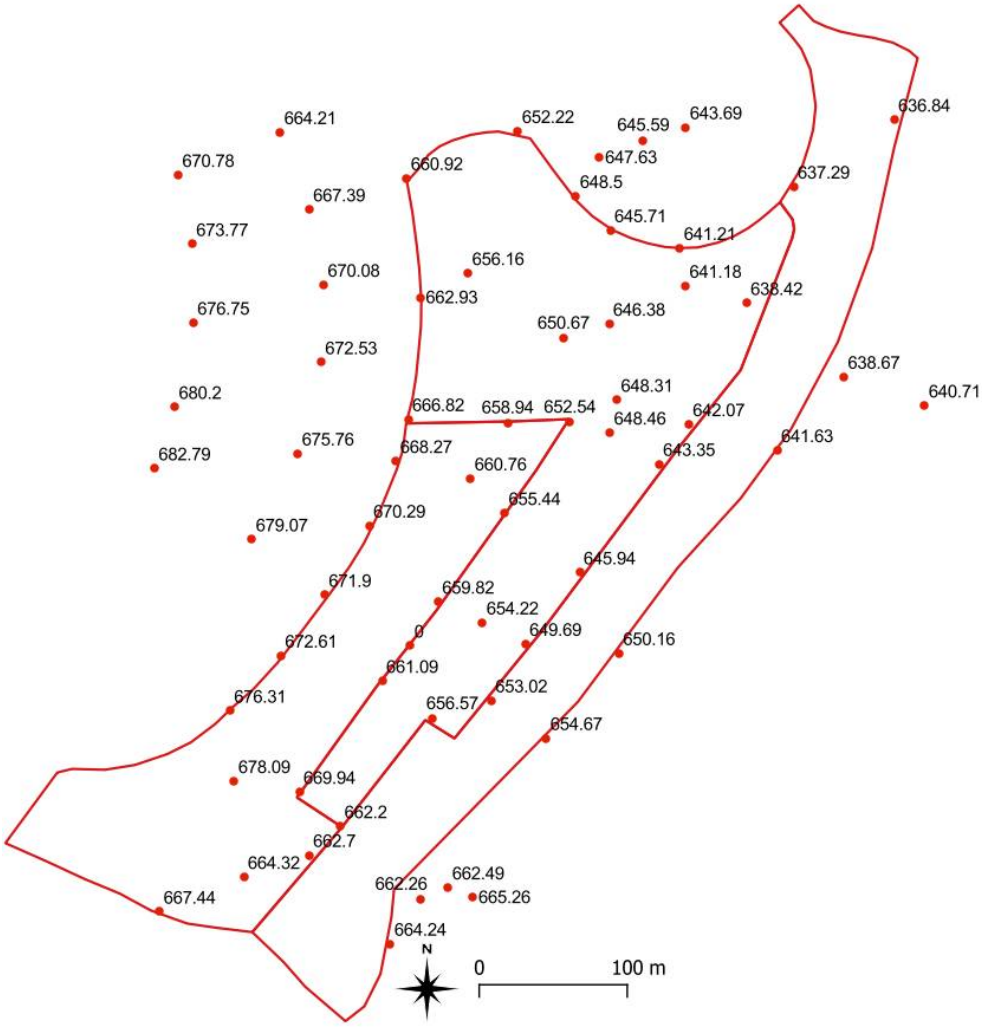
num	E	N	knownZ	lidar_z	diff	geoide	erro altim
1	291637.0	7467195.9	667.443	663.322	-4.121	-4.235	-0.114
2	291693.9	7467219.4	664.322	660.230	-4.092	-4.235	-0.143
3	291738.0	7467234.2	662.698	658.571	-4.127	-4.234	-0.107
4	291845.4	7467627.4	656.163	652.051	-4.112	-4.239	-0.127
5	291909.8	7467583.3	650.672	646.542	-4.130	-4.237	-0.107
6	291992.5	7467726.1	643.687	639.558	-4.129	-4.238	-0.109
7	291934.1	7467705.7	647.628	643.514	-4.114	-4.239	-0.125
8	291649.6	7467693.8	670.776	666.630	-4.146	-4.243	-0.097
9	291659.0	7467647.1	673.765	669.611	-4.154	-4.243	-0.089
10	291659.8	7467593.9	676.746	672.600	-4.146	-4.242	-0.096
11	291647.3	7467537.0	680.197	676.061	-4.136	-4.241	-0.105
12	291633.5	7467495.5	682.787	678.672	-4.115	-4.240	-0.125
13	291687.4	7467284.1	678.087	673.937	-4.150	-4.236	-0.086
14	291731.5	7467276.8	669.942	665.805	-4.137	-4.235	-0.098
15	291759.2	7467253.6	662.199	658.058	-4.141	-4.234	-0.093
16	291821.5	7467326.2	656.574	652.455	-4.119	-4.234	-0.115

17	291787.3	7467351.9	661.085	656.988	-4.097	-4.235	-0.138	
18	291861.0	7467338.7	653.017	648.886	-4.131	-4.234	-0.103	
19	291884.1	7467376.9	649.690	645.584	-4.106	-4.234	-0.128	
20	291855.1	7467391.3	654.219	650.086	-4.133	-4.235	-0.102	
21	291825.1	7467405.4	659.820	655.709	-4.111	-4.236	-0.125	
22	291870.0	7467465.3	655.439	651.289	-4.150	-4.236	-0.086	
23	291920.7	7467425.2	645.942	641.832	-4.110	-4.234	-0.124	
24	291914.1	7467526.6	652.541	648.406	-4.135	-4.236	-0.101	
25	291941.2	7467519.7	648.461	644.333	-4.128	-4.235	-0.107	
26	291974.3	7467498.5	643.354	639.223	-4.131	-4.235	-0.104	
27	291994.4	7467525.3	642.072	637.941	-4.131	-4.235	-0.104	
28	291945.9	7467541.8	648.307	644.149	-4.158	-4.236	-0.078	
29	291872.1	7467526.2	658.942	654.750	-4.192	-4.237	-0.045	
30	291847.0	7467488.7	660.763	656.628	-4.135	-4.237	-0.102	
31	291796.8	7467500.5	668.273	664.135	-4.138	-4.238	-0.100	
32	291748.5	7467410.0	671.899	667.780	-4.119	-4.237	-0.118	
33	291778.7	7467456.8	670.292	666.146	-4.146	-4.237	-0.091	
34	291719.0	7467369.0	672.608	668.501	-4.107	-4.237	-0.130	
35	291684.6	7467331.7	676.310	672.187	-4.123	-4.237	-0.114	
36	291699.3	7467447.5	679.068	674.953	-4.115	-4.238	-0.123	
37	291730.4	7467505.6	675.758	671.610	-4.148	-4.239	-0.091	
38	291804.9	7467528.7	666.820	662.710	-4.110	-4.238	-0.128	
39	291746.1	7467567.2	672.529	668.412	-4.117	-4.240	-0.123	
40	291747.8	7467619.6	670.083	665.934	-4.149	-4.241	-0.092	
41	291738.0	7467670.5	667.386	663.245	-4.141	-4.242	-0.101	
42	291804.0	7467691.7	660.921	656.809	-4.112	-4.241	-0.129	
43	291812.9	7467611.1	662.931	658.784	-4.147	-4.239	-0.092	
44	291940.6	7467593.2	646.381	642.259	-4.122	-4.237	-0.115	
45	291941.5	7467656.4	645.714	641.586	-4.128	-4.238	-0.110	
46	291988.4	7467644.4	641.214	637.069	-4.145	-4.237	-0.092	
47	291992.2	7467618.9	641.177	637.059	-4.118	-4.236	-0.118	
48	292033.4	7467607.2	638.418	634.278	-4.140	-4.235	-0.095	
49	292065.2	7467685.9	637.290	633.176	-4.114	-4.236	-0.122	
50	291963.6	7467717.1	645.591	641.451	-4.140	-4.239	-0.099	
51	291918.2	7467679.5	648.499	644.373	-4.126	-4.239	-0.113	
52	291879.1	7467723.4	652.221	648.063	-4.158	-4.240	-0.082	
53	291718.5	7467722.7	664.207	660.082	-4.125	-4.243	-0.118	
54	291848.5	7467205.7	665.264	661.089	-4.175	-4.232	-0.057	
55	291831.9	7467212.3	662.492	658.386	-4.106	-4.232	-0.126	
56	291813.3	7467204.2	662.263	658.088	-4.175	-4.232	-0.057	
57	291792.8	7467174.2	664.245	660.104	-4.141	-4.232	-0.091	
58	291898.2	7467313.2	654.673	650.528	-4.145	-4.233	-0.088	
59	291947.3	7467370.6	650.156	646.034	-4.122	-4.233	-0.111	
60	292054.1	7467507.8	641.632	637.537	-4.095	-4.233	-0.138	
61	292099.1	7467557.4	638.670	634.529	-4.141	-4.233	-0.092	
62	292153.8	7467538.0	640.714	636.592	-4.122	-4.232	-0.110	
63	292133.2	7467731.2	636.838	632.744	-4.094	-4.236	-0.142	
							-0.106	media
							-0.143	min
							-0.045	max
							0.024	EMQ

0.020	DesvPad

A figura 6.95 a seguir apresenta a localização dos pontos de controle, bem como a tela de consulta para correção da altura geoidal dos três pontos escolhidos.

Figura 6.95 -Pontos cotados da restituição adotados como controle da nuvem de pontos no terreno - Campinas - SP



Fonte: Prefeitura de Campinas

Rio de Janeiro

Em função da disponibilidade somente da ortofotos, a verificação do resultado para o Rio de Janeiro foi realizada pela sobreposição dos polígonos delineados (Figura 6.96).

