

Revista Brasileira de Cartografia (2015), Nº 67/8 Edição Especial XXVI CBC
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento
Remoto
ISSN: 1808-0936



CERTIFICADO DE POTENCIAL ADICIONAL DE CONSTRUÇÃO A PARTIR DE DADOS LIDAR E PARAMETRIZAÇÃO NO CITYENGINE

*Certificate of Additional Construction Potential from LiDAR Data and CityEngine
Parametrization*

**Adolfo Lino de Araújo¹, Francisco Henrique de Oliveira²
André Luis da Silva Bertoncini² & Pedro Savas Sena²**

¹Instituto Federal de Santa Catarina – UFSC
Campus Florianópolis / Departamento Acadêmico de Construção Civil - DACC
Av. Mauro Ramos, 950, Centro, Florianópolis-SC, 88020-300, Brasil
adolfo.lino@ifsc.edu.br

²Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC
Centro de Ciências Humanas e da Educação – FAED / Laboratório de Geoprocessamento – GEOLAB
Av. Madre Benvenuta, 2007, Itacorubi, Florianópolis-SC, 88035-001, Brasil
chicoliver@yahoo.com.br, andre.sbertoncini@gmail.com, pedro_ssena@hotmail.com

Recebido em 20 de Outubro, 2014/ Aceito em 10 de Agosto, 2015
Received on October 20, 2014/ Accepted on August 10, 2015

RESUMO

O presente trabalho apresenta uma proposta metodológica para avaliar o potencial adicional de construção urbana a partir de dados LiDAR e uso de parametrização de objetos tridimensionais. O objetivo da pesquisa foi quantificar o valor do potencial de construção do espaço não construído com fins de lançamento de CEPAC (Certificados de Potencial Adicional de Construção), a partir da modelagem com o software CityEngine e a utilização de dados aéreos de perfilamento a laser (LiDAR). A área de estudo está localizada em Joinville-SC, de onde foram recolhidos os dados e os parâmetros urbanísticos definidos por legislação específica em nível federal e municipal para caracterizar o potencial adicional de construção.

Palavras-chave: CEPAC, LiDAR, CityEngine.

ABSTRACT

This paper presents the results of a methodology to evaluate the additional potential of urban construction using LiDAR data and tridimensional objects parametrization. The objective of the research was to quantify the potential value of building space not built aiming to launch CEPACs (Certificates of Additional Construction Potential), from modeling with CityEngine software and the use of LiDAR. The studied area is located in Joinville-SC, where the data and the urban parameters were defined by specific legislation at the federal and municipal levels to characterize the potential additional construction were collected.

Keywords: CEPAC, LiDAR, CityEngine.



Fig 2 - Delimitação da área de interesse no Centro de Joinville (ZC1).

LiDAR e o limites das edificações (footprints) foram utilizados para gerar o espaço construído tridimensional. A planta genérica de valores foi utilizada com o objetivo de determinar a valoração dos imóveis no ano de 2012. Já os lotes, foram utilizados para determinar a área não construída. O conjunto de dados supracitados permitiu executar a comparação da situação urbanística atual da área de estudo com cenários simulados por meio do relaxamento de parâmetros urbanísticos.

2.1.1 Cobertura por varredura a laser

Realizada no ano de 2007 pela empresa Aeroimagem teve como objetivo o recobrimento de toda a área urbana de Joinville. O produto final teve custo aproximado de 9 milhões de Reais com financiamento pelo PNAFM/BID. A densidade aproximada da amostragem realizada pela plataforma foi de 4pt/m². Na geração deste produto foi utilizado uma plataforma de varredura a laser de pulso único, o que significa que cada pulso emitido foi percebido uma única vez pelo sensor. Tal característica acabou por trazer alguns inconvenientes, que serão apresentados um pouco mais adiante. Os subprodutos gerados incluíram um Modelo Digital de Terreno e de Superfície, arquivos vetoriais com curvas de

nível espaçadas de 20cm e grade de pontos com espaçamento de 2m. Através de convênio existente entre a Universidade do Estado de Santa Catarina e a Prefeitura Municipal de Joinville foi possível o repasse dos dados da cobertura a laser da área de estudo deste projeto. Os dados brutos da varredura a laser foram repassados na forma de arquivos tipo ASCII com extensão .ALL.

2.1.2 Recobrimento aerofotogramétrico

Realizado no ano de 2007, também pela empresa Aeroimagem, teve como objetivo o recobrimento aerofotogramétrico da área urbana da cidade e geração de ortofotos digitais e restituição de lotes e edificações. A resolução espacial das ortofotos resultantes do recobrimento aerofotogramétrico era de 0,39m. Este produto deu origem à restituição e geração dos arquivos vetoriais tipo shapefile de lotes e edificações que foram utilizados na pesquisa que também foram repassados pela Prefeitura Municipal de Joinville via convênio.

2.1.3 Plana genérica de valores

Gerada no ano de 2012, disponibilizada no site da Prefeitura Municipal de Joinville.

3. DADOS DE VARREDURA A LASER PARA CONSTRUÇÃO DE CENÁRIOS URBANOS

O laser é a abreviatura da expressão em língua inglesa para Light Amplification by Stimulated Emission of Radiance (ampliação da luz através da emissão estimulada de radiação). Na geração de dados geoespaciais, especialmente na execução de modelos digitais de terreno e superfície, o emprego do laser é feito pelo uso da técnica conhecida como LiDAR (Light Detection And Ranging) ou detecção e medição de distância através de luz (CENTENO et al., 2007).

