

Proposição metodológica de extração da altimetria em edificações utilizando dados LIDAR com vista a estudos volumétricos de coeficientes de aproveitamento

Methodological proposal for the extraction of buildings' altimetry and to study volumetric coefficients using LIDAR data

Rodrigo Pinheiro Ribas¹, Ana Clara Mourão Moura², Grazielle Anjos Carvalho³, Bráulio Magalhães Fonseca⁴

Para citar este artículo: Pinheiro-Ribas, R., Mourão-Moura, A.C., Anjos-Carvalho, G. & Magalhães-Fonseca, B. (2015). Proposição metodológica de extração da altimetria em edificações utilizando dados LIDAR com vista a estudos volumétricos de coeficientes de aproveitamento. *UD y la Geomática*, 10, 53-63.

Fecha de recepción: 02 de mayo de 2015

Fecha de aceptación: 26 de noviembre de 2015

RESUMO:

O aperfeiçoamento de instrumentos para o planejamento urbano torna-se cada vez mais importante no contexto das cidades. O Estatuto da Cidade, Lei 10.257 de 2001, configura-se hoje como importante recurso que apresenta novos instrumentos para favorecer a gestão urbana, com vistas a garantir que a propriedade cumpra a sua função social e que as cidades possam se adequar às necessidades ambientais e humanas. Entre esses instrumentos à disposição do gestor urbano, estão a Outorga Onerosa do Direito de Construir (OODC) e a Transferência do Direito de Construir (TDC), que concedem o direito ao proprietário de edificar em patamares maiores que o estabelecido pelo Coeficiente de Aproveitamento (CA). Contudo, a definição das áreas adequadas para receberem essas volumetrias adicionais deve ser muito bem estudada, daí o interesse na aplicação de metodologias de geoprocessamento que favoreçam a caracterização e análise da paisagem volumétrica da cidade. O CA é a relação entre a área edificável total (somadas as áreas de todos os andares) e área do terreno, que define o volume final possível ou o envelope máximo para as edificações. Neste contexto, o sistema de perfilamento a LASER, baseado na tecnologia Light Detection and Ranging (LIDAR) é uma técnica de sensoriamento remoto ativo que tem demonstrado bons resultados em estudos para o cálculo da volumetria de

edificações. Essa ferramenta cria uma grande nuvem de pontos georreferenciados contendo os valores de altitude, o que permite a modelagem tridimensional do terreno e também da superfície. Um Modelo Digital de Superfície (MDS) permite a modelagem das rugosidades existentes sobre a superfície terrestre, tais como edificações, árvores, entre outros. No caso específico do presente estudo, os valores máximos captados no MDS para cada projeção de edificação poderiam não significar exatamente a laje de cobertura ou o telhado de uma edificação, visto que podem ser capturadas informações sobre estruturas tais como antenas, caixas d'água, entre outras, que não configuram um pavimento de ocupação. Observada esta característica dos dados, desenvolvemos uma rotina metodológica que consistiu em: (1) identificar a altura dos pontos LIDAR referentes apenas à projeção no lote dos polígonos das edificações em estudo; (2) fazer a conversão dos dados pontuais de vetor para raster; (3) aplicar um filtro de moda neste raster, para identificação do valor que mais se repete e que corresponde à maior superfície com mais altitude no lote, o que é de fato a laje de cobertura ou a cumeeira e, por fim, (4) o último passo consistiu em capturar os valores de moda do raster para os pontos de localização original do LIDAR. A rotina foi automatizada com a ferramenta Model Builder do software ArcGIS. O processo final foi aplicado em estudo de caso no bairro Castelo de Belo Horizonte, resultando no cálculo da altura de

- 1 Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC Departamento de Geografia, Laboratório de Geoprocessamento – GEOLAB Av. Madre Benvenuta 2007–88.035-001 – Florianópolis –SC, Brasil–ribasgeo@gmail.com
- 2 Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG–Escola de Arquitetura, Laboratório de Geoprocessamento–Rua Paraíba 697 – 31130140 – Belo Horizonte – MG, Brasil–anaclara@ufmg.br
- 3 Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG–Instituto de Geociências–Av. Antônio Carlos, 6627 – 31270-901 – Belo Horizonte – MG, Brasil–grazielleanjoo@gmail.com
- 4 Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG–Instituto de Geociências–Av. Antônio Carlos, 6627 – 31270-901 – Belo Horizonte – MG, Brasil–brauliomagalhaes@gmail.com

cada edificação, utilizada para se representar o envelope ou volume construído. A partir dos valores obtidos foi possível comparar o coeficiente de aproveitamento autorizado por lei versus coeficiente de aproveitamento praticado, permitindo a identificação de áreas prioritárias para preservação, posto que o nível de saturação volumétrico já seja expressivo.

Palavras chaves: Coeficiente de Aproveitamento, LIDAR, Modelagem Paramétrica da Ocupação Territorial

ABSTRACT:

The development of instruments for urban planning is becoming increasingly important in the context of cities. The Statute of the City, Law 10,257 of 2001, configures itself today as important feature that presents new instruments to promote the urban management, aiming to ensure that the property fulfills its social function and that the cities can suit the needs of environmental and human interests. Between these instruments at the disposal of urban manager, are the Onerous Grant of the Right to Build (OODC), and the Transfer of the Right to Build (TDC), which entitles the owner to build at levels higher than the established by the Coefficient of Utilization (CA). However, the definition of appropriate areas to receive these additional volumes should be very well studied, what results in the interest in the application of methodologies of geoprocessing that favor the characterization and analysis of volumetric landscape of the city. The CA is the ratio between the total built area allowed (summed up the areas of all floors) and land area, that defines the final volume possible or the maximum envelope for the buildings. In this context, the system of profiling the LASER technology-based Light Detection and ranging (LIDAR) is a technique of remote sensing active that

has demonstrated good results in studies for the calculation of volumes of buildings. This tool creates a great cloud of georeferenced points containing the values of altitude, which allows the modeling of three-dimensional terrain, not only the ground but also the surface. A Digital Model of Surface (MDS) allows the modeling of existing roughness on the surface of the land, such as buildings, trees, among others. In the specific case of this study, the maximum values captured in MDS for each projection of building might not mean exactly the slab of coverage or the top of the roof of a building, since it's possible to capture information about others structures such as antennas, water tanks, among others, which do not constitute a floor of the building occupation. Observed this characteristic of the data, we developed a methodological routine that consisted of: (1) identify the height of the points LIDAR relating only to the projections of the polygons of the buildings in each lot; (2) to make the conversion of point data of vector to raster; (3) apply a filter of fashion in this raster, for identification of the value that repeats more and which corresponds to the largest higher surface area in the lot, which is in fact the slab of coverage or the ridge and, finally, (4) the last step was to capture the values of majority the raster to the points of original location of LIDAR. The routine was automated using the Model Builder in ArcGIS. The final process was applied in a case study of a Castelo district of Belo Horizonte, resulting in the calculation of the height of each building, used to represent the envelope or volume built. From the values obtained, it was possible to compare the coefficient of utilization authorized by law versus the coefficient of utilization already practiced, for the identification of priority areas for conservation, since the level of volumetric saturation is already considerable.