Figura 6.96 - Sobreposição das edificações delineada à ortofotos - Rio de Janeiro - RJ

6.7.2. Nível de detalhe da edificação

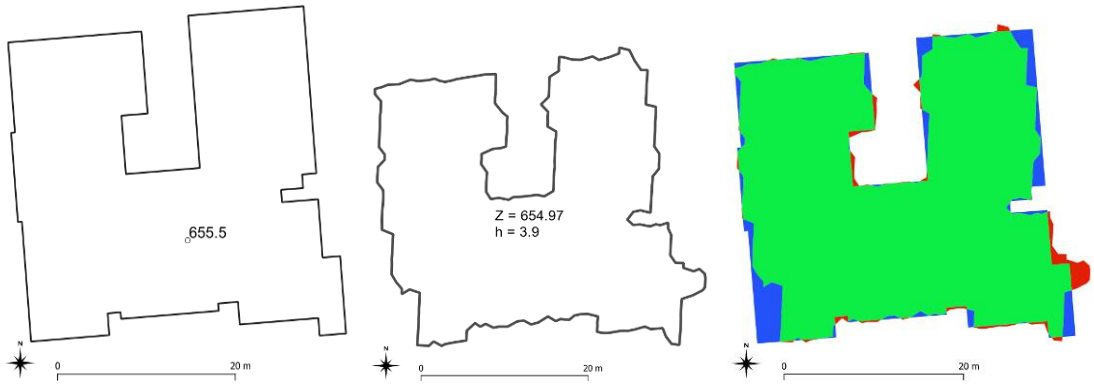
Apenas a classe de edificação foi objeto de verificação; a matriz de confusão foi considerada para quantificar os erros de omissão e comissão somente nesta classe, de tal forma que a qualidade foi estimada sem considerar as áreas classificadas como vegetação e solo (verdadeiro negativo - VN) (Rutzinger et al., 2009).

Nas áreas cuja resolução e processamento permitiram delimitar cada edificação, o produto foi considerado compatível com nível de detalhe 1 (LoD1); a verificação nesses casos se deu pela sobreposição das edificações delimitadas com suas análogas em escala e precisão melhores provenientes da restituição estereoscópica digital.

A análise foi realizada pelas áreas de sobreposição e pela diferença de altura (ou altitude) das edificações (Figura 6.97).

Figura 6.97 - Avaliação da qualidade por área em edificação única (relação referência: resultado = 1:1)

(a) restituição (b) resultado (c) sobreposição



Falso positivo (FP); Falso negativo (FN); Verdadeiro positivo (VP)

O resultado da comparação nas áreas de São Paulo é apresentado na Tabela 6.16 a seguir.

Tabela 6.16 - Integridade, acurácia e qualidade nas áreas de São Paulo- SP

Sigla	GUA	PIO	MOR	CAN	OLA	LUA
Área LEPAC (m^2)	25.315,92	17.574,71	20.588,44	11.696,27	16.410,41	20.886,99
Área delineada* (m^2)	23.255,36	15.695,73	16.511,56	10.283,65	13.272,18	18.634,07
Área de sobreposição VP (m^2)	21.375,31	12.921,85	15.337,34	8.376,94	12.296,01	17.189,30
Área de comissão FP (m^2)	2.024,74	1.793,87	1.267,37	1.074,11	801,18	1.691,27
Área de omissão FN (m^2)	4.166,18	3.722,39	5.559,04	3.474,29	4.324,75	4.225,06
Integridade (%)	83,7%	77,6%	73,4%	70,7%	74,0%	80,3%
Acurácia (%)	91,3%	87,8%	92,4%	88,6%	93,9%	91,0%
Qualidade (%)	77,5%	70,1%	69,2%	64,8%	70,6%	74,4%

* exceto crescimento horizontal da ocupação por edificações

O resultado na comparação das áreas formais de Campinas é apresentado na Tabela 6.17 a seguir.

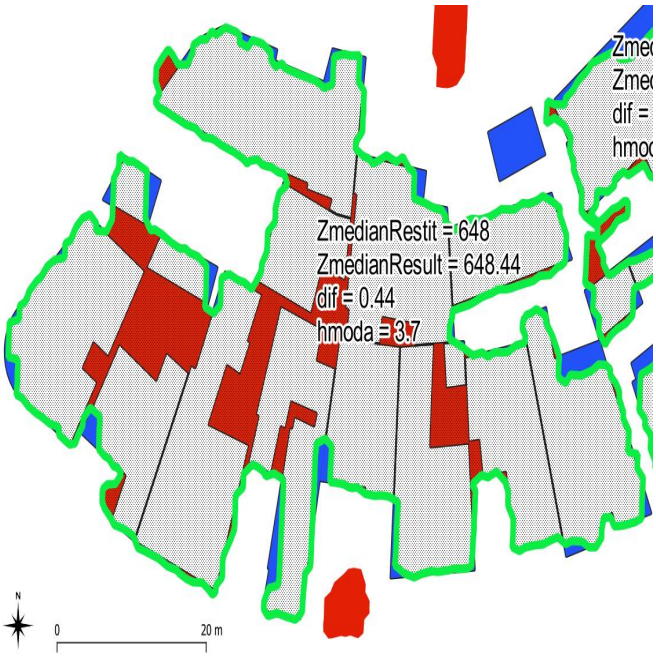
Tabela 6.17 - Integridade, acurácia e qualidade na área de Campinas - SP

Estatística	Valor
Área restituição (m2)	29.426,8
N polígonos restituição	234
Área delineada (m2)	27.492,7
N polígonos delineamento	78
Área de sobreposição VP (m2)	24.460,7
Área de comissão FP (m2)	3.046,1
Área de omissão FN (m2)	5.069,5
Integridade (%)	82,8%
Acurácia (%)	88,9%
Qualidade (%)	75,1%

6.7.3. Nível de detalhe do aglomerado

Quando o resultado do delineamento agrega mais de uma edificação, o resultado considerado dessa generalização foi o aglomerado. Dessa forma a quantidade de edificações foi inferida em uma relação 1:n (referência:resultado). Uma vez que cada edificação restituída possui o centroide com a altitude (acima do nível do mar), a verificação foi realizada pela comparação numérica da diferença ("dif") entre as medianas das altitudes dos pontos internos ao polígono delineado (Lidar - "ZmedianResult") e a mediana dos centroides internos (restituição - "ZmedianRestit") ao mesmo polígono. O valor da altura ("hmoda") em relação ao solo atribuído para o polígono foi a moda dos pontos Lidar nele contidos (Figura 6.98).

Figura 6.98 - Avaliação da qualidade por área em edificações aglomeradas (relação referência:resultado = 1:n)



Falso positivo (FP); Falso negativo (FN); Verdadeiro positivo (VP)

A verificação por área de sobreposição foi realizada para o total dos polígonos independente da detecção individual ou aglomerada (figura 6.99).

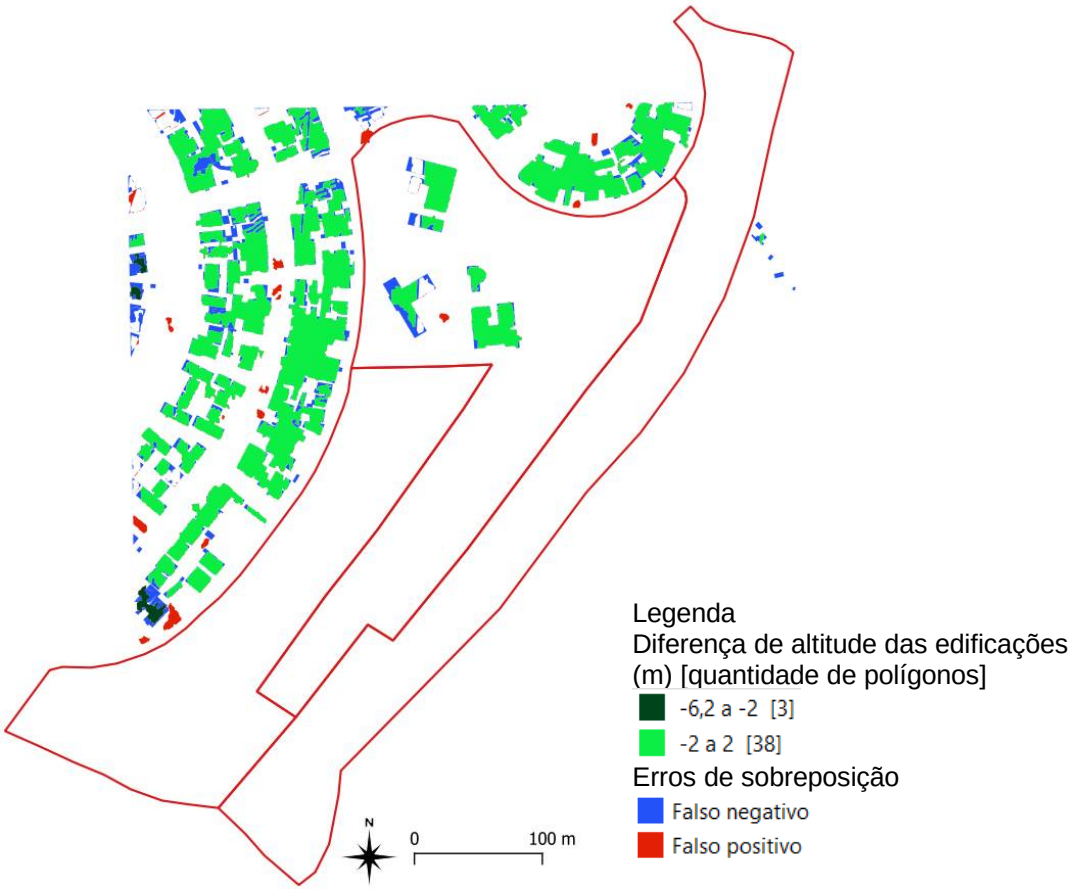
A verificação da altura das edificações foi sumarizada para a quantidade de polígonos delineados no resultado (Tabela 6.18). A diferença

média foi -0,23m e o desvio padrão foi 1,46m, revelando a ocorrência de alguns valores discrepantes (mínimo igual -6,19 por exemplo).