Para a determinação de pontos tridimensionais, não há apenas a tecnologia de varredura a laser, mas uma variedade enorme de técnicas de levantamento, que podem se caracterizar pela escala em que podem ser usadas (o que é relacionado ao tamanho do objeto que poderia ser usado para medir), e sobre o número de medidas que poderão ser necessárias para a aquisição (o que está relacionado à complexidade do objeto).

Levantamentos manuais podem fornecer dimensões e posicionamento num raio de poucos metros, o que se torna impraticável para áreas maiores; e, na coleta de muitas medidas (por exemplo, 1.000 ou mais) seria muito trabalhoso e, conseqüentemente, um processo pouco atraente. Fotogrametria e varredura a laser poderiam ser utilizadas para fornecer um número maior de medições para áreas de tamanhos similares e, também, são apropriados para objetos mais complexos. Ambas as técnicas podem também ser implantadas do espaço aéreo, de modo a fornecer dados de pesquisa abrangendo áreas muito maiores. Enquanto o GNSS (Global Navigation Satellite Systems – Sistema Global de Navegação por Satélite) pode ser utilizado para levantamentos em áreas de mesmo tamanho, o número de pontos coletados é limitado em comparação às técnicas aéreas, ou mesmo orbitais. A varredura a laser, seja aérea ou terrestre, é uma das técnicas que permite a coleta de uma grande quantidade de informações tridimensionais em um curto período de tempo (Figura 3).

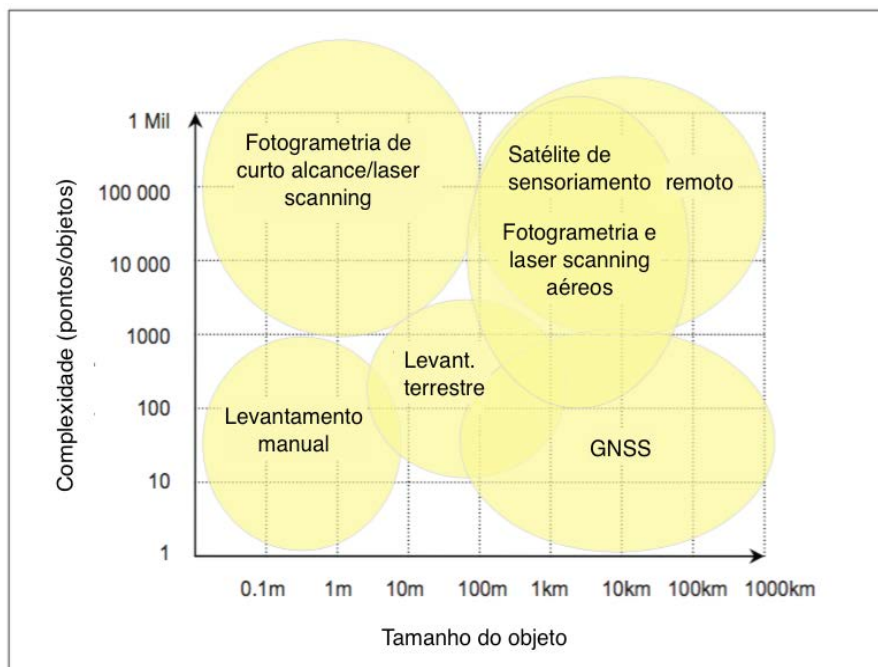


Fig 3 - Técnicas de levantamento segundo escala e complexidade. Fonte: Adaptado de Barber e Mills (2011).

Como em muitas outras técnicas de aquisição de dados geospaciais, o LiDAR – de forma acentuada – gera um banco de dados na ordem de dezenas de GB's, ou mais, dependendo da cobertura espacial e da densidade de pontos levantada pelo mesmo. Dessa forma, diversas alternativas foram desenvolvidas com intuito de tornar esse dado mais facilmente processável, ou seja, de diminuir seu tamanho virtual. Dentre os formatos conhecidos os mais utilizados são o .LAS e os arquivos ASCII (arquivos de texto que incluem diversas extensões).

Segundo a The American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (2013), há dois problemas principais relacionados com os formatos ASCII: o primeiro, é que eles apresentam um desempenho lento para a leitura e interpretação dos dados LiDAR; o segundo, é que este tipo de arquivo não vincula o metadado ao dado espacial. Assim, a criação do formato padronizado .LAS revolucionou a manipulação e interpretação de dados LiDAR, uma vez que, trata-se de um dado binário (contendo a informação espacial e metadados) facilitando seu processamento e fidedignidade.

O termo varredura a laser aplica-se à uma gama de instrumentos que operam com

diferentes princípios, em diferentes meios e com diferentes níveis de precisão. Uma definição genérica aplicada à varredura a laser e aceita quase que universalmente entre os autores da área é: “qualquer dispositivo que colete coordenadas 3D de uma determinada área da superfície de um objeto automaticamente e num padrão sistemático e a uma taxa elevada (centenas ou milhares de pontos por segundo) e que alcance os resultados (por exemplo, coordenadas tridimensionais) em (quase) tempo real” (Figura 4).