Keywords: Coefficient of utilization, LIDAR, Parametric Modeling of Territory Occupation

Introdução

O desenvolvimento da presente proposta metodológica é parte integrante das pesquisas realizadas no escopo do projeto Modelagem Paramétrica da Ocupação Territorial (MPOT) do Laboratório de Geoprocessamento da Escola de Arquitetura da UFMG, apoiado pelo CNPq através da chamada MCTI/CNPq/MEC/CAPES, e foi possível através do acesso a dados cedido pela Prefeitura de Belo Horizonte. O projeto em questão tem como objetivo defender novos formatos de elaboração dos projetos de planejamento e gestão urbana, que resultam da evolução nas tecnologias de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) de representação espacial. Neste contexto, a proposição, aplicação e avaliação de novas metodologias para a modelagem da paisagem urbana auxiliam no desenvolvimento da visualização da informação e respectiva extração e validação de parâmetros relacionados ao território urbano.

O sistema de *Laser Scanner*, baseado na tecnologia *Light Detection and Ranging* (LIDAR) é uma técnica de sensoriamento remoto ativo com aplicações recentes no Brasil, e que vem substituindo os levantamentos topográficos tradicionais e as restituições por fotogrametria em algumas situações. Inicialmente as aplicações eram mais direcionadas para a criação do Modelo Digital de Terreno (MDT), porém com a evolução dos equipamentos e dos procedimentos para processamento dos dados, novos produtos foram sendo testados e disponibilizados. Como exemplo, temos a criação de Modelos Digitais de Superfície (MDS), que permitem a modelagem das rugosidades existentes sobre a superfície terrestre, tais como edificações, copas de árvores, entre outros.

A definição de áreas adequadas para o recebimento de novos volumes construtivos, tanto para a autorização de negociação entre particulares como para a negociação através do poder público, requer estudos mais densos e bem justificados. Percebe-se que os dados provenientes da

tecnologia LIDAR têm grande potencial em aplicações que necessitem do mapeamento da realidade volumétrica do território. Buscando viabilizar uma metodologia para extração deste parâmetro, o objetivo do presente estudo e a criação de uma rotina metodológica para o cálculo da altura e, respectivamente, do volume de edificações. Espera-se a partir desta investigação, que seja possível a comparação do coeficiente de aproveitamento autorizado por lei versus o coeficiente de aproveitamento praticado, permitindo assim a identificação de áreas prioritárias para a preservação.

Revisão bibliográfica

A tecnologia LIDAR para a extração de edificações

A tecnologia (LIDAR) se desenvolveu rapidamente no início da década de 1970, especialmente na América do Norte, com experimentos realizados para aplicações em batimetria e hidrografia. O sistema era operado em modo *profile* ou perfil, obtendo um perfil do terreno, extraindo informações sobre as características verticais das estruturas. A partir deste sistema, no início da década de 1990, começou a ser desenvolvido o equipamento do tipo *scanner* (Holmgren 2003). Os equipamentos com tecnologia LIDAR podem ser estáticos ou dinâmicos (Dalmolin 2004). Os sistemas dinâmicos são instalados em plataformas aerotransportadas, geralmente pequenos aviões ou helicópteros, sendo, por este motivo, citados na literatura como sistema *Airborne Laser Scanner* (ALS) e foi a partir deste sistema que se obteve os dados para esta pesquisa.

A capacidade de prover uma grande malha de pontos com o valor de altitude Z sobre a superfície superior das edificações é um fator relevante, e com grande potencial para permitir a modelagem do volume de tais edificações. Uma forma de se realizar uma modelagem volumétrica mais eficiente é por meio da utilização da planta das edificações, visto que elas informam o contorno poligonal das edificações, revelando assim informações mais precisas sobre a estrutura das edificações (Haala & Brenner 1999). Em situações onde não existe esta informação cadastral das edificações, esta informação deve ser extraída por procedimentos de modelagem específicos (Demir et al. 2008).

Em estudo visando a identificação de edificações com auxílio de dados LIDAR, Lemmens et al. (1997) extraíram os contornos das edificações a partir de um mapa de cadastro de edificações e combinaram com a altimetria proveniente dos dados LIDAR. Nesta situação a laje de cobertura de uma determinada edificação possuirá pontos tridimensionais captados de estruturas como antenas, caixas d'água, entre outros, e que não configurariam a laje de um pavimento. Para contornar essa situação, tornando a detecção desta informação mais eficiente, alguns procedimentos podem ser aplicados (Haala & Brenner 1999, Vosselman & Dijkman 2001, Vosselman 2002).

O Coeficiente de Aproveitamento (CA) e suas alterações através da Outorga Onerosa do Direito de Construir (OODC) e da Transferência do Direito de Construir (TDC)

Estudos anteriores na definição de áreas ótimas para implantação de coeficientes adicionais, ou mesmo estudos destinados ao estabelecimento de coeficientes de ocupação em tabelas de parâmetros urbanísticos presentes em Zoneamentos de Planos Diretores, seguem lógica de cálculos apenas numéricos, cujas respostas são apresentadas em tabelas. Assim, para o usuário leigo, a compreensão do que significa um coeficiente é bastante difícil. Mesmo para os técnicos que lidam com o tema, a percepção da paisagem tridimensional que se pode produzir a partir da aplicação de um coeficiente é muito limitada. Muitos são surpreendidos por paisagens urbanas autorizadas por lei, mas que resultam em significativa volumetria, redução dos índices de insolação no território urbano e fechamento de eixos de visada. Isto porque a questão da terceira dimensão não é contemplada.