Tabela 6.18 - Resultado estatístico das diferenças entre altitudes da restituição e de aglomerados - Campinas - SP

Estatística	Valor
Contagem	41
Média (m)	-0,23
Mediana (m)	0,20
Desvio padrão (m)	1,46
Mínimo (m)	-6,19
Máximo (m)	1,54
Intervalo (m)	7,73
Minoria (m)	-6,19
Maioria (moda) (m)	-0,13
Variabilidade	36
Quartil Q1 (m)	-0,32
Quartil Q3 (m)	0,52
Intervalo inter-quartil - IQR (m)	0,84

Figura 6.99 - Diferenças entre altitudes da restituição e de aglomerados - Campinas - SP



Capítulo 7 - Discussão

Os aspectos analisados da qualidade dos resultados (item 6.7), quais sejam a precisão posicional, a precisão nas alturas das edificações e sua classificação, permitem as seguintes constatações.

A qualidade posicional é independente da aplicação e foi possível obter resultados estatísticos válidos com o uso de pontos de controle de campo no caso de São Paulo e restituídos no caso de Campinas. Em ambos os casos o resultado alcançou o PEC classe A com valores entre 16 e 28cm para o erro médio quadrático.

O controle de qualidade da classificação foi válido, considerando que não há relatos de resultado melhor que os 70% alcançado em áreas informais, para São Paulo e para 75% em Campinas (ainda que a verificação tenha sido realizada apenas em edificações formais no entorno).

Para a avaliação da qualidade na definição da área construída a sensibilidade na definição do número de pavimentos é crítica, pois dela decorre o resultado do cálculo da área de forma impactante por causa da adoção de um limiar absoluto. A adoção de uma margem de erro para a altura e, portanto, um cálculo de mínima e máxima áreas construídas é uma recomendação para o avanço da metodologia.

O uso da moda após o arredondamento das alturas para 1m como parâmetro nos aglomerados foi um recurso válido para evitar desvios naturais de objetos sobre as coberturas ou mesmo erros decorrentes da classificação (vegetação como edificação por exemplo). A mediana nos polígonos bem delineados da edificação se mostrou mais adequada para que houvesse independência da tipologia (laje plana, telhado ou telha amianto inclinados) no valor da altura.

Em vista dos resultados obtidos, considerou-se válido o resultado da classificação, ainda que seja um vasto campo de pesquisa com resultados promissores e que apontam para a melhoria da sua qualidade. A checagem visual e o resultado nas análises de qualidade numéricas demonstraram isso. Houve perda de área de edificação em virtude do encobrimento pela

vegetação; entretanto, nas áreas estudadas foi rara a ocorrência de vegetação arbórea de porte suficiente para o encobrimento total das edificações.

O caso das edificações aglomeradas (lajes ou coberturas adjacentes) pressupõe alturas diferentes ou planos de inclinação distintos para delinear polígonos distintos, demonstrou a necessidade da segmentação. A comparação entre resultados de Campinas/Rio com São Paulo mostrou que a quantidade de edificações detectadas foi bem maior quando os polígonos foram derivados da segmentação. O uso da grade regular para obtenção da área construída atingiu resultados satisfatórios para análise no LoD do aglomerado, e mostrou-se uma alternativa viável caso não seja processada a segmentação.

O algoritmo de segmentação foi adotado para que o delineamento levasse em conta a planaridade entre pontos adjacentes, de tal forma que mesmo as edificações vizinhas sem espaçamento pudessem ser individualizadas. Após a investigação dos parâmetros mais adequados à tipo-morfologia das áreas de São Paulo, o resultado obtido correspondeu às expectativas com uma única configuração desses parâmetros.

Na hipótese de uma tipologia construtiva geminada por exemplo, a delimitação de cada edificação só será possível caso haja algum dado adicional que as diferencie, como a divisa das propriedades, o que evidentemente não é considerado em assentamentos precários.

Quanto à possibilidade de comparação entre assentamentos precários, foram calculados os índices conforme os aspectos preconizados pelo IBGE no LIT e sintetizados no Quadro 6.7. Os resultados corresponderam às diferenças entre as áreas, de tal forma que a diversidade tipo-morfológica é passível de comparação pelas métricas adotadas pelo IBGE a partir dos dados Lidar. A área MOR é mais consolidada com tipo-morfologia semelhante às áreas formais da cidade; é um típico parcelamento irregular. A área CAN é a tipo-morfologia mais típica de favelas, com edificações pequenas e baixas (um pavimento) e apresentou ainda o menor crescimento do CA; OLA apresentou as alturas similares dos edifícios; a área de Campinas - CAM, apresentou índices que podem ser associados a áreas regulares.

A densidade da nuvem de pontos do levantamento, e consequentemente o espaçamento médio, tem influência direta nos resultados tal que os algoritmos possam corresponder às expectativas de detecção e delineamento. A maior qualidade dos resultados é perceptível para espaçamento e densidade em torno de 0,30m e 10 ppm^2 respectivamente.

Para uma ocupação formal, na qual o espaçamento entre edificações é bem maior, outra análise deve ser considerada. Os resultados na porção formal dos dados de Campinas, o delineamento foi satisfatório, ainda que a densidade do mapeamento tenha sido de 3 a 4 ppm^2. A adequação da resolução (densidade de pontos) da aquisição é fundamental para obtenção de cada nível de detalhe (LoD) de produto, pois o parâmetro de concavidade é diretamente afetado pela densidade original dos pontos.

A pesquisa sobre a caracterização das vias de acesso de forma automatizada, deve ser aprofundada, uma vez que seus índices derivados são de grande importância na metodologia adotada pelo IBGE no LIT. As iniciativas do IBGE para caracterização de aglomerados subnormais são fundamentais para análise do amplo espectro de suas morfologias, entretanto há muito a ser acrescentado pelos municípios no sentido de padronizar, ou especificar os requisitos mínimos de um aerolevantamento Lidar que garanta a obtenção dos produtos que contemplem os objetivos delineados neste trabalho.

A representação da densidade construída por *mapas de calor* pelo estimador Kernel indica aquelas áreas de ocorrência de maior adensamento e/ou verticalização. Considerando os valores oriundos do Lidar, a síntese produzida nesse tipo de mapa temático, gera uma visão comparável dos dados quantitativos da morfologia urbana.

A simplicidade na automação do processamento possibilita análises e estimativas das áreas precárias até então não disponíveis a não ser por levantamentos de campo.

7.1. Respostas às questões da pesquisa

- Quais potencialidades e limitações da tecnologia Lidar para caracterização da tipo-morfologia urbana?

É possível obter produtos cartográficos necessários para a caracterização tipo-morfológica dos assentamentos precários analisados exclusivamente com os dados de aerolevantamento Lidar, ou seja, a nuvem de pontos bruta, que comporta tratamentos diversos para extrair dados de interesse. As amostras processadas para áreas com características diversas, permitiu produzir mapas de síntese com ênfase na verticalização, bem como a tipo-morfologia dos assentamentos em termos de declividade, densidade e circulação/acesso.

- As características territoriais dos assentamentos precários são detectáveis através dos dados Lidar?

A declividade do terreno foi representada adequadamente, inclusive possibilitando a análise da situação de risco das edificações, tendo em conta o limiar para restrição à ocupação (30%).

A densidade construída foi estimada pelos dados Lidar com nível de detalhe da edificação ou do aglomerado, dependendo da resolução do levantamento. Foi evidente que uma densidade menor que 2ppm^2 (espaçamento 0,71m) não é suficiente para individualizar edificações aglomeradas, uma vez que seu recuo é praticamente nulo e o espaçamento reduzido. Uma densidade maior é desejável nesses casos, por exemplo, 10ppm^2.

- Qual o número de pavimentos das edificações e qual a densidade construída? Qual a dificuldade de acesso em função das vias e do terreno?

A segmentação dos pontos por planaridade permitiu individualizar as edificações com uma integridade em torno de 70 % e assim atingir resultados inéditos nessa tipo-morfologia com nível de detalhe (LoD1). Os resultados indicaram à predominância de UM pavimento em Campinas, LUA, OLA e CAN; DOIS pavimentos em GUA, MOR e RIO, e de TRÊS pavimentos apenas na área PIO de São Paulo.

Nos aglomerados, a determinação da moda das alturas e o consequente número de pavimentos representa naturalmente uma perda de detalhes, mas inerente à representação temática no nível de detalhe (LoD0).

A circulação/acesso não foi avaliada com base no processamento automático das imagens e, portanto, seus resultados são preliminares. Entretanto, foi possível analisar a representação pelos eixos viários com atributos de comprimento e largura; os índices obtidos a partir desses dados, refletiram a diferença na circulação entre as áreas pela *capilaridade*.

- Qual estrutura de dados geográficos (geometria e atributos) gerada a partir de pontos Lidar é adequada para estimar declividade, densidade construída e circulação/acesso?

A declividade representada pela grade regular de 5 em 5m e pela média do setor, apresentou resultados adequados desde que a densidade de pontos Lidar no solo seja suficiente. Entretanto, é essencial a sobreposição da grade de declividade com a ocupação por edificações para indicar o risco de deslizamento.

Para o cálculo da densidade construída é necessário no mínimo um ponto de altura para cada edificação, e tanto melhor se for resultado da sumarização das alturas internas cuja amplitude seja menor que um pavimento, em torno de 3,5 m. O mapa gerado pelo estimador Kernel é uma representação adequada dadas suas possibilidades e interpretações, que visualmente correspondeu à realidade dos assentamentos analisados quando considerada a ponderação pela área construída que leva em conta a área delimitada e a altura.