Segundo Wutke (2006) a tecnologia de varredura a laser é um aperfeiçoamento dos princípios de sensoriamento remoto, cujos medidores passaram a realizar a medição de distâncias sem a necessidade de refletores, permitindo a determinação remota de coordenadas, sem tocar o objeto. Além da distância cada vez maior ao objeto medido, os sensores de varredura a laser procuram realizar um número maior de medições num espaço de tempo menor.

3.1. Características do Dado LiDAR

A varredura a laser gera coordenadas tridimensionais de pontos sobre uma superfície

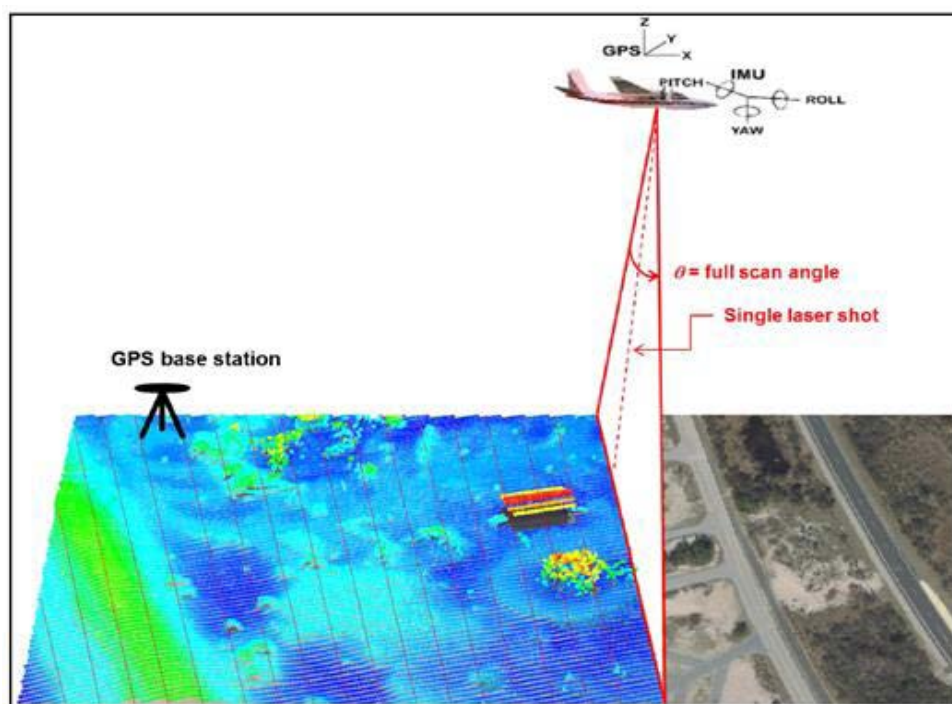


Fig 4 - Ilustração do processo de imageamento pela tecnologia de varredura a laser; Fonte: Centeno, 2007.

num curto período de tempo. Os pulsos de laser são gerados e emitidos pelo sistema com o auxílio de um espelho de varredura atingindo os objetos que estejam a certa distância. Estes objetos refletem o pulso emitido e parte de sua energia volta para o sistema. Com isto, a medida da distância entre o sensor e o objeto iluminado é determinada através do intervalo de tempo entre a emissão e a reflexão (retorno) do pulso.

Os sistemas de varredura laser são divididos em dois tipos: estático e dinâmico. O primeiro tipo é geralmente utilizado em levantamentos terrestres, em plataformas fixas, e o segundo caracteriza-se por medições em movimento, mais comumente transportados em aeronaves ou helicópteros, ou em veículos em menor escala de aplicação, embora também possa ser utilizado em plataformas espaciais (DALMOLIN, 2004).

Segundo NOAA (2012), novos sensores LiDAR tem a capacidade de captar múltiplos pulsos no momento da aquisição, aumentando assim a velocidade de levantamento para centenas de milhares de pulsos por segundo.

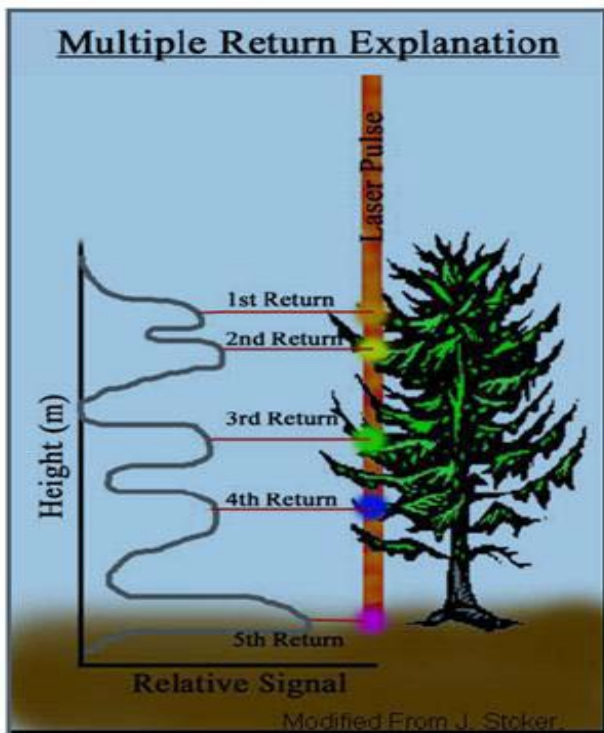


Fig 5 - Diagrama dos retornos apresentados pelo pulso do Laser Scanner. Fonte: Adaptado de ASPRS (2013).