O coeficiente de aproveitamento é responsável pelo volume final construído em uma região do espaço urbano, e sua percepção mais clara é na altura das edificações construídas. O princípio de controlar a volumetria e a altura nas transformações urbanas nasceu com o interesse do princípio do solo criado, que foi um princípio que começou a ser discutido no Brasil na década de 70, e segundo Grau (1983), o primeiro documento brasileiro que trata do Solo Criado foi a Carta do Embu, publicado em 1976, que preconizou a aplicação de um único Coeficiente de Aproveitamento para todo o solo urbano, adensando áreas específicas através da aplicação do Solo Criado. Assim, desde aquela época, a ideia já era possibilitar a correção das distorções de apropriação desigual do solo urbano, gerenciando as autorizações de ampliação de estoques construtivos. Contudo, ele se tornou mais conhecido pela aplicação que resultou em impactos bastante positivos na proteção do patrimônio histórico e cultural em alguns municípios, pois foi empregado para incentivar que proprietários de edificações de interesse cultural as mantivessem, vendendo o direito de verticalização associado ao lote para que fosse utilizado em outro lote. Com este princípio, em muitas situações a atração exercida pelo mercado imobiliário em derrubar antigos imóveis para a construção de novos prédios foi controlada, pois os proprietários tinham seus "direitos" de ganho de capital com o imóvel garantido, ao passo que garantiam a permanência do patrimônio cultural do município.

Anos depois, a lógica do solo criado, que é a de autorização de construção de volumes acima do previsto para um determinado zoneamento pelo Plano Diretor, com vistas a algum ganho para a comunidade, é revista através do Estatuto da Cidade. Na referida Lei nº 10.257/2001, a lógica do solo criado é desdobrada em dois princípios: através do TDC (Transferência do Direito de Construir) e da OODC (Outorga Onerosa do Direito de Construir). No TDC a

negociação de implantação de volumes extras, além dos previstos pelo zoneamento para um lote, é realizada entre particulares, ou seja, o proprietário de um lote vende o seu direito volumétrico para outro proprietário, para que o volume seja utilizado em outro lote, em geral quando há interesse em incremento da verticalização para viabilização ou incremento financeiro de um empreendimento. Na Outorga Onerosa do Direito de Construir o direito de incremento da verticalização e volumetria é vendido pelo poder público, pela Prefeitura Municipal, com vistas a gerar recursos para atividades relacionadas às edificações de interesse social. A venda de coeficientes pelo poder público se baseia no princípio de que a propriedade deve cumprir a sua função social, o que justifica a definição de um coeficiente básico autorizado, acima do qual os acréscimos devem ser pagos, como forma de recuperação das valorizações fundiárias geradas pela infraestrutura implantada com recursos públicos.

à ocupação do local, era comum a doação de materiais de construção. Isto porque o parcelamento das fazendas da região se deu em lotes de 360m², e que portanto podiam ser comprados pela população de menor poder aquisitivo.

O processo de especulação imobiliária sempre esteve presente no bairro Castelo, uma vez que muitos lotes foram comprados antes mesmo que toda a infraestrutura do parcelamento estivesse pronta, em 1970. Verificou-se, por toda a década de 1980 a existência de muitos lotes vazios, à espera da valorização para serem revendidos, o que ocorreu a partir dos anos 1996, com a alteração do zoneamento, permitindo a construção de prédios residenciais de até 3 andares. As áreas comerciais e de serviços foram concentradas ao longo de suas vias principais como a rua Romualdo Lopez Cansado e avenidas Miguel Perrela, Altamiro Avelino Soares e Tancredo Neves. No ano 2000, o bairro Castelo era classificado na lei de Uso do solo como Zona de Adensamento Preferencial (ZAP—abrangendo: áreas com condições favoráveis de Acessibilidade, topografia e a disponibilidade de infraestrutura), mas já no ano 2010, houve uma nova alteração na Lei, passando este para a Zona de Adensamento Restrito – 2 (ZAR2—condições precárias de infraestrutura e/ou topográficas ou de articulação viária. Ainda na região, o Parque Ursulina de Andrade Mello, implantado em 1996 e com aproximadamente 312 mil metros quadrados, continuou como Zona de Proteção Ambiental (ZPAM—com controle de densidade mais rigoroso, abrangendo: regiões destinadas à preservação e à recuperação de ecossistemas).

Metodologia

Área de estudo

O bairro Castelo, localizado na região da Pampulha, surgiu na década de 1970, a partir do loteamento da Fazenda da Serra, cuja extensão ocupava os bairros Ouro Preto e Castelo (Figura 1). Sua ocupação foi bastante lenta, já que no início só era permitido a construção de casas unifamiliares de no máximo 2 pavimentos. Neste período, como incentivo