Um eixo em cada acesso viário, seja qual for o tipo, é suficiente desde que sua largura esteja registrada como atributo. O tipo deve ser levado em conta, pois as circunstâncias são fundamentais para limitar veículos, no caso de escadarias por exemplo.

- Qual o nível de qualidade dos resultados?

A precisão posicional, quando possível de ser verificada por pontos de controle, atendeu aos padrões de exatidão cartográfica de classe A - PEC A, conforme apresentado no item 6.7.1.

A qualidade da classificação e do delineamento, verificada pela área de sobreposição de polígonos de edificação exclusivamente, atingiu resultados bons e inéditos entre 64,8 a 77,5 %.

Capítulo 8 - Conclusão

O objetivo geral foi projetar uma linha de processamento de dados Lidar que produza índices e métricas além de representações cartográficas relacionadas a assentamentos informais intraurbanos, que permitissem análise e diagnóstico para intervenção urbanística. Através da metodologia proposta e implementada com dados de aerolevantamentos municipais nos estudos de caso, os resultados esperados foram atingidos.

Tanto os resultados numéricos quanto os cartográficos atingiram as expectativas do potencial dos dados Lidar para produção daqueles mapas, índices e métricas. Muitas são as opções de uso dos dados, através de critérios mais ou menos rigorosos de ocupação, que sigam as diretrizes do IBGE nos LITs, por exemplo. Entretanto, o que se queria demonstrar e ficou comprovado, é que a qualidade geométrica e a estrutura das nuvens de pontos Lidar são adequadas para a caracterização das ocupações precárias.

Os produtos cartográficos gerados possuem nível de detalhe diretamente dependente da resolução do levantamento. Nos casos analisados a resolução de 2 a 10 ppm^2 foi definidora da menor unidade mapeável, no pior caso o perímetro de várias edificações agregadas e no melhor caso cada unidade habitacional ou a edificação individualizada. Para essa faixa de resolução não há diferença significativa em termos de custo do aerolevantamento, de tal forma que com os sensores disponíveis a especificação é cumprida sem alteração de outros requisitos técnicos.

Os pontos Lidar que puderam ser avaliados quanto a precisão posicional, atingiram os requisitos de PEC-PCD classe A em todas as áreas de estudo. Os dados de referência só estavam disponíveis nos assentamentos precários de São Paulo, mas também foi verificado o nível de precisão para PEC-PCD classe A no entorno da área de Campinas.

Os produtos obtidos como suporte para análise urbanística, revelaram a diversidade de aspectos possíveis com base em um único

levantamento, desde o terreno natural e sua topografia em escala de detalhe, até a densidade de ocupação no assentamento de forma geral.

As variáveis verticalização e espaçamento foram analisadas sinteticamente pela densidade construída. A altura e a área construída dessas edificações, armazenada como atributo, permitiu produzir um mapa da densidade construída por assentamento, levando em conta também o espaçamento entre os centroides dos polígonos delineados.

Os polígonos de edificação foram individualmente delimitados sem a necessidade da segmentação nos casos cujo espaçamento entre beirais seja maior que 0,5 m, e a densidade nominal mínima de 10 ppm^2. Edificações espaçadas de distâncias menores ou adjacentes, foram individualizadas nessa mesma densidade com auxílio da segmentação.

A declividade foi representada adequadamente por uma grade regular de pontos espaçados de 5 m, com valores calculados a partir dos dados Lidar classificados como “solo”.

O desenho viário permitiu o cálculo da capilaridade a partir da relação do comprimento dos eixos viários com a área do assentamento, atributos esses, obtidos pela análise visual dos pontos Lidar classificados como “solo” e “edificação”.

Ainda que a densidade de coleta tenha sido diferente entre áreas/assentamentos, foi possível comparar os índices/métricas, que por sua vez foram representados adequadamente com base nos pontos Lidar. Daí pode-se inferir que possivelmente diferentes levantamentos realizados em diferentes regiões devem possibilitar uma análise comparativa de assentamentos precários, e de aglomerados subnormais no nível nacional, a cargo por exemplo do IBGE.

O nível de automação ao longo do processo revelou que há software disponível para toda a linha de produção, desde o dado bruto até o produto cartográfico, com exceção da etapa de segmentação de planos das

coberturas de edificações, pois nesta foi necessário o desenvolvimento específico para este fim.

Tendo em conta os resultados e as pesquisas realizadas em paralelo, são importantes pesquisas para:

- Definição de um critério fuzzy para estabelecer o limiar de altura na definição do número de pavimentos

- Exploração do potencial da lacunaridade para o dimensionamento do sistema viário.

- Aprofundamento no estudo de modelos altimétricos de edificação (*building height models* - BHM) em edificações aglomeradas.

Capítulo 9 - Referências

ACIOLY, C.; DAVIDSON, F. Densidade urbana: um instrumento de planejamento e gestão urbana. (Tradução Claudio Acioly). Rio de Janeiro: Mauad, 1998.

ACKERMANN, F., 1999. Airborne laser scanning - present status and future expectations. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 54 (2-3), 64-67.

AKA, J.P.M. Inventário das tipologias, morfologia e do processo de produção do espaço concreto: o caso de Novos Alagados em Salvador, Bahia, Brasil. 1997. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo). Universidade Federal da Bahia, Salvador, 1997.

ALEXANDER, C., SMITH-VOYSEY, S., JARVIS, C., TANSEY, K. 2009. Integrating building footprints and LiDAR elevation data to classify roof structures and visualise buildings. Computers, Environment and Urban Systems, 33(4):285-292. ISSN 0198-9715. https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2009.01.009.

ANTONUCCI, D. Morfologia urbana e legislação urbanística: estudo de setores de bairro na cidade de São Paulo no período de 1972/2002. Tese (Doutorado). FAUUSP. São Paulo, SP. 2005. 363p.

ARVOR, D.; DURIEUX, L.; ANDRÉS, S.; LAPORTE, M. 2013. Advances in Geographic Object-Based Image Analysis with ontologies: A review of main contributions and limitations from a remote sensing perspective. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 82, 125-137.

AXELSSON, P. 2000. DEM generation from laser scanner data using adaptative TIN models. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. Vol. XXXIII, Part B4. Amsterdam. pp. 110-117

BAATZ, M. & SCHÄPE, A., 2000: Multiresolution Segmentation - an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation. In: Strobl, J. et al.. (eds.): Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XII. Wichmann, Heidelberg, pp. 12-23.

BALSA-BARREIRO, J., AVARIENTO, J. P., LERMA, J.L. 2012. Airborne light detection and ranging (lidar) point density analysis. Scientific Research and Essays, 7(33):3010-3019

BARROS FILHO, M.N.M. 2008. Slums detection through lacunarity-based texture analysis of remote sensing images. In Expert group meeting on slum mapping. ITC, The Netherlands, Enschede. ITC, UN-HABITAT, CIESIN

BARROS FILHO, M.N.M.; SOBREIRA, F. 2005. Assessing Texture Pattern in Slum Across Scales An Unsupervised Approach. WORKING PAPER SERIES, Centre for Advanced Spatial Analysis. UCL, London. http://www.casa.ucl.ac.uk/working_papers/paper87.pdf

BATTY, M; LONGLEY, P. Fractal Cities: A Geometry of Form and Funcion. 1. ed. London: Academic Press, 1994.

BEN WU, X. & SUI, Daniel Z. GIS-Based lacunarity analysis for assessing urban residential segregation. ESRI International User Conference July 8-12, 2002.

BESUSSI, E., CHIN, N., BATTY, M., & LONGLEY, P. (2010). The structure and form of urban settlements. In T. Rashed & C. Jürgens (Eds.), Remote sensing of urban and suburban areas (pp. 13-31). Netherlands, Dordrecht: Springer.

BILJECKI F, ARROYO O.K, LEDOUX H, PETERS R, STOTER J. (2016). Population Estimation Using a 3D City Model: A Multi-Scale Country-Wide Study in the Netherlands. PLoS ONE 11(6): e0156808. doi:10.1371/journal.pone.0156808

BLASCHKE, T. 2010. Object based image analysis for remote sensing. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 65, 2-16.

BLASCHKE, T.;LANG,S.;HAY,G.J. (Eds.) Object-Based Image Analysis: Spatial Concepts for Knowledge-Driven Remote Sensing Applications. 2008 Springer-Verlag Berlin Heidelberg

BRITO, P.L. Sensoriamento remoto na identificação de elementos e tipologias urbanas relacionados à ocorrência da leptospirose no subúrbio

ferroviário de Salvador, Bahia. Tese (Doutorado). EPUSP, São Paulo, SP. 2010. 268p.

BROOK, A., E. Ben-Dor, R. Richter. FUSION OF HYPERSPECTRAL IMAGES AND LIDAR DATA FOR CIVIL ENGINEERING STRUCTURE MONITORING. Commission VI, WG VI/4. 2009.

BRYS, L. M. Página dinâmica para aprendizado do sensoriamento remoto. Dissertação (Mestrado). Porto Alegre: UFRGS/CEPSRM, 2008. 172 p. il.

BURNETT, C. & BLASCHKE, T. A multi-scale segmentation/object relationship modeling methodology for landscapes analysis. Ecological Modelling, 2003, nº 3, p. 233-249.

CARNEIRO, A.F.T.; ERBA, D.A.; AUGUSTO, E.A.A. Cadastro Multifinalitário 3D: Conceitos e Perspectivas de Implantação no Brasil. Revista Brasileira de Cartografia, v. 64, n.2, p. 257-271. 2012.

CATALDI, G.; MAFFEI, G.; VACCARO, P. Saverio Muratori and the Italian School of planning typology. Urban Morphology (2002) 6(1), 3-14

CENTENO, J.A.S. & MITISHITA, E.A. Laser scanner aerotransportado no estudo de áreas urbanas: A experiência da UFPR. Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Brasil, 21-26 abril 2007, INPE, p. 3645-3652.