Esses sensores podem captar até 5 pulsos, o que aumenta a capacidade de identificação tridimensional. Através da classificação dos pulsos, por exemplo, é possível identificar feições no espaço como: edificações, diversos níveis de vegetação, água, bem como a geração de modelos digitais de terreno através do último pulso - o mesmo é utilizado para representar o terreno (superfície da Terra), meio ao qual os pulsos do LiDAR não apresentam penetração (Figura 5).

Aqui nos defrontamos com as duas primeiras limitações em relação aos dados oriundos de varredura a laser utilizados neste trabalho. A primeira diz respeito ao formato dos dados em si. Em 2007, quando a varredura a laser foi realizada na área urbana de Joinville, a ASPRS já havia padronizado o formato .LAS e este era utilizado como modelo em praticamente todo o mundo pelos fabricantes de sensores LiDAR e de programas de processamento de dados, haja visto as vantagens sobre os dados em formato ASCII apresentadas anteriormente.

Os dados fornecidos pela empresa contratada, entretanto, foram entregues à Prefeitura Municipal de Joinville em formato ASCII, sendo possível identificar valores organizados em colunas de coordenadas UTM Este e Norte, altitude do ponto e intensidade de retorno do pulso laser (valor entre 1 e 256 variável conforme a quantidade de energia refletida pelo alvo), conforme apresentado na Figura 6. Com os dados no formato ASCII poucos softwares foram capazes de ler adequadamente os dados, e mesmo sendo realizada a leitura o processamento tornava-se extremamente lento devido ao próprio desempenho deste tipo de arquivo para leitura de grandes quantidades de dados. Deve-se considerar que alguns dos arquivos possuíam quase 500MB de tamanho de armazenamento com cerca de 12 milhões de pontos.

Houve, então, a necessidade de converter os dados em formato ASCII para o formato .LAS a fim de ganhar celeridade no processamento dos dados laser. Tal conversão foi realizada no software LP360, fabricado pela QCoherent, que possui um módulo de conversão automática de diretórios inteiros de dados compreendendo grandes volumes de armazenamento. A conversão dos arquivos .ALL (ASCII) foi realizada dando origem a uma coleção de arquivos .LAS.

713897.91	7078468.75	17.61	102	0713898.42	7078468.83	11.98	20	0	
713898.71	7078468.83	18.16	107	0713899.48	7078468.86	15.27	42	0	
713886.46	7078469.33	18.64	174	0713886.98	7078469.41	18.21	102	0	
713887.19	7078469.37	16.64	124	0713887.96	7078469.45	16.71	162	0	
713891.39	7078469.03	16.54	146	0713891.78	7078469.12	15.20	154	0	
713892.46	7078469.20	15.63	133	0713892.82	7078469.08	15.62	138	0	
713893.17	7078469.29	15.52	168	0713893.89	7078469.41	15.43	151	0	
713894.26	7078469.25	16.21	117	0713894.76	7078469.45	17.36	172	0	
713895.07	7078469.32	17.61	170	0713895.62	7078469.41	17.39	152	0	
713873.17	7078469.91	15.61	150	0713874.44	7078469.91	16.96	140	0	
713875.89	7078469.94	21.75	38	0713880.39	7078469.58	17.04	102	0	
713881.07	7078469.66	17.50	152	0713881.69	7078469.75	17.55	176	0	
713882.44	7078469.86	17.61	161	0713882.96	7078469.79	17.36	168	0	
713883.00	7078469.94	17.39	174	0713883.66	7078469.91	17.05	178	0	
713884.28	7078469.99	17.13	169	0713887.32	7078469.53	16.59	132	0	
713888.07	7078469.62	16.71	158	0713888.57	7078469.54	16.89	158	0	
713889.07	7078469.70	18.48	131	0713889.82	7078469.74	16.32	152	0	
713890.50	7078469.79	16.68	157	0713891.03	7078469.90	16.29	105	0	

Fig 6 - Exemplo de arquivo ASCII contendo os dados recebidos da PMJ

A segunda limitação diz respeito à questão estrutural da plataforma de varredura a laser utilizada no levantamento que permitia apenas a captação de um único pulso de retorno do laser emitido, o que, aliado a densidade de coleta de pontos relativamente baixa (4pt/m²) reduziu consideravelmente a possibilidade de se extrair automaticamente as feições edificadas na área de interesse. Os diversos testes efetuados com diferentes softwares (LP360, VRMesh, MARS7, TerraScan, ArcMap) não se mostraram satisfatórios, haja visto que todos os algoritmos atuais e eficientes para extração de feições a partir

de nuvem de pontos geradas por laser se valem do uso de dados em formato .LAS com leitura de múltiplos retornos. Tal lacuna referente à extração de feições a partir de dados laser foi preenchida pela utilização dos dados oriundos da restituição aerofotogramétrica. Ainda assim, os dados da varredura a laser continuaram a ser de suma importância para o conhecimento da altura das edificações inseridas na área de interesse, mas não puderam ser utilizados para a extração de feições.