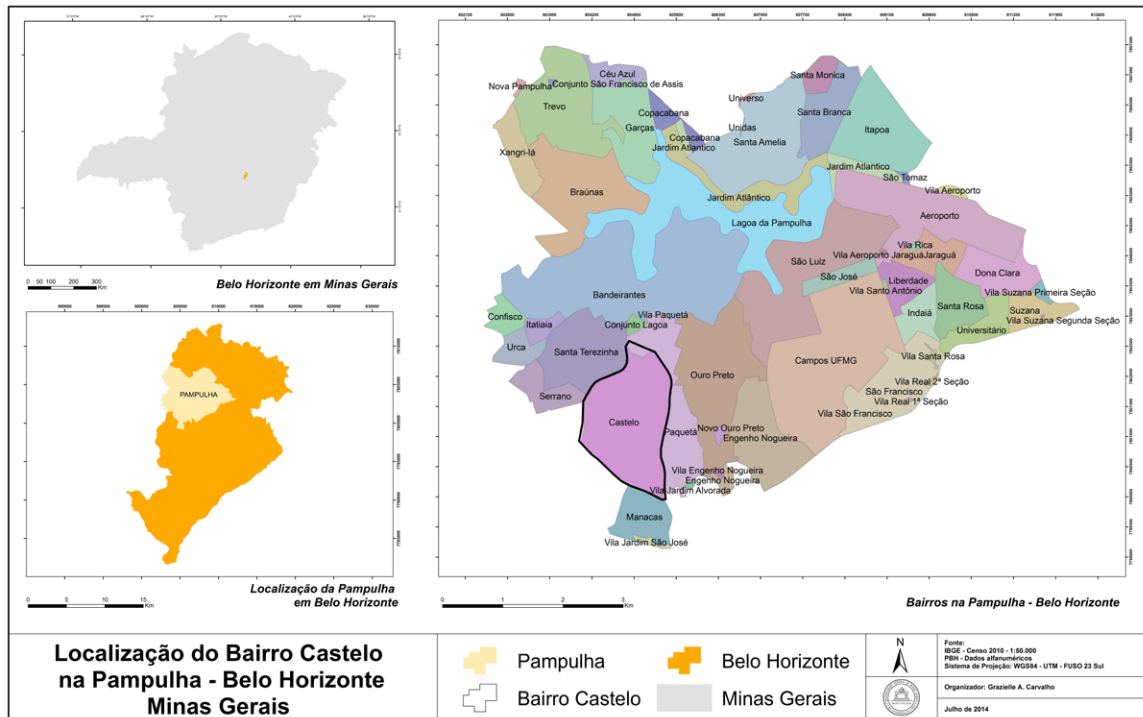


Figura 1: Localização da área de estudo

Como o Zoneamento do Bairro Castelo (Figura 2), por quase 15 anos, favoreceu o adensamento na região, configurando-se como uma zona de adensamento preferencial,

verificou-se junto à prefeitura de Belo Horizonte inúmeros projetos de alteração na área construtiva dos lotes (Figura 3), uma vez que este bairro abrangia áreas com

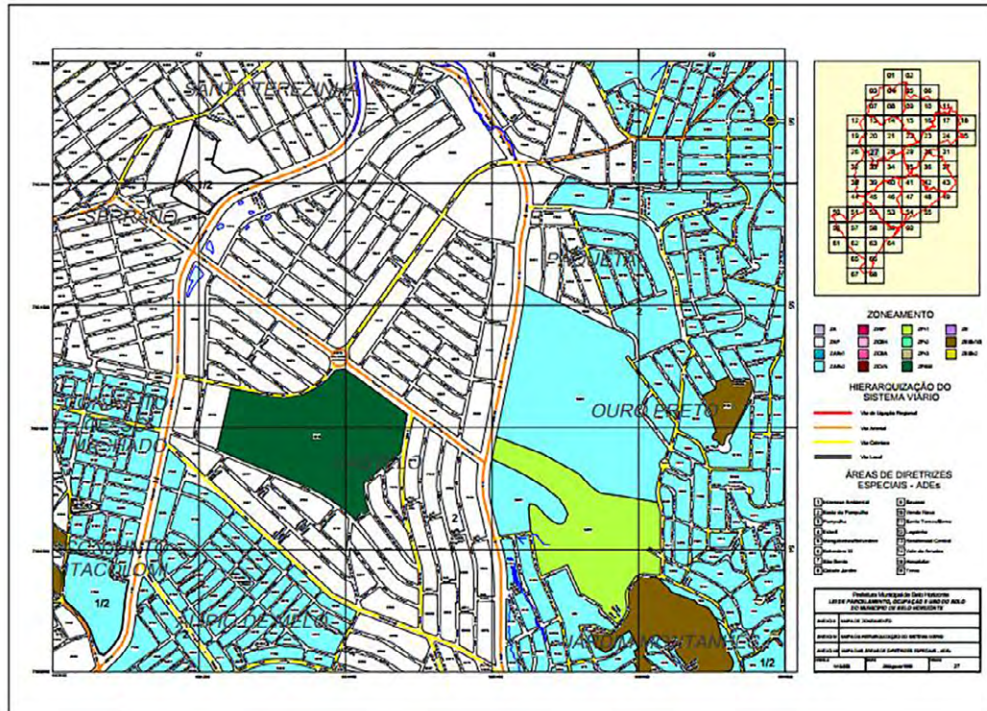


Figura 2: Zoneamento do Solo – Castelo – ano 1996

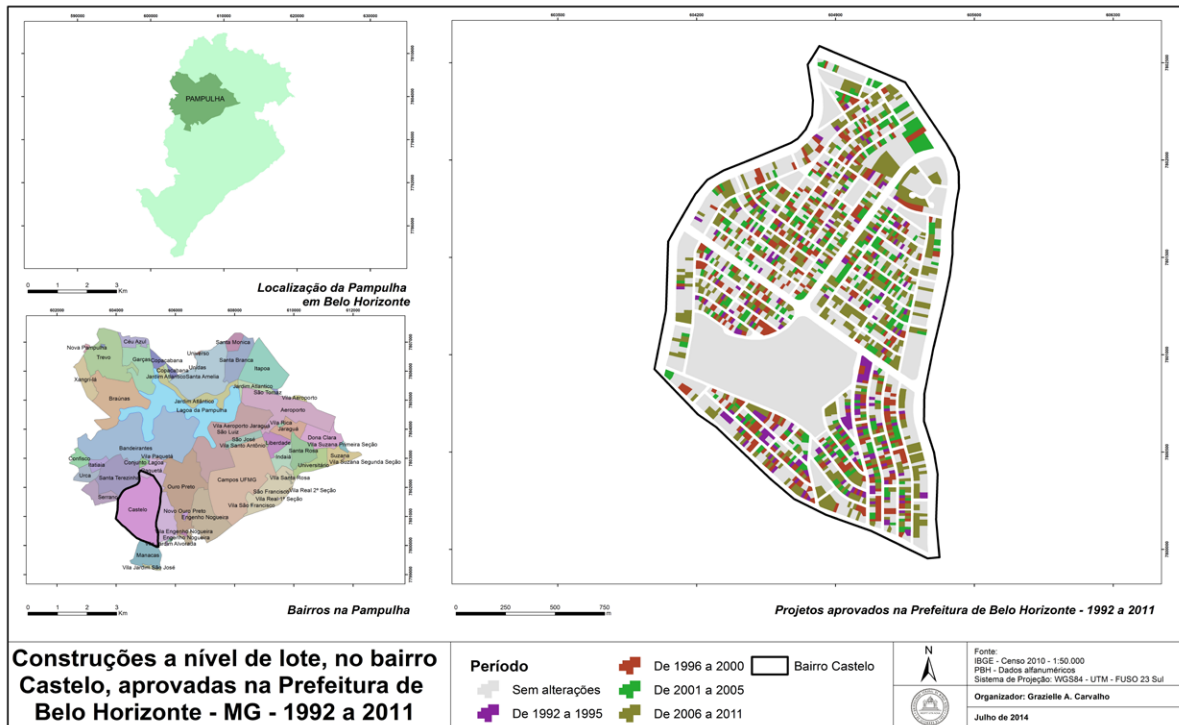


Figura 3: Projetos aprovados pela Prefeitura de BH, permitindo alterações na área construída dos lotes no período de 1992 a 2011 dentro do bairro Castelo