ČEKADA, Mihaela Triglav; CROSILLA, Fabio; FRAS, Mojca Kosmatin. Theoretical Lidar point density for topographic mapping in the largest scales. Geodetski vestnik, 54/3 (2010).

CHEN, C., LI, Y., LI, W.; DAL, H. A multiresolution hierarchical classification algorithm for filtering airborne LiDAR data. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 82, pp. 1-9, Aug. 2013

CHEN, Q., GONG, P., BALDOCCHI, D., XIE, G., 2007. Filtering airborne laser scanning data with morphological methods. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 73 (2), 175-185.

CHUN, L.; HANGBIN, W.; YUNLING, Z. Extraction of Urban 3D Features from Lidar Data Fused with Aerial Images Using an Improved Mean Shift

Algorithm. Survey Review, Volume 43, Number 322. September 2011, pp. 402-414(13)

COSTA, S. A. P. & TEIXEIRA, M. C. V. 2014. The study of urban form in Brazil. Urban Morphology Journal online. 18(2) Disponível em: http://www.urbanform.org/online/pdf2014/201418_119.pdf

COUTINHO FILHO, O.S. Análise do índice ponderado de áreas verdes baseado no lidar (ALS) como parâmetro da qualidade ambiental urbana. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2014. 120 p.

DA SILVEIRA, José Augusto Ribeiro. Urban sprawl, periferização e bordas urbanas. Minha Cidade, São Paulo, ano 14, n. 164.07, Vitruvius, mar. 2014 <http://www.vitruvius.com.br/revistas/read/minhacidade/14.164/5106>.

DALMOLIN, Q. SANTOS, D.R. Sistema laserscanner: Conceitos e princípios de funcionamento. 3ª. Edição. Curitiba, UFPR, 2004. 97p.: il.

DEHVARI, A.; HECK, R.J. Removing non-ground points from automated photo-based DEM and evaluation of its accuracy with LiDAR DEM. Computers & Geosciences 43 (2012) 108-117

DEMARCHI, J.C.; SARTORI, A.A.C.; ZIMBACK, C.R.L. (2011) Métodos de classificação de imagens orbitais para o mapeamento do uso do solo: estudo de caso na Sub-Bacia do Córrego das Três Barras. Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba, PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio de 2011, INPE p.2644-2651

DOHNJU, H.K. Improving 3D models by adding image information. 2012. Dissertação (Msc ITC). 56p.

DOUGLAS, D. & PEUCKER, T. 1973. Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature. The Canadian Cartographer 10(2), 112-122 doi:10.3138/FM57-6770-U75U-7727

EIBE FRANK; MARK A. HALL; IAN H. WITTEN. (2016). The WEKA Workbench. Online Appendix for "Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques", Morgan Kaufmann, Fourth Edition, 2016.

ERBA, D.A. Application of 3D Cadastres as a Land Policy Tool. Land Lines, Lincoln Institute and Land Policy. April, 2012. Disponível em: http://www.lincolninst.edu/pubs/2018_Land-Lines-April-2012 Acessado em: 30.11.2014

FERREIRA, F.R. Segmentação do espaço urbano por meio da tecnologia Lidar aerotransportado. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes. São Paulo, 2014. 129 p.

FILIN, S., PFEIFER, N. 2006. Segmentation of airborne laser scanning data using a slope adaptive neighborhood. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 60 (2), 71-80.

FLOOD, M. 2001. Lidar activities and research priorities in the commercial sector. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume XXXIV - 3/W4, Annapolis, MD, pp. 3-7. Disponível em: http://www.isprs.org/proceedings/XXXIV/3-W4/pdf/Flood.pdf. Acesso em 01.03.2015.

FONSECA, B.M.; MOURA, A.C.M.; RIBAS, R.P. CADASTRO 3D COMO BASE PARA A MODELAGEM PARAMÉTRICA DA PAISAGEM URBANA. COBRAC 2014 - 11o. Congresso Cadastro Técnico Multifinalitário, UFSC Florianópolis, 12 a 16 de Outubro 2014

FRANKHAUSER, P. Fractal analysis of urban structures. In: HOLM, E. (Edit). Modelling space and networks: Progress in theoretical and quantitative geography. Umea: Gerum Kulturgeografi, 1997. p. 145-181.

GEVAERT, C.M., SLIUZAS, R., PERSELLO, C., VOSSELMAN, G. 2017. Informal settlement classification using point-cloud and image-based features from UAV data. ISPRS J. Photogramm. Remote Sens. 125, 225–236.

GONÇALVES, C. D.A.B., SOUZA. I.M.PEREIRA, M.N.; FREITAS. Análise do Ambiente Residencial Urbano Visando a Inferência Populacional a Partir do Uso de Dados de Sensoriamento Remoto Orbital de Alta Resolução. Geografia, Rio Claro, v 31 n. 2 p.371-402, maio a agosto 2006

GONZÁLEZ-AGUILERA, D.; CRESPO-MATELLÁN, E.; HERNÁNDEZ-LÓPEZ, D.; ROGRÍGUEZ-GONZÁLVEZ, P. 2013. Automated Urban Analysis Based on LiDAR-Derived Building Models. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 51(3):1844-1851.

HEIDEMANN, H.K. Lidar base specification version 1.0: U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 11, chap. B4, 2012. 63 p.

HEINEBERG, H. German geographical urban morphology. Urban Morphology (2007) 11(1), 5-24

HENGL, T.; GRUBER, S.; SHRESTHA, D.P. 2003. Digital terrain analisys in ILWIS: Lecture notes and user guide. ITC. Disponível em: www.itc.nl/library/Papers_2003/misca/hengl_digital.pdf

HEIPKE, C., MAYER, H., WIEDEMANN, C., JAMET, O. “Evaluation of automatic road extraction,” in Proc. ISPRS Workshop 3D Reconstruction and Modeling of Topographic Objects, Stuttgart, Germany, Sep. 17-19, 1997, vol. XXXII/3-4W2, Int. Archives Photogrammetry Remote Sens., pp. 151-160.

HOFMANN, P., STROBL, J., BLASCHKE, T., & KUX, H. J. H. (2008). Detecting informal settlements from QuickBird data in Rio de Janeiro using an object-based approach. In T. Blaschke, S. Lang, & G. J. H ay (Eds.), Object-based image analysis - Spatial concepts for knowledge-driven remote sensing applications (pp. 531-553). New York: Springer.

IBGE a - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo Demográfico 2010 São Paulo. Disponível em: http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/tabelas_pdf/total_populacao_sao_paulo.pdf . Acesso em 17.08.14.

IBGE b - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. Censo Demográfico 2010:

Aglomerados subnormais - Informações territoriais. 2010. 251p. Disponível em: http://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/552/cd_2010_agsn_if.pdf . Acesso em 29.09.16.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. Manual da Base Territorial 2014. Rio de Janeiro, RJ, 2014. 157p.

IGN - Instituto Geográfico Nacional. Gobierno de España. Ministerio de Fomento. Plan Nacional de Observación del Territorio 2008-2015. Disponível em: http://pnoa.ign.es/presentacion. Acesso em: 22/11/2016.

Innocente, E. F. Implantação, cálculo e ajustamento de redes geodésicas visando a elaboração de carta geoidal para a cidade de Campinas. Dissertação de Mestrado - Unicamp - Campinas, SP, 2007.

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Tutorial de Geoprocessamento. Disponível em: http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/tutorial/index.html Acesso em: 01/03/2015.

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Curso de Processamento Digital de Imagens. Disponível em: http://www.dpi.inpe.br/~carlos/Academicos/curso_pdi.htm. Acesso em: 01/03/2015.

IOANNIDIS, C., PSALTIS, C., POTSIOU, C. 2009. Towards a strategy for control of suburban informal buildings through automatic change detection. Computers, Environment and Urban Systems 33: 64-74.

ISENBURG, M. "LAStools - efficient LiDAR processing software" (version 160721, unlicensed). Disponível em: http://rapidlasso.com/LAStools. 2016.

JARZABEK-RYCHARD, M. & BORKOWSKI, A. 2016. 3D building reconstruction from ALS data using unambiguous decomposition into elementary structures. ISPRS J. Photogrammetry Remote Sensing. 118, pp. 1–12.

JARZABEK-RYCHARD, M. & MAAS, H-.G. 2017. Geometric Refinement of ALS-Data Derived Building Models Using Monoscopic Aerial Images. Remote Sens. 9(3) pp. 282

JENSEN, J. R. Sensoriamento Remoto do Ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres. Tradução José Carlos Epiphanio (coord.) - São José dos Campos, SP: Parêntese, 2009. il.

JENSEN, J.R. Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective. 3 ed. Pearson Prentice Hall. 2005

JENSEN, J. R., & COWEN, D. C. (1999). Remote sensing of urban/suburban infrastructure and socio-economic attributes. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 65(5), 611-622.

KHOSHELHAM, K., OUDE ELBERINK, S.J.; XU, S. Segment based classification of damaged building roofs in aerial laser scanning data. In: IEEE Geoscience and remote sensing letters, 10 (2013)5 pp. 1258-1262.

KILIAN, J., HAALA, N., ENGLICH, M., 1996. Capture and evaluation of airborne laser scanner data. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing 31 (Part B3), 383-388.

KIT, O., Lüdeke, M., & Reckien, D. (2012). Texture-based identification of urban slums in Hyderabad, India using remote sensing data. Applied Geography, 32(2), 660-667.

KOBLER, A., PFEIFER, N., OGRINC, P., TODOROVSKI, L., OSTIR, K., DZEROSKI, S., 2007. Repetitive interpolation: A robust algorithm for DTM generation from Aerial Laser Scanner Data in forested terrain. Remote Sensing of Environment 108 (1), 9-23.