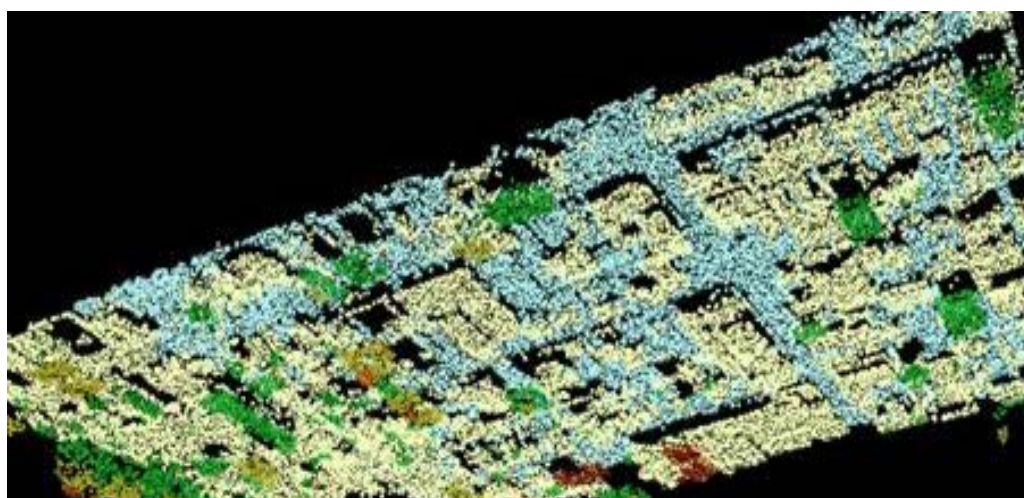


Fig 7 - Exemplo de dados de varredura a laser na área central de Joinville, visualização 3D.

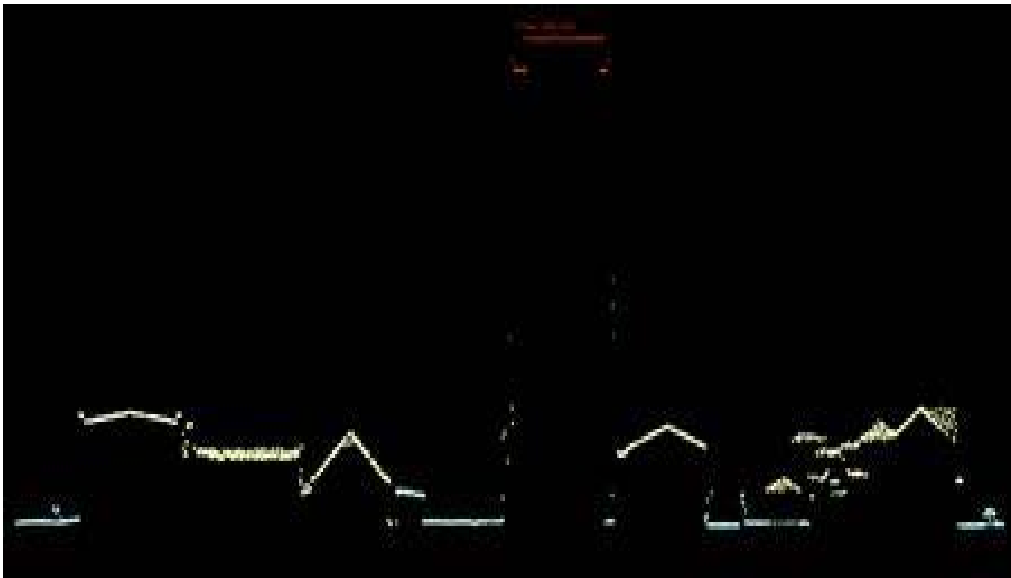


Fig 8 - Exemplo de dados de varredura a laser na área central de Joinville, visualização em perfil.

A primeira tentativa para a determinação das alturas das edificações foi realizada no software ArcMap 10.1, da plataforma ArcGIS da ESRI. A partir da versão anterior (10.0) a leitura de arquivos .LAS já era possível, entretanto, as melhorias resultantes da nova versão permitiram uma maior eficiência na leitura, exibição e armazenamento de dados laser pela utilização do formato LAS Dataset. Este formato tem a capacidade de acessar grandes bases de dados LiDAR de maneira rápida e sem a necessidade de qualquer tipo de conversão entre os dados (Figura 9).

O LAS Dataset, após a carga de dados LiDAR, apresenta de maneira simultânea estatísticas e área de cobertura dos mesmos, facilitando, assim, a gerência e manipulação deste tipo de dado. A partir da criação de um arquivo LAS Dataset único foi possível importar diversos arquivos em formato .LAS, processá-los e visualizá-los simultaneamente na área de trabalho do ArcMap juntamente com os arquivos vetoriais tipo shapefile correspondentes às parcelas (lotes) e edificações da área de interesse.

Inicialmente, a determinação das alturas das edificações foi realizada manualmente, uma a uma, utilizando a ferramenta de medição de distância a partir da visualização do perfil das edificações. Com a determinação da altura, o respectivo valor foi anotado na tabela de atributos do shapefile das edificações, numa coluna previamente criada e configurada para esta finalidade (Altura_Pre) e para utilização nas

etapas subseqüentes. O mesmo procedimento foi testado no software LP360, sem grande vantagem prática em relação ao ArcMap. Posteriormente, este procedimento foi substituído por um procedimento de extração automática que determinou a altura das edificações a partir da diferença entre o ponto mais alto e o ponto mais baixo nas circunvizinhanças da feição. Tal procedimento mostrou-se satisfatório em comparação com o procedimento manual, tendo obtido valores semelhantes em praticamente a totalidade dos casos. Excepcionalmente, apenas algumas edificações necessitaram de correção no tocante à altura obtida pelo método automático.