condições favoráveis de acessibilidade, topografia e a disponibilidade de infraestrutura. Assim, por todo o bairro Castelo houve projetos aprovados permitindo este adensamento. Entretanto, este se deu de forma tão intensa nos últimos 15 anos que na Lei de Uso do Solo de 2010, houve a necessidade de alterar o zoneamento da região, passando para Zona de Adensamento Restrito – 2 (Figura 4), uma vez que atualmente as áreas ainda disponíveis no Bairro Castelo apresentam condições precárias de infraestrutura e/ou topográficas ou de articulação viária.

Tabela 1. Parâmetros de aquisição dos dados LIDAR

Ângulo de abertura (FOV)	20°
Altura de voo	2388,1 metros
Largura da faixa	1688,1 metros
Superposição lateral (entre faixas)	36,4 %
Número de faixas	76
Direção do voo	variada
Densidade de pontos (média)	1,5 / m ²

Dados LIDAR

Os dados LIDAR utilizados nesta pesquisa foram cedidos pela Empresa de Informática e Informação do Município de Belo Horizonte (PRODABEL) e fazem parte de um levantamento a LASER contratado pela Prefeitura Municipal de Belo Horizonte (PMBH) e executado pela Empresa Esteio Engenharia e Aerolevantamentos S.A. O levantamento realizado com o sistema ALS foi planejado para abranger toda a área do município de Belo Horizonte, mais uma faixa adicional de 200 m pertencente aos municípios circunvizinhos, totalizando uma área aproximada de 360 Km². O voo para aquisição da nuvem de pontos com a tecnologia LIDAR foi realizado com base nos parâmetros apresentados na Tabela 1.

A aquisição e tratamentos iniciais dos dados obtidos com a tecnologia LIDAR consistiram de duas etapas, sendo elas: (1) Pré- processamento dos dados brutos e (2) Processamento dos dados LIDAR.

Pré-Processamento dos dados brutos

Na fase de pré- processamento dos dados brutos as observações do GPS da estação base e da aeronave inicialmente são processadas de forma individual e posteriormente concatenadas de modo a se obter uma solução cinemática única e ajustada a um sistema de coordenadas conhecido, para isto foi utilizado o módulo de processamento GPS do programa GRAFNAV. A solução GPS obtida foi combinada com os dados do sistema inercial no programa IPAS de modo a

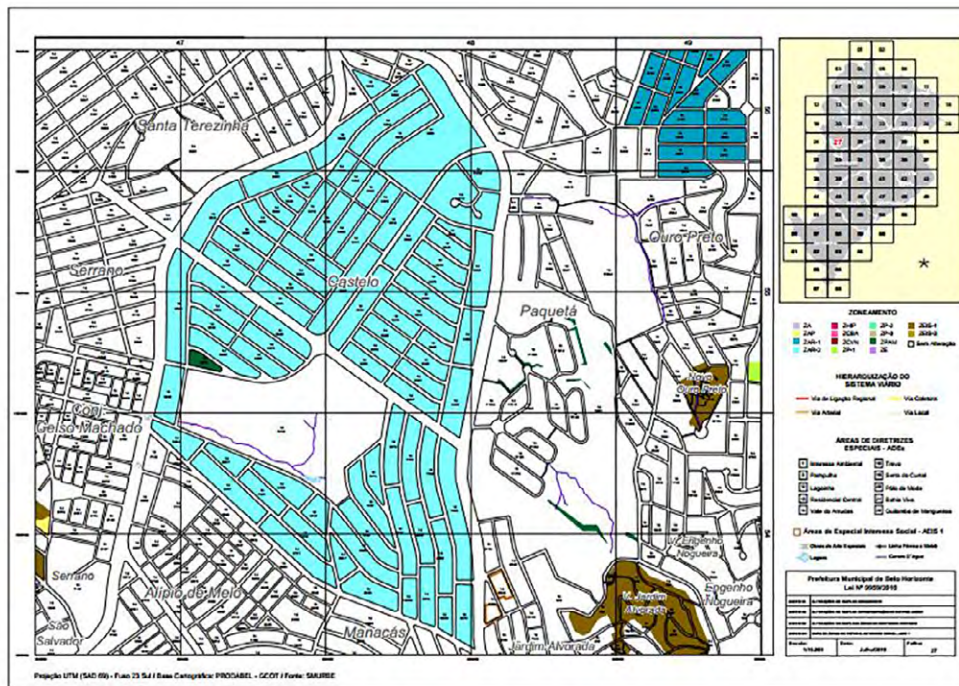


Figura 4: Zoneamento do Solo – Castelo – ano 2010

gerar a melhor trajetória suavizada, iniciando-se então o processamento para obtenção da nuvem de pontos com as coordenadas UTM e altitude (X,Y,Z) para cada um dos pontos criados pelo LIDAR. Para esta finalidade utilizou-se o programa *ALS40 Post Processor*, que aplica parâmetros de calibração do equipamento, dados relativos ao tipo de terreno e cobertura vegetal, temperatura e pressão atmosférica e configurações do scanner (ângulo de varredura, frequência de varredura e taxa de repetição) visando à obtenção de pontos com precisão compatível com o levantamento GPS e em um sistema de coordenadas conhecido.