KOHLI, D.; SLIUZAS, R.; KERLE, N.; STEIN, A. An ontology of slums for image-based classification. Computers, Environment and Urban Systems 36 (2012) 154-163

KOHLI, D.; WARWADEKAR, P.; KERLE, N.; SLIUZAS, R.; STEIN, A. Transferability of Object-Oriented Image Analysis Methods for Slum Identification . Remote Sensing. 5 (2013) 4209-4228

KOLBE, Thomas H. Representing and Exchanging 3D City Models with CityGML. In: Lee, J. & Zlatanova, S. (Eds.) 3D Geo-Information Sciences, 2009. Springer Berlin Heidelberg. pp.15-31

KÖRTING, T.S.; FONSECA,L.M.G.; CÂMARA,G. 2013. GeoDMA-Geographic Data Mining Analyst. Computers & Geosciences 57, 133-145

KRAFTA, R. Notas de aula de morfologia urbana. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2014. 352 p.

KRAUS, K., PFEIFER, N., 1998. Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 53 (4), 193-203.

KRESSLER, F. P.; STEINNOCHER, K. 2006. Image data and LIDAR - an ideal combination matched by object oriented analysis. In: Geographic Object-Based Image Analysis, Salzburg University, Austria.

KUFFER, M. & BARROS, J. Urban Morphology of Unplanned Settlements: The Use of Spatial Metrics in VHR Remotely Sensed Images. 1st Conference on Spatial Statistics 2011, Mapping Global Change. Procedia Environmental Sciences 7 (2011) 152-157

KUFFER, M.; KERLE, N.; SLIUZAS, R. 2008. Measuring of spatial configuration of informal versus formal urban development using spatial metrics. Expert Group Meeting on Slum Identification and Mapping. International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation (ITC), Netherlands UN-HABITAT, Global Urban Observatory, Kenya Center for International Earth Science Information Network (CIESIN) Colombia University, USA. Disponível em: https://ciesin.columbia.edu/confluence/display/slummap/Agenda+and+Presentations

KURKDJIAN, M. L. N. O. Um método para a identificação e análise de setores residenciais urbanos homogêneos, através de dados de sensoriamento remoto, com vistas ao planejamento urbano. São Paulo. 158 p., Tese (Doutorado) - USP-FAU, 1986. (INPE 6358-TAE/026).

KUX, H. J. H., NOVACK, T., FERREIRA, R., & OLIVEIRA, D. A. (2010). Urban land cover classification using optical VHR data and the knowledge-based system InterIMAGE. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXVIII(4-C7).

LESPARRE, J.; B.G.H. GORTE. SIMPLIFIED 3D CITY MODELS FROM LIDAR. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXIX-B2, 2012. XXII ISPRS Congress, 25 August - 01 September 2012, Melbourne, Australia. pp 1-4

LI, Y.; WU, H.; XU, H.; AN, R.; XU, J.; HE, Q. A gradient-constrained morphological filtering algorithm for airborne LiDAR. Optics & Laser Technology, 54(2013) 288-296.

LILLESAND, T.M.; KIEFER, R.W.; CHIPMAN, J.W. Remote Sensing and Image Interpretation. 6 ed. John Wiley & Sons. 2008.

LIU, C., WU, H., ZHANG, Y. EXTRACTION OF URBAN 3D FEATURES FROM LIDAR DATA FUSED WITH AERIAL IMAGES USING AN IMPROVED MEAN SHIFT ALGORITHM. Survey Review, 43, 322, PP. 402-414 (2011)

LWIN, K. K., & MURAYAMA, Y. (2009). A GIS approach to estimation building population for micro-spatial analysis. Transactions in GIS, 13, 401-414.

MACHADO, A.M.L. Extração automática de contornos de edificações utilizando imagem gerada por câmara digital de pequeno format e dados Lidar. Tese (doutorado). Curitiba, PR, UFPR. 2006. 213p.

MAHABIR, R., CROITORU, A., CROOKS, A. T., AGOURIS, P., STEFANIDIS, A. 2018. A Critical Review of High and Very High-Resolution Remote Sensing Approaches for Detecting and Mapping Slums: Trends, Challenges and Emerging Opportunities. Urban Sci., 2, 8. https://doi.org/10.3390/urbansci2010008

MANDELBROT, Benoit B. The fractal geometry of nature. W. H. Freeman and co., San Francisco. 1983. 460p.

MANSOR, S.; Hong, W.T.; Shariff, M.A.R. 2002. Object oriented classification for land cover mapping. GISdevelopment.net. Disponível em: http://www.gisdevelopment.net/application/environment/overview/envo0010pf.htm. Acessado em: 10/10/2014.

MALLET et al.. Analysis of full-waveform lidar data for classification of urban areas. Geoinformation 5/2008

McGARIGAL, K., CUSHMAN, S.A.; NEEL, M.C., ENE, E. 2002. FRAGSTATS v3: Spatial Pattern Analysis Program for Categorical Maps. Computer software program produced by the authors at the University of Massachusetts, Amherst. Disponível em: http://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html

McGAUGHEY, R.J. (2014) Fusion/LDV: Software for LiDAR Data Analysis and Visualization, March 2104 – Fusion Version 3.42

MILLER, R. B., & SMALL, C. (2003). Cities from space: Potential applications of remote sensing in urban environmental research and policy. Environmental Science & Policy, 6(2), 129-137.

MYINT, S.W.; GOBER, P.; BRAZEL, A.; GROSSMAN-CLARKE, S.; WENG, Q. 2011. Per-pixel vs. object-based classification of urban land cover extraction using high spatial resolution imagery. Remote Sensing of Environment 115, 1145-1161.

NAKANO, A. K. Elementos demográficos sobre a densidade urbana da produção imobiliária: São Paulo, uma cidade oca? 2015. 348p. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Filosofia e Ciências Humanas, Campinas – SP, 2015.

NAVULUR, K. Multispectral image analysis using object-oriented paradigm. Taylor & Francis. 2007.

NOBREGA, R. A. A. Detecção da malha viária na periferia urbana de São Paulo utilizando imagens orbitais de alta resolução espacial e classificação orientada a objetos. 2007. 157p. Tese (Doutorado) - EPUSP, São Paulo, 2007.

NOVACK, T., & KUX, H. J. (2010). Urban land cover and land use classification of an informal settlement area using the open-source knowledge-based system InterIMAGE. Journal of Spatial Science, 55(1), 23-41.

OLIVEIRA, V. 2013. Morpho: a methodology for assessing urban form. Urban Morphology Journal online. 17(1) Disponível em: http://www.urbanform.org/online/pdf2013/201317_21.pdf

OUDE ELBERINK, S.J. 2008. Problems in automated building reconstruction based on dense airborne laser scanning data. In: ISPRS 2008: Proceedings of the XXI congress: Silk road for information from imagery. The International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 3-11 July, Beijing, China. Comm. III, WG III/3 Beijing. ISPRS, 2008. pp. 93-98.

OUDE ELBERINK, A. 2010. Acquisition of 3D topography: Automated 3D road and building reconstruction using airborne laser scanner data and topographic maps. PhD Thesis, ITC, The Netherlands

OUDE ELBERINK, S.; SHOKO, M.; FATHI, S.A.; RUTZINGER M. Detection of collapsed buildings by classifying segmented airborne laser scanner data. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXVIII-5/W12, 2011. ISPRS Calgary 2011 Workshop, 29-31 August 2011, Calgary, Canada. pp. 307-312

OWEN, K.K.; WONG, D.W. An approach to differentiate informal settlements using spectral, texture, geomorphology and road accessibility metrics. Applied Geography 38 (2013) 107-118

PACILÉO NETTO, Nicola ; BLITZKOW, Denizar ; NERO, M. A. ; FONSECA JUNIOR, Edavaldo Simões da ; CINTRA, Jorge Pimentel ; ARAÚJO, Silvana Cândida . Metodologia de Integração de Diferentes Redes Geodésicas para Atualização Cartográfica: Estudo de caso em concessionária de energia elétrica. IEEE Latin America Transactions, v. 1, p. 8, 2003.

PALMER, T.C.; SHAN, J. A Comparative Study on Urban Visualization Using LIDAR Data in GIS. URISA Journal. Vol. 14, No. 2, 2002. pp. 19-25.

PATINO, J.E.; DUQUE, J.C. A review of regional science applications of satellite remote sensing in urban settings. Computers, Environment and Urban Systems 37 (2013) 1-17

PAULA, C.F. Comparação de diferentes densidades de pontos em perfilamentos LiDAR aerotransportado para ambiente urbano regular. Dissertação (Mestrado). EPUSP, São Paulo, 2017. 265 p.

PEDRASSOLI, J.C. Análise orientada a objeto para detecção de favelas e classificação do uso do solo em Taboão da Serra/SP. 2011. Dissertação (Mestrado em Geografia Física) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/8/8135/tde-03052012-085635/>. Acesso em: 2014-12-09

PEREIRA, R.B. Tipologia arquitetônica e morfologia urbana. Uma abordagem histórica de conceitos e métodos. Arquitextos, São Paulo, ano 13, n. 146.04, Vitruvius, jul. 2012. Disponível em: <http://www.vitruvius.com.br/revistas/read/arquitextos/13.146/4421>. Acessado em: 30.08.2016

PINGEL, T. J.; CLARKE, K. C.; McBRIDE, W.A. An improved simple morphological filter for the terrain classification of airborne LIDAR data. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 77 (2013) 21-30. Disponível em: http://tpingel.org/code/smrf/smrf.html

PINHO, C. M. D. Análise orientada a objetos de imagens de satélites de alta resolução espacial aplicada à classificação de cobertura do solo no espaço intra-urbano: o caso de São José dos Campos - SP. São José dos Campos: Dissertação de Mestrado, INPE, 2006. 180 p. Disponível em: http://urlib.net/sid.inpe.br/MTC-m13@80/2005/11.23.13.40. Acessado em: 30.08.2014

PINHO, C. M. D; FEITOSA, F. F. e KUX, H.; Classificação automática de cobertura do solo urbano em imagem IKONOS: Comparação entre a abordagem pixel-a-pixel e orientada a objetos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO. (SBSR) 12, 2005.