Para a extração das alturas automaticamente foi criado um modelo digital de superfície - MDS com intuito de obter com precisão a altura das edificações presentes na área de interesse. Para tal, foi necessário realizar um processo de filtragem do MDS original excluindo os valores de altitude compreendidos entre os polígonos das edificações (Figura 10).

O objetivo da medição das alturas das edificações estava relacionado com as etapas posteriores de criação de um modelo tridimensional para o espaço urbano em um ambiente de realidade virtual que permitisse quantificar a área construída e a quantidade de área disponível para construção obedecendo os parâmetros urbanísticos atuais, além de uma estimativa de potencial de construção adicional a partir da previsão de afrouxamento nestes parâmetros.

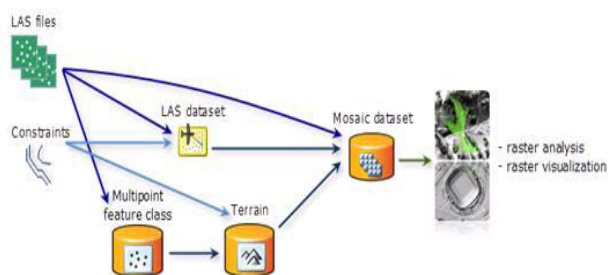


Fig 9 - Fluxo da manipulação de dados LiDAR através do LAS Dataset. Fonte: adaptado de ESRI, 2014.

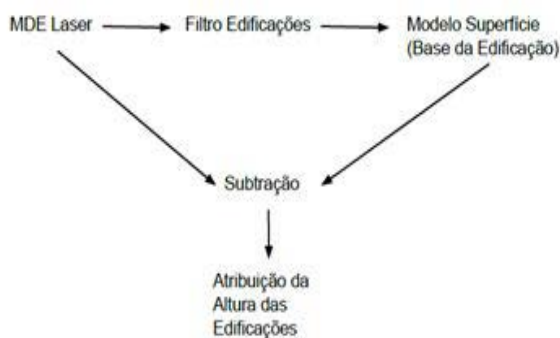


Fig 10 - Diagrama representativo da metodologia utilizada para a extração das alturas das edificações.

4. O POTENCIAL DE CONSTRUÇÃO ADICIONAL

Os Certificados de Potencial Adicional de Construção são um instrumento criado pelo Estatuto da Cidade, Lei Federal 10.257/2001, objetivando possibilitar o financiamento de grandes obras previstas em Operações Urbanas, sem que o município precise utilizar recursos vinculados ao orçamento municipal. O caso mais emblemático – e pioneiro – de sucesso na aplicação dos CEPACs foi regulado pela Instrução 401/03 da CVM Comissão de Valores Mobiliários com o lançamento dos certificados na bolsa de valores para negociação nas Operações Urbanas Faria Lima e Água Espreiada na cidade de São Paulo.

Para melhor entendimento deste mecanismo é preciso lembrar a lógica de financiamento das Operações Urbanas. Geralmente as prefeituras custeiam as obras públicas urbanas com o dinheiro arrecadado a partir dos impostos extraídos de toda a coletividade, enquanto os benefícios acabam favorecendo de forma diferenciada alguns poucos seguimentos privados, o que, resumidamente, pode ser definido como uma situação na qual todos pagam, mas

bem poucos usufruem.

É evidente que esse processo reflete-se na valorização imobiliária decorrente da realização de grandes intervenções urbanas, já que as obras são executadas com recursos originários do orçamento geral de toda a comunidade, mas a valorização beneficia mais diretamente apenas os contribuintes proprietários de imóveis localizados na área que recebe os investimentos da Prefeitura.

A lógica da emissão dos CEPAC's é a geração dos chamados “direitos adicionais de construção” nas áreas definidas pelas Operações Urbanas, o que possibilita a realização de construções acima do limite permitido pela legislação. Em outras palavras, a Prefeitura possibilita um afrouxamento nos parâmetros da legislação urbanística em um determinado local de interesse dos investidores e proprietários, mediante uma contrapartida financeira que é paga à Prefeitura, com a utilização destes títulos.

Para adquirir o CEPAC não é preciso ser proprietário de terrenos e nem mesmo ter que adquirir um imóvel na área da Operação Urbana, mas caso venha a ser titular de imóvel no local poderá aumentar a área construída ou alterar o seu potencial de utilização. O que levanta a hipótese de que a negociação dos CEPAC acabará por gerar um mercado especulativo imobiliário secundário pela sua própria valorização enquanto troca de mãos. Se tal fato vier a se concretizar, será mais um ponto positivo para o poder público que valorizará o lançamento dos certificados em Operações Urbanas futuras, aumentando a arrecadação na operação. Além disso, o CEPAC pode ser uma nova alternativa para grandes investidores do mercado financeiro, uma vez que são comercializados em leilões públicos de papéis, com rendimento variável, atrelado à valorização imobiliária da região em que foi executada a Operação Urbana, sendo que estudos de Sandroni (2009) estimaram o retorno mínimo dos títulos já emitidos na ordem de 14% ao ano.