Processamento dados LIDAR

A segunda etapa da fase de processamento (2) é a fase de processamento dos dados LIDAR na qual se realiza a classificação dos pontos para a geração do MDT. A nuvem de pontos georreferenciados criada pela tecnologia LIDAR forma o MDS e a partir da filtragem desta nuvem de pontos é possível a criação do MDT. A nuvem de pontos gerada pelo sistema ALS disponibilizada para este estudo foi filtrada utilizando o *software TERRASCAN*. Segundo Soininen (1999) o *TERRASCAN* é um *software* desenvolvido pela *Terrasolid Limited*, dedicado ao processamento de pontos com coordenadas tridimensionais gerados por sistemas de *laserscanner*, que pode lidar com milhões de pontos em diversas rotinas otimizadas para um bom desempenho. O *TERRASCAN* é um aplicativo componente do *MICROSTATION*, ambiente *Computer-aided Design* (CAD), capaz de ler pontos em arquivos de texto do tipo XYZ e arquivos binários. O programa possui a ferramenta (*classify – routine – ground*) que realiza uma filtragem automática na nuvem de pontos laser gerados pelo LIDAR. Segundo Loch et al. (2004) o processo de filtragem se

desenvolve em duas etapas: (1) A ferramenta pesquisa os pontos com cotas mais baixas e constrói uma grade do tipo *Triangular Irregular Network* (TIN). Na maioria das vezes os triângulos deste modelo inicial, têm os lados mais baixos que a superfície terrestre, com poucos vértices tocando o terreno e essas irregularidades são removidas pelo programa, na próxima fase (2) o programa inicia a modelagem da superfície do terreno, adicionando mais pontos ao modelo tornando-o cada vez mais próximo do formato real do terreno. Os pontos que são adicionados no modelo são definidos por parâmetros de iteração, a saber: ângulos e distâncias. Esses parâmetros determinam quão próximos os pontos devem estar do plano de um triângulo para que possam ser aceitos no modelo construído.

Rotina para extração de altimetria de edificações

A rotina metodológica foi realizada com o apoio do *software ArcGIS* e do seu módulo para modelagem e automação de procedimentos *Model Builder* (Figura 5). A rotina criada consistiu de 5 grandes etapas.

1ª etapa: Inicialmente foi necessário realizar a conversão do arquivo nativo. LAS criado pela tecnologia LIDAR para pontos com atributo Z em formato *Shapefile*. Para isso foi utilizado o módulo *3D Analyst* com o comando *LAS to Multipoint*. Após a conversão para Multiponto, no módulo *Data Management Tools*, realizamos a conversão de dos multipontos criados para pontos únicos, por meio do comando *Multipart to Singlepart*. Por fim, novamente retornamos ao módulo *3D Analyst* e atribuímos o valor com a altitude de Z ao ponto vetorial por meio do comando *3D Features–Add Z Information*.

2ª etapa: Estando agora os pontos vetoriais em formato *Shapefile*, o próximo passo foi identificar a altura dos

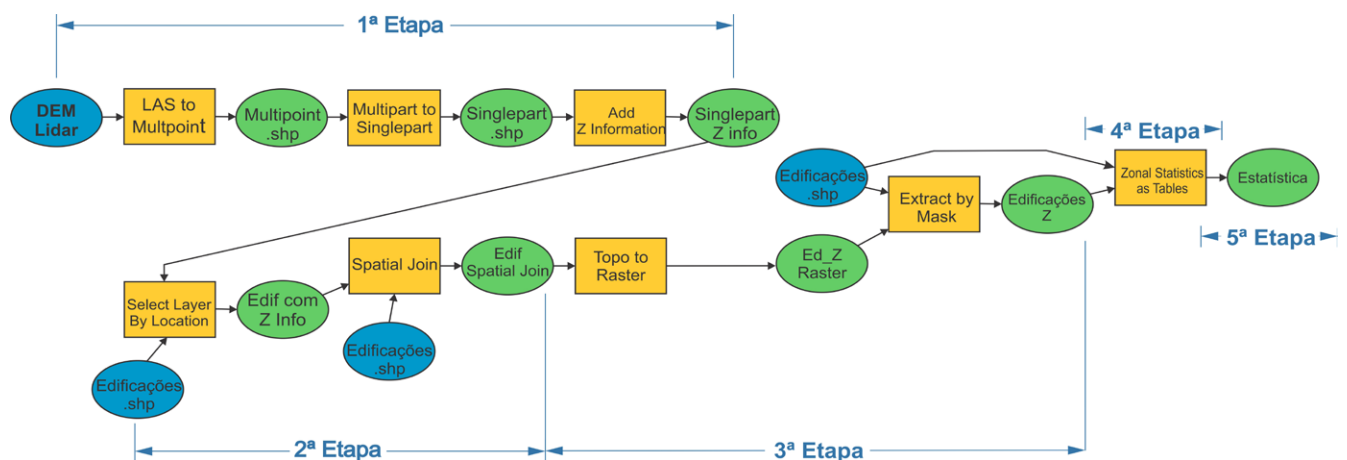


Figura 5: Model Builder–repetição dos procedimentos em muitas faixas de dados

pontos referentes apenas à projeção no lote dos polígonos das edificações em estudo. Para realizar esta etapa, inicialmente foi utilizada a ferramenta *Selection by Location* para selecionar todos os pontos inseridos dentro dos limites poligonais das edificações (Figura 6) e posteriormente foi utilizada a ferramenta *Join by Location* para capturar o Identificador (ID) das edificações em cada ponto LIDAR.

3ª Etapa: Esta etapa consistiu em realizar a conversão dos dados pontuais de vetor para *raster*. Primeiramente foi utilizada a ferramenta *Topo to Raster* do Módulo *3D Analyst* do ArcGIS para converter os pontos vetoriais do LIDAR para *raster*. Num segundo momento foi realizado o recorte do *raster* gerado pelos polígonos das edificações, criando-se assim uma imagem *raster* das edificações (Figura 7). É importante ressaltar que trabalhamos com imagens *raster* em formato *Integer*, sem casas decimais, para que fosse possível a obtenção das estatísticas na próxima etapa.

4ª Etapa: Nesta etapa foi utilizado o comando *Zonal Statistics* para o cálculo de estatísticas relacionadas às edificações. Existem duas formas de se gerar estas estatísticas, em formato *raster*, criando-se camadas *raster* com cada estatística em separado, ou utilizando o comando *Zonal Statistics as a Table*, que cria uma tabela com todos os

valores estatísticos requeridos. As estatísticas que nos interessaram neste estudo foram a Moda, a Variação de Altitude e as menores cotas no terreno (*Majority e Range*) (Figura 8). No caso específico do presente estudo, os valores máximos captados no MDS para cada projeção de edificação poderiam não significar exatamente a laje de cobertura ou o telhado de uma edificação, visto que podem ser capturadas informações sobre estruturas tais como antenas, caixas d'água, entre outras, que não configuram um pavimento de ocupação. A Moda significa o valor que mais se repete, correspondendo à maior superfície de maior altitude no lote, o que é a laje de cobertura ou a cumeeira. A diferença entre os menores altimétricos encontrados na projeção das edificações e o valor de moda resulta no valor da diferença altimétrica ou de altura da edificação.