Anais. São José dos Campos: INPE, 2005. Artigos p. 4217 - 4224. CD-ROM. ISBN 85-17- 00018-8.

PLATT, R.V., RAPOZA, L., 2008. An evaluation of an object-oriented paradigm for land use/land cover classification. The Professional Geographer 60 (1), 87-100.

PSU - Pennsylvania State University. GEOG 497D: LIDAR Technology and Applications. Disponível em: https://www.e-education.psu.edu/lidar Acessado em: 01.03.2015

QIU, F., SRIDHARAN, H., CHUN, Y. Spatial Autoregressive Model for Population Estimation at the Census Block Level Using LIDAR-derived Building Volume Information. Cartography and Geographic Information Science, Vol. 37, No. 3, 2010, pp. 239-257

RENSLOW, M.S. (Ed.). Manual of Airborne Topographic Lidar. ASPRS - American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 504p. 2012.

RHINANE, H. (2011). Detecting slums from SPOT data in Casablanca Morocco using an object based approach. Journal of Geographic Information System, 03(03), 209-216.

RIBEIRO, S.C.L. Automação fotogramétrica e geração de Modelos Digitais do Terreno (MDTs). Dissertação (Mestrado). EPUSP, São Paulo, 1995.

RIBEIRO, S.C.L., DANIEL, M.N.; ABIKO, A. 2016. ZEIS maps: Comparing areas to be earmarked exclusively for social housing in São Paulo city. Land Use Policy. 58, pp. 445-455. ISSN 0264-8377, https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2016.08.010 .

RIDD, M.K. (1995). Exploring a V-I-S (Vegetation-Impervious-Surface) model for urban ecosystem analysis through remote sensing: comparative anatomy for cities. Int. Journal of Remote Sensing. 16 (12): 2165-2185.

ROCHA, C.S. Avanços e limites da regularização fundiária na Vila Brandina (Campinas - SP). Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências. Campinas, SP: 219p., 2012.

ROSSI, Aldo. *A Arquitetura da Cidade.* São Paulo: Martins Fontes, 1995.

ROSSI, Aldo. Para una arquitectura de tendencia. Escritos: 1956-1972. Barcelona: Editorial Gustavo Gilli S.A., 1977.

ROSSI, C., & GERNHARDT, S. (2013). Urban DEM generation, analysis and enhancements using TanDEM-X. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 85, 120-131.

ROTTENSTEINER, F. 2006. Consistent Estimation of Building Parameters Considering Geometric Regularities by Soft Constraints. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 36(part 3): 13-18.

RUPNIK B., MONGUS D., ZALIK B. 2015. Point Density Evaluation of Airborne LiDAR Datasets. Journal of Universal Computer Science, 21, 4, 587-603

RUTZINGER, M.; ROTTENSTEINER, F.; PFEIFER, N. A comparison of evaluation techniques for building extraction from airborne laser scanning. IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens. 2009, 2, 11-20.

SÃO PAULO (cidade). Secretaria Municipal de Desenvolvimento Urbano. SP 2040: a cidade que queremos. São Paulo: SMDU, 2012. 364p. il. Disponível em: http://www.habisp.inf.br/theke/documentos/outros/sp2040-acidadequequeremos/ . Acessado em 17.08.14.

SÃO PAULO (cidade) a. Revisão do Plano Diretor Estratégico Habitação. SMDU/SEHAB. Disponível em: https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/desenvolvimento_urbano/arquivos/plano_diretor/revisao-pde-habitacao.pdf . Acessado em 22.02.19.

SÃO PAULO (cidade) b. Programa de Metas 2013-2016. São Paulo, 2013. Disponível em: http://ww2.prefeitura.sp.gov.br//videos/AF_FolhetoProgramaMetas.pdf. Acessado em 17.08.14.

SÃO PAULO (cidade), 2016. Lei n.16.402/2016, de 22 de março de 2016. Lei de Parcelamento, Uso e Ocupação do Solo (LPUOS). Disponível em: http://gestaourbana.prefeitura.sp.gov.br/arquivos-do-zoneamento-2/

SHEKHAR, S. DETECTING SLUMS FROM QUICK BIRD DATA IN PUNE USING AN OBJECT ORIENTED APPROACH. XXII ISPRS Congress, 2012, Volume XXXIX-B8, pp. 519-524.

SHUFELT, J. A. “Performance evaluation and analysis of monocular building extraction from aerial imagery,” IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., vol. 21, no. 4, pp. 311-326, Apr. 1999.

SITHOLE, G., VOSSELMAN, G. Experimental comparison of filter algorithms for bare-Earth extraction from airborne laser scanning point clouds. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 59 (2004) 85-101

SILVA, R. M.; COSTA, T.S.P.S.; PURIFICAÇÃO, N. R. S.; CARNEIRO A.F.T. (2016) Análise da situação atual do cadastro 3D de apartamentos. VI Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, Recife - PE, 24-25 de agosto de 2016. Disponível em: https://www3.ufpe.br/visimgeo/includes/Anais_final_10_09_16/artigos/Todos_Artigos/067_1.pdf.

SLIUZAS, R., KUFFER, M., & MASSER, I. (2010). The spatial and temporal nature of urban objects. In T. Rashed & C. Jurgens (Eds.), Remote sensing of urban and suburban areas (pp. 67-84). Netherlands, Dordrecht: Springer.

SLIUZAS,R.; MBOUP,G.; SHERBININ,A. (Compil.) (2008) Expert Group Meeting on Slum Identification and Mapping - Report. International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation (ITC), Netherlands UN-HABITAT, Global Urban Observatory, Kenya Center for International Earth Science Information Network (CIESIN) Colombia University, USA. Disponível em: https://ciesin.columbia.edu/confluence/display/slummap/Final+report+of+expert+group+meeting Acessado em: 30.11.2014

SOBREIRA, F.J.A. A lógica da diversidade: complexidade e dinâmica em assentamentos espontâneos. 2002. Tese (Doutorado em

Desenvolvimento Urbano). Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2002.

SOBREIRA, F.J.A. Favelas, barriadas, bidonvilles: the universal morphology of poverty. In: International Seminar on Urban Form, Anais, Ouro Preto, MG: 2007.

SOBREIRA, F.J.A.; GOMES, M. The Geometry of Slums: boundaries, packing and diversity. Working Paper Series. CASA - Centre for Advanced Spatial Analysis - University College London, London, v. 01, p. 30, 2001.

SOHN, G. 2004. Extraction of Buildings from High-Resolution Satellite Data and Lidar. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 35(part B3): 1036-1042.

SOUZA; ALVES; ALMEIDA; PINHO. Caracterização Socioeconômica do Espaço Residencial Construído Utilizando Imagens de Alta Resolução Espacial e Análise Orientada a Objeto. Geografia - v. 16, n. 1, jan./jun. 2007 - Universidade Estadual de Londrina, Departamento de Geociências.

SRIDHARAN, H.; QIU, F. A Spatially Disaggregated Areal Interpolation Model Using Light Detection and Ranging-Derived Building Volumes. Geographical Analysis (2013) 45, 238–258

STOTER, J.; B. VALLET, T. LITHEN, M. PLA, P. WOZNIAK, T. KELLENBERGER, A. STREILEIN, R. ILVES, H. LEDOUX. STATE-OF-THE-ART OF 3D NATIONAL MAPPING IN 2016. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLI-B4, 2016 XXIII ISPRS Congress, 12-19 July 2016, Prague, Czech Republic.

STOW, D., LOPEZ, A., LIPPITT, C., HINTON, S., & WEEKS, J. R. (2007). Object-based classification of residential land use within Accra, Ghana based on QuickBird satellite data. International Journal of Remote Sensing, 28(22), 5167-5173.

TAPIADOR, F. J., AVELAR, S., TAVARES-CORRÊA, C., & ZAH, R. (2011). Deriving fine-scale socioeconomic information of urban areas using very

high-resolution satellite imagery. International Journal of Remote Sensing, 33(21), 6437-6456.

TAUBENBÖCK, H., KRAFF, N. J. 2014. The physical face of slums: a structural comparison of slums in Mumbai, India, based on remotely sensed data. J Hous and the Built Environ 29:15–38. https://doi.org/10.1007/s10901-013-9333-x

TAUBENBÖCK, H., KRAFF, N.J., WURM, M. 2018. The morphology of the Arrival City - A global categorization based on literature surveys and remotely sensed data. Applied Geography. 92, pp. 150-167

TEMBA, P.; NERO, M.A.; BOTELHO, L.M.R.; LOPES, M.E.C. 2015. Building Vectorization inside a Favela Utilizing Lidar Spot Elevation. In: Proceedings of the Earth Observing Systems, San Diego, CA, USA

TOMPALSKI, P.; Wężyk, P. LIDAR AND VHRS DATA FOR ASSESSING LIVING QUALITY IN CITIES - AN APPROACH BASED ON 3D SPATIAL INDICES. XXII ISPRS Congress, 2012, Volume XXXIX-B6, pp. 173-176

TOVARI, D., PFEIFER, N., 2005. Segmentation based robust interpolation-a new approach to laser data filtering. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 36 (3/W19), 79-84.