Importante destacar que a emissão do CEPAC resulta em direitos adicionais de construção apenas nas áreas previamente aprovadas, não constituindo uma alteração na legislação referente ao uso e ocupação do solo, portanto, o poder público continua mantendo total controle do urbanismo.

5. METODOLOGIA PARA CÁLCULO DO POTENCIAL ADICIONAL DE CONSTRUÇÃO

A metodologia atual de cálculo do potencial adicional de construção é feita tomando como base a premissa bidimensional do cadastro tradicional. Sobre as projeções das edificações e parcelas (lotes) são feitas as estimativas de área construída em uma determinada área urbana, bem como são estimados o quanto de disponibilidade para a construção ainda há e sobre esse valor o quanto haveria com a modificação dos parâmetros urbanísticos em vigor, como coeficiente de aproveitamento, taxa de ocupação, gabarito e recuos frontais, laterais e de fundos. Toda esta metodologia minimiza o uso de ferramentas de geoprocessamento e não contempla uma análise visual tridimensional do espaço e das alterações provocadas nele a partir das intervenções traçadas.

Para suprir tal deficiência, buscou-se uma metodologia que fosse capaz de aliar o que há de mais atual em termos de coleta de dados geoespaciais e de processamento e simulação de ambientes virtuais urbanos. Para esta segunda meta foi escolhido o software CityEngine, fabricado pela ESRI, por sua capacidade de modelagem tridimensional via parametrização e por permitir a quantificação de análises comparativas visuais entre diferentes cenários criados.

O CityEngine tem sua origem nas plataformas geradoras de ambientes de realidade virtual para jogos eletrônicos, possuindo para tal finalidade alta complexidade e resultados impressionantes, mas não se comporta exatamente como um Sistema de Informações Geográficas – SIG. Apesar de atuar na representação tridimensional do espaço, o CityEngine não pode ser considerado exatamente um SIG, pois apresenta recursos muito limitados de retroalimentação de banco de dados alfanumérico a partir da elaboração de consultas, possui limitações na aplicação de modelos de análise espacial, e possui baixa interoperabilidade com outros sistemas de gerenciamento de dados territoriais. O CityEngine recebe dados de SIGs (como o ArcMap, também fabricado pela ESRI e utilizado nesta pesquisa) e permite a visualização da informação tridimensional, assim como a

simulação de paisagens.

A lógica de funcionamento do CityEngine é a da simulação de ambiente urbano através de parametrização da morfologia de seus elementos como ruas, parcelas e edificações. Tal simulação pode se dar em diferentes níveis de realidade virtual, ou conforme se encontra na bibliografia relacionada ao tema, diferentes níveis de detalhes (LoD – Levels of Details). Centeno e Bahr (2008) apresentam um resumo dos cinco diferentes níveis de detalhes catalogados na bibliografia da área, e pôde-se confirmar experimentalmente que o CityEngine é capaz de executar as simulações de ambiente urbano até o nível 3, numa escala que vai de 0 a 4 (0 representa o menor nível composto apenas por um modelo digital de terreno associado a imagens; 4 representa o maior nível de detalhamento no qual é possível não só simular o ambiente urbano como também o interior das edificações).

Toda a parametrização realizada no CityEngine é posta em prática através de regras (rules) que são scripts que estruturam de que maneira os padrões urbanísticos da área em questão serão transformados em um ambiente virtual tridimensional. Sendo um software estrangeiro, o CityEngine traz consigo uma série de regras-padrão que simulam bem os padrões urbanísticos e morfologia de cidades comuns nos países desenvolvidos. É possível, entretanto, elaborar as próprias regras para criar ambientes urbanos conforme os dados que se possua e a necessidade de análise que se apresente. A linguagem de programação do CityEngine é CGA, que é uma simplificação da linguagem Python, mas com modificações que a tornam particular e exclusiva. Mesmo sem grande documentação disponível foi possível gerar regras que permitiram recriar o ambiente urbano na área de interesse e simular intervenções com o lançamento de CEPAC.

A primeira etapa de trabalho no CityEngine consistiu na importação dos dados vetoriais em formato shapefile oriundos do ArcMap. Há diversos tipos de formatos possíveis de serem importados e o processo todo ocorreu sem maiores dificuldades. O único cuidado de maior relevância que teve de se tomar foi o de importar os shapefiles das parcelas (lotes) e de edificações separadamente. Tal fato se deu devido à necessidade de que após

a importação do shapefile das parcelas (lotes) foi preciso executar uma operação que informe ao CityEngine qual é o segmento (ou face) do polígono que está voltado para a rua. Este é um processo relativamente moroso, para o qual não há ainda uma forma automática, mas que é de fundamental importância para o funcionamento das regras relativas aos parâmetros urbanísticos como recuos laterais, frontais e de fundo. No CityEngine este processo é denominado “Set first edge” e dessa forma é possível que o software identifique qual segmento do polígono está voltado para rua, qual o segmento está localizado nos fundos (oposto ao primeiro) e quais compõem os segmentos das laterais do polígono. No shapefile das edificações não houve a necessidade de executar este procedimento, pois os recuos não se aplicam a estes objetos.