5ª Etapa: Esta etapa consistiu em capturar os valores estatísticos (Moda / Range / Mínimos) para os polígonos das edificações. Para isso foi criado um centroide para cada edificação e a seguir, utilizando o comando *Extract values to point*, o valor estatístico foi capturado para este centroide. O próximo passo a utilização do comando *Join by Location* para a atribuição destes valores no arquivo vetorial de polígonos das edificações.

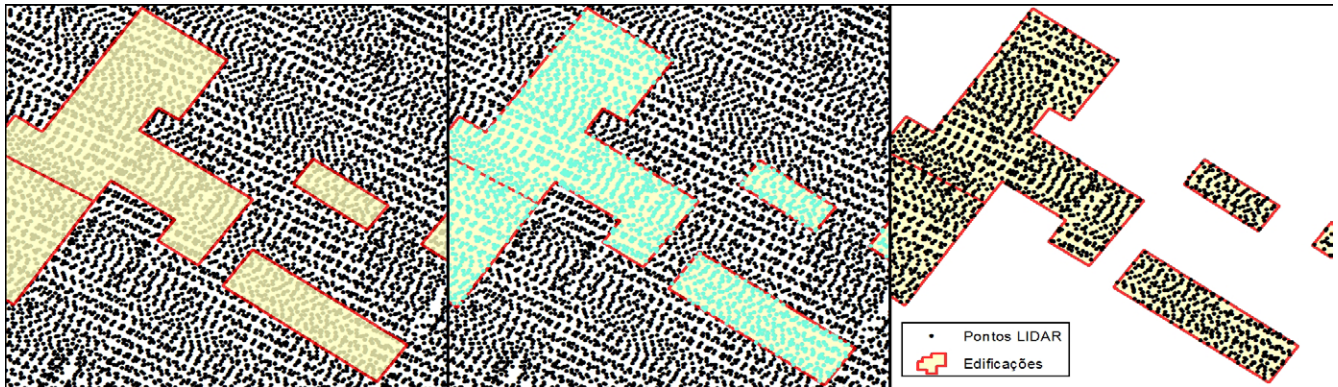


Figura 6: Recorte de pontos selecionados dentro dos polígonos das edificações

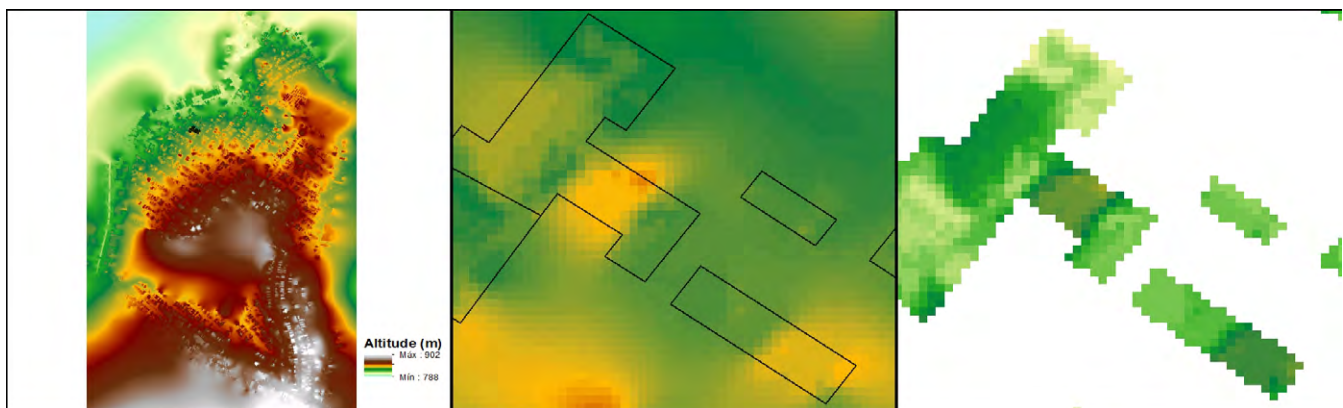


Figura 7: Conversão do formato vetorial para raster e extração do raster de cada edificação



Figura 8: Estatísticas de Moda e Variação de Altitude

Resultados e discussões

Uma vez obtidos os valores das alturas das edificações por meio da tecnologia LIDAR e tendo recebido a camada de projeção das edificações cedida pela Prefeitura de Belo Horizonte, foi possível realizar a modelagem tridimensional dos envoltórios construídos. A representação tridimensional favoreceu a compreensão da realidade da paisagem

volumétrica hoje praticada, como pode ser observado em um trecho da área-piloto (Figura 9).

A partir desta primeira simulação, cujo objetivo foi representar o existente, foi simulada a paisagem possível, caso fossem aplicados em todos os lotes o coeficiente autorizado pelo zoneamento, que é o Coeficiente Básico 1. Isto significa que os lotes nesta região têm, segundo o plano diretor em vigência, o direito de construção volumétrica, somadas as áreas



Figura 9: Representação tridimensional dos envelopes dos volumes construídos.

de todos os andares, de área total equivalente à área do lote. Para citar um exemplo, se o lote tem área de 360 metros quadrados, e coeficiente de aproveitamento 1, tendo escolhido a área de projeção (em função da taxa de ocupação) de 180 metros quadrados, ele pode ter dois andares, pois a soma das áreas resultará em 360 metros quadrados. No mesmo lote, se a escolha for por área de projeção de 90 metros quadrados por andar, para atingir o coeficiente 1 (100%), são possíveis 4 andares, respeitados possíveis controles de altura máxima.

Então, com vistas a promover a visualização do volume construído existente em comparação com o volume possível segundo o coeficiente 1, foi organizada a representação tridimensional das duas condições, e realizados os cálculos de estoques volumétricos, a partir da diferenciação entre o praticado e o autorizado (Figura 10). O objetivo é a comparação de onde há estoques e onde há já total utilização do estoque, muitas vezes em volumes bem maiores que os esperados.