TRIMBLE Geospatial Imaging. 2014. eCognition UserGuide. Available on: www.ecognition.com (acessado em: 20 out. 2014)

ULLRICH, A. Sampling the world in 3D by Airborne Lidar - Assessing the information content of Lidar point clouds. pp. 247-259. In: Dieter Fritsch (ed.) Photogrammetric Week 2013. Disponível em: www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/phowo13/

UN-Habitat. (2006). State of the world cities. United Nations Human Settlements Programme (UN-Habitat), 108p. Disponível em: http://unhabitat.org/publications-listing/state-of-the-worlds-cities-20062007/

UN-Habitat. (2012). Streets as Tools for Urban Transformation in Slums: A Street-Led Approach to Citywide Slum Upgrading. United Nations Human

Settlements Programme (UN-Habitat), 97p. ISBN:(Volume) 978-92-1-132606-2. Disponível em: https://unhabitat.org/books/streets-as-tools-for-urban-transformation-in-slums/

van Oosterom, P.; Lemmen, C.; Thompson, R.; Janečka, K.; Zlatanova, S.; Kalantari, M. (2018) Chapter 3. 3D Cadastral Information Modelling. FIG publication Best Practices 3D Cadastres - Extended version

VILLAÇA, F. Espaço intraurbano no Brasil. São Paulo: Nobel, 2001.

VOSSELMAN, G. ISPRS test on extracting DEM from point clouds. 2003. Disponível em: http://www.itc.nl/isprswgIII-3/filtertest/

VOSSELMAN, G., 2000. Slope based filtering of laser altimetry data. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing 33 (Part B3/2), 935-942.

VOSSELMAN, G., MAAS, H.G. (Eds.). Airborne and Terrestrial Laser Scanning. CRC. Press, Boca Raton. 2010.

WANG, C., TSENG, Y., 2010. DEM generation from airborne LiDAR data by adaptive dual-directional slope filter. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing 38, 628-632.

WEEKS, J. R., HILL, A. G., STOW, D., GETIS, A., & FUGATE, D. (2007). Can we spot a neighborhood from the air? Defining neighborhood structure in Accra, Ghana. GeoJournal, 69(1-2), 9-22.

WHITEHAND, J.W.R. British urban morphology: the Conzenian tradition. Urban Morphology (2001) 5(2), 103-109

WU, J. & DAVID, J. L .2002. A spatially explicit hierarchical approach to modeling complex ecological systems: Theory and applications. In: Ecological Modelling, vol. 153, p. 7-23.

XU, S.; VOSSELMAN, G.; OUDE ELBERINK, S. Multiple-entity based classification of airborne laser scanning data in urban areas. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 88 (2014) 1-15

YAN, W.Y.; SHAKER, A.; EL-ASHMAWY, N. Urban land cover classification using airborne LiDAR data: A review. Remote Sensing of Environment 158 (2015) 295-310. http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2014.11.001

YE, Y. & VAN NES, A. 2014. Quantitative tools in urban morphology: combining space syntax, spacematrix and mixed-use index in a GIS framework. Urban Morphology Journal online. 18(2) Disponível em: http://www.urbanform.org/online/pdf2014/201418_97.pdf

YU, B., LIU, H., WU, J., HU, Y., ZHANG, L. 2010. Automated derivation of urban building density information using airborne LiDAR data and object-based method. Landscape and Urban Planning, 98 pp. 210–219

ZHAN, Q. A Hierarchical Object-Based Approach for Urban Land-Use Classification from Remote Sensing Data. PhD Dissertation. Enschede, Netherlands : ITC, 2003 - Dissertation n. 103. PhD Thesis - Wageningen University, 2003. Disponível em: http://www.itc.nl/library/papers_2003/phd_theses/zhan.pdf O trabalho utiliza dados Lidar e multiespectrais para a classificação do uso do solo urbano por OBIA

ZHANG, K.Q., CHEN, S.C., WHITMAN, D., SHYU, M.L., YAN, J.H., ZHANG, C.C., 2003. A progressive morphological filter for removing nonground measurements from airborne LIDAR data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 41(4), 872-882. doi: 10.1109/TGRS.2003.810682. URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1202973&isnumber=27082

ZHOU, Q.; NEUMANN, U. Complete residential urban area reconstruction from dense aerial LiDAR point clouds. Graphical Models. 75 (2013) 118-125

ZHU, L.; SHIMAMURA, H.; TACHIBANA, K. UPDATING BUILDING MAPS BASED ON OBJECT EXTRACTION AND BUILDING HEIGHT ESTIMATION. In International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2012, vol. XXXIX, September, pp. 371-374.

ANEXO I - Sintaxe de comandos lastools (Isenburg, 2016)

A listagem a seguir é resultado do processamento *lasground* com parâmetros de uma área urbana formal (*city mode*), cujas dimensões de edificações estejam em torno de 25 metros. A primeira linha corresponde aos parâmetros definidos.

```
. reading  points (step 25 m, sub 7, bulge 2.5 m, spike 1+1.5 m, offset 0.05 m )...
. finding initial ground points ...
. generating initial ground estimate ...
. refining ground ...
. adding terrain features ...
. integrating points 0.05 above ground ...
. outputting .... points classified as ground.
. done.
```

No passo 2, ao atribuir a altura para cada ponto, cria-se o modelo normalizado, que possibilita descartar a altitude para considerar os valores Z em relação ao solo, de forma a “economizar” no armazenamento (comando *lasheight*).

```
. reading points to count ground points ... counted  ground points.
. triangulating  ground points ... triangulated points.
. computing heights for points ...
. WARNING: non-ground points had a height below 0
. done.
```

No passo 3 (classificação) por padrão (*default*) o comando *lasclassify* considera somente o último retorno, supondo os anteriores como “não-solo”, de tal forma que para utilizar todos pontos é necessário explicitar a opção “-all_returns”.

```
. reading points (step 2 m, ground offset 2.00 m, planar 0.1, rugged 0.4, sub 5 ...)
. finding buildings and vegetation ...
. discarding small buildings ...
. adding gutter points .... added.
. removing overhanging vegetation points .... removed.
. removing small trees ... removed.
. outputting ... . building points. vegetation points.
. done
```

O exemplo a seguir é a descrição do processamento pelo comando *lasground_new* para a área de Campinas

```
lasground_new -i "c:\Users\silvio\Documents\DR\data\CAMP\LIDAR_02pts_camp\Produt
os\Dados Brutos\LAS\a2agsn.laz" -step 8 -fine -compute_height -odir "c:\Users\si
lvio\Documents\DR\data\CAMP\LIDAR_02pts_camp\Produtos\Dados Brutos\LAS" -o "a2gr
n.laz"
Please note that LAStools is not "free" (see http://lastools.org/LICENSE.txt)
contact 'martin.isenburg@rapidlasso.com' to clarify licensing terms if needed.
processing file 'c:\Users\silvio\Documents\DR\data\CAMP\LIDAR_02pts_camp\Produto
s\Dados Brutos\LAS\a2agsn.laz'.
horizontal units are meter and vertical units are meter. nature mode.
reading 524186 points. step is 8 m, sub is 6, spike is 1+1 m, and offset is 0.05
 m ...
took 1.187 sec. finding initial ground points ...
took 0.969 sec. generating initial ground estimate ...
took 0.062 sec. refining ground ...
took 5.063 sec. integrating points 0.05 above ground ...
took 1.219 sec. outputting ...
took 1.221 sec. 164760 points classified as ground.
done with 'c:\Users\silvio\Documents\DR\data\CAMP\LIDAR_02pts_camp\Produtos\Dado
s Brutos\LAS\a2grn.laz'. total time 9.721 sec.
```

Para a área do Rio de Janeiro os comandos e respectivos parâmetros foram:
lasground_new -i "c:\Users\silvio\Documents\DR\data\RJ\bru13.laz" -step 8 -offset 0.3 -ultra_fine -compute_height -odir "c:\Users\silvio\Documents\DR\data\RJ" -o "bru13grnd.laz"

lasclassify -i "c:\Users\silvio\Documents\DR\data\RJ\bru13grnd.laz" -no_gutters -small_buildings -keep_overhang -odir "c:\Users\silvio\Documents\DR\data\RJ" -o "bru13cla.laz"

A descrição do processamento foi:

```
Please note that LAStools is not "free" (see http://lastools.org/LICENSE.txt)
contact 'martin.isenburg@rapidlasso.com' to clarify licensing terms if needed.
lasview -i "c:\Users\silvio\Documents\DR\data\RJ\11hgt.laz"
lasclassify -v -i "c:\Users\silvio\Documents\DR\data\RJ\11hgt.laz" -ignore_class
 7 -ignore_class 18 -no_gutters -small_buildings -keep_overhang -odir "c:\Users\
silvio\Documents\DR\data\RJ" -o "11clahgt.laz"
Please note that LAStools is not "free" (see http://lastools.org/LICENSE.txt)
contact 'martin.isenburg@rapidlasso.com' to clarify licensing terms if needed.
processing file 'c:\Users\silvio\Documents\DR\data\RJ\11hgt.laz'.
reading 1265300 points. step 2 m, ground offset 2.00 m, planar 0.1, rugged 0.4,
sub 5 ...
took 0.453 sec. finding buildings and vegetation ...
took 9.703 sec. removing small trees ...
took 0.391 sec. removed 19058. outputting ...
took 0.706 sec. 337748 building points. 482893 vegetation points.
done with 'c:\Users\silvio\Documents\DR\data\RJ\11clahgt.laz'. total time 11.268
 sec.
```

lasbondary

lasboundary -i "c:\Users\silvio\Documents\DR\data\RJ\bru13cla.laz" -keep_classification 6 -concavity 2 -holes -disjoint -odir "c:\Users\silvio\Documents\DR\data\RJ" -o "bru13bound2.shp"

Para geração da grade de Declividades o comando las2dem teve os seguintes parâmetros:

las2dem -i "C:\Users\silvio\Documents\DR\data\RJ\13mdt.laz" -step 10 -slope -odir "C:\Users\silvio\Documents\DR\data\RJ" -o "13mdtSlope.jpg" -utm 23M -vertical_wgs84