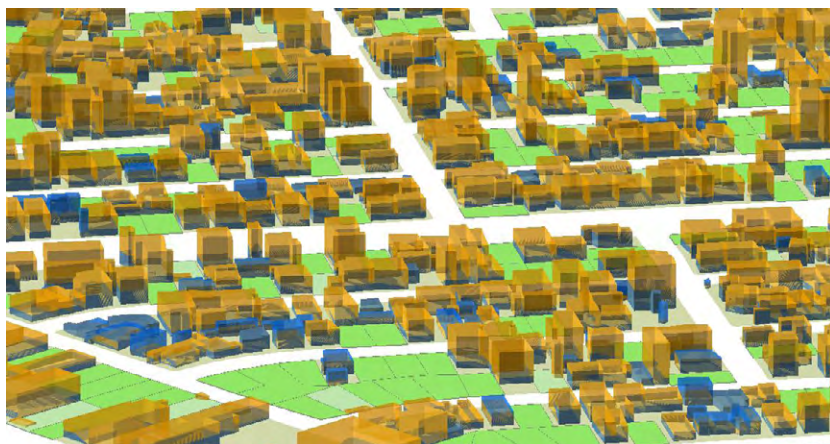


Figura 10: Em laranja os volumes praticados e em azul os volumes autorizados.

Conclusão

A Modelagem Paramétrica da Ocupação Territorial é uma investigação que visa aplicar os recursos da geotecnologia para se ampliar as condições de visualização, análise e gestão das proposições de transformação da paisagem ambiental e urbana. Ela é caracterizada como modelagem porque explora representações da realidade por modelos matemáticos tridimensionais, cujo objetivo é favorecer a melhor visualização do território antropizado, sobretudo o território urbano. Por ser um modelo, é uma simplificação da realidade através de suas variáveis principais, que respondem pela essência dos principais valores que a caracterizam. Uma vez identificadas as variáveis principais, é possível construir análises diagnósticas e prognósticas.

A modelagem é parametrizada porque elabora representações através dos principais parâmetros matemáticos que são propostos como envelopes máximos ou capacidades máximas que devem ser empregadas em um território. A investigação dos parâmetros resulta avaliação das referências existentes hoje para a construção da paisagem antrópica, sobretudo a urbana, e em decodificação de seu significado seguida de investimento em visualização, de modo a favorecer que diferentes grupos de usuários compreendam os resultados possíveis em uma paisagem urbana a partir

da aplicação de um conjunto de parâmetros. Parametrizar a paisagem urbana significa encontrar os limites máximos aceitáveis para que as expressões individuais, em cada lote, respeitem o que seria a parcela autorizada pela sociedade para o seu uso, tendo em vista o resultado conjunto das individualidades na paisagem urbana.

O trabalho aqui proposto, por se basear em metodologia de aproveitamento e uso de dados de captura da informação tridimensional da paisagem urbana, favorece condições para que se tenha um retrato mais fiel da realidade praticada no espaço urbano, com vistas a se comparar o estoque volumétrico já praticado com os limites volumétricos propostos pelas normativas. Esta representação tridimensional significa investimento em visualização, na expectativa que os cidadãos compreendam as tabelas propostas nos planos urbanos de modo absoluto, por números, ampliando suas condições de entendimento para representação relativa, no espaço. Desta forma, o princípio é formador de massa crítica. Massa crítica que pode, no futuro, ser mais responsável pela escolha de sua paisagem coletiva, pela proposição de novos valores aceitáveis e até de novos parâmetros urbanísticos. A expectativa é criar condições para se atuar dentro do princípio preconizado por Ian Gehl (2010): *"First, we shape the cities – then they shape us"*.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Prefeitura de Belo Horizonte pelo amplo acesso às informações, cedidas mediante acordo do GGIU – Grupo de Gestão da Informação Urbana. Os autores da publicação agradecem ao CNPq o apoio através do projeto “Modelagem Paramétrica da Ocupação Territorial: proposição de novos recursos das geotecnologias para representar e planejar o território urbano”, Processo 405664/2013-3, Chamada MCTI/CNPq/MEC/CAPES Nº 43/2013. Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Geografia do Instituto de Geociências da UFMG, pelo apoio financeiro à participação no evento.

Referências bibliográficas

- Brasil. Lei federal nº 10.257. 10 de jul. De (2001). Regulamenta os arts. 182 e 183 da CF e estabelece diretrizes gerais da política urbana e dá outras providências.
- Dalmolin, Q., Santos, D.R. (2004). Sistema *laserscanner*: conceitos e princípios de funcionamento. Curitiba: editora do curso de pós graduação em ciências geodésicas. UFPR.
- Gehl, Jan. (2010). *Cities for people*. Washington, d.c., island press.
- Grau, E.R. (1983). *Direito urbano: regiões metropolitanas, solo criado, zoneamento e controle ambiental*. São paulo: editora revista dos tribunais,
- Haala, N., Brenner, C. (1999). Extraction of buildings and trees in urban environments. *Isprs journal of photogrammetry and remote sensing*, v.54, p. 130-137.
- Holmgren, J. (1999). Estimation of forest variables using airborne laser scanning. Tese Phd, acta universitatis. *Agriculturae sueciae, silvestria*, 278.umeå, suécia, 2003.
- Hyypä, J., Inkinen, m. Detecting and estimating attributes for single trees using laser scanner. *The photogrammetric journal of finland*, v. 16, p. 27-42.
- Lemmens, M.; Deijkers, H.; Looman, P. (1997). Building detection by fusing airborne laser-altimeter dems and 2d digital maps. *International archives of photogrammetry and remote sensing*, v. 32/3-4w2, p. 29–42.
- Loch, R.E.N., Schäfer, A.G.; Vargas, R.M.A. (2004). Filtragem e classificação de pontos laser scanner utilizando o software Terrascan. In: *geodésia online*. Anais, Florianópolis.
- Soininen, A. (1999). *Terrascan for microstation, user’s guide*. Helsinki: Terrasolid.
- Vosselman, G., Dijkman, .S. (2001). 3d building model reconstruction from point clouds and ground plans. *lapsris–international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information science*, annapolis, maryland, v. 32/3-w4, p. 37–43,
- Vosselman, G. (1999). Building reconstruction using planar faces in very high density height data. *International archives of photogrammetry and remote sensing*, munich, germany, v. 32/3- 2w5, p. 87–92.
- Vosselman, g. (2002). Fusion of laser scanning data, maps, and aerial photographs for building reconstruction. In: *International geoscience and remote sensing symposium*. Toronto, Canadá. 6 p.