A importação dos shapefiles ocorre dentro de uma instância chamada cena (Scene). Na cena é possível importar modelos digitais de terreno, imagens aéreas, rede hidrográfica, entre outros, e também pode-se configurar elementos ambientais como o plano de fundo do céu (ensolarado, nublado, chuvoso, etc) e a posição do sol em relação ao horizonte criando efeitos de realidade aumentada. O processo de importação dos dados em uma cena é interessante do ponto de vista de preservação da integridade dos dados, mas acentua sua limitação de interoperabilidade em relação à devolução dos dados processados ou analisados no CityEngine para outros softwares de geoprocessamento. Tal característica coloca o CityEngine como um software de “fim de processo” e não de meio, ou um visualizador de eventos, o que o diferencia de um SIG propriamente dito.

Finalizada a importação dos shapefiles e a determinação do segmento das parcelas voltado pra rua, deu-se início à elaboração das regras que comporiam os cenários que se desejava criar. Inicialmente, o cenário trabalhado foi o de replicação da realidade e, para tal, foi necessário reconstruir as edificações hoje existentes na área de interesse. A altura das edificações já havia sido determinado pelos dados LiDAR no software ArcMap, conforme explicitado anteriormente, e se encontravam armazenadas numa coluna (“altura_pre”) da tabela de atributos do shapefile das edificações (“EdificacoesAlt.shp”). A operação dessa primeira regra consistiu

basicamente em uma extrusão (extrude.y) na altura utilizando a projeção da edificação como molde. Tomou-se também o cuidado de promover um fatiamento no volume extrudado (split) e, para isto, foi preciso antes definir uma altura padrão para o pavimento térreo (PT) e para os demais pavimentos superiores (PS). Consultando a Lei de Uso e Ocupação do Solo de Joinville identificou-se que o valor adotado em ambos os casos é de 3m e assumiu-se, portanto, este mesmo valor na modelagem. Também foi solicitado ao CityEngine que nessa primeira regra colorisse os volumes das edificações de amarelo e que calculasse dois parâmetros importantes para as análises: a área construída e o coeficiente de aproveitamento. A declaração das variáveis e a regra para o primeiro cenário (FootprintCalculate) ficaram assim elaboradas:

```
attr alturaPavTerreo = 3
attr alturaPavSuperior = 3
@StartRule
FootprintCalculate -->
    extrude(world.y, MAX)
    split(y) { alturaPavTerreo : Volume("PT") | ~1 : UpperFloors
}
UpperFloors -->
    split(y) { ~ alturaPavSuperior : Volume("PS") } *
Volume(volumeType) -->
    case volumeType == "PT":
        color (1,1,0)
        Reporting
        Visualization
    else :
        color (1,1,0)
        Reporting
        Visualization
Reporting -->
    report("Area Construida", geometry.area(bottom))
    report("Coef Aproveitamento", geometry.area(bottom) /
AreaTerren)
NIL
```

O resultado da reconstrução da realidade da área de interesse pode ser visualizada na Figura 11. É possível identificar perfeitamente que o software replicou as edificações corretamente com os prédios mais altos e as construções mais baixas com alturas adequadas aos valores que se poderia encontrar in loco. Para verificar a fidedignidade do processo reproduzimos nas figuras 12 e 13 duas imagens, uma gerada pelo CityEngine e uma outra obtida pelo Google Street View da Av. Quinze de Novembro, inserida na área de interesse.

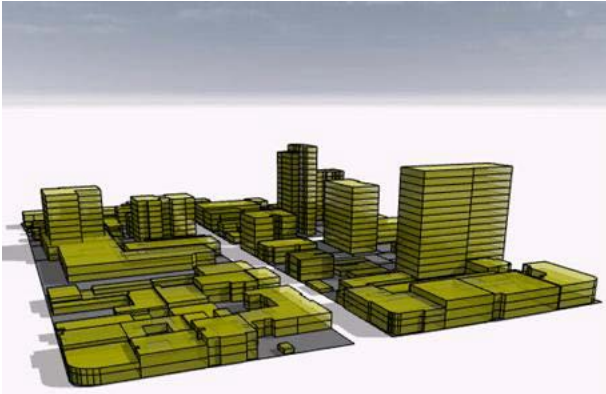


Fig 11 - Primeiro cenário gerado no CityEngine: reprodução da situação atual da área de interesse.

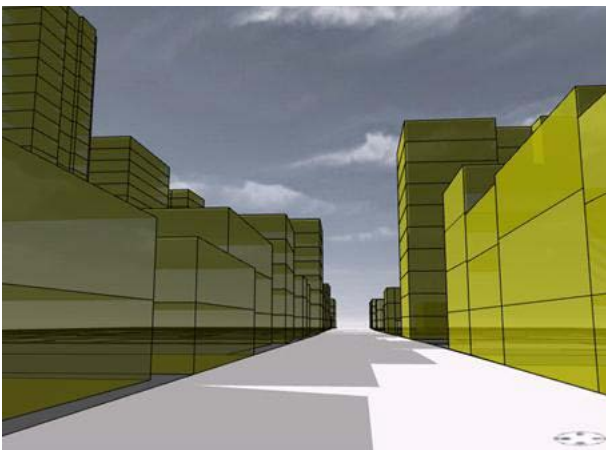


Fig 12 - Imagem da Rua Quinze de Novembro gerada no CityEngine



Fig 13 - Imagem da Rua Quinze de Novembro obtida do Google Street View.

Segundo a análise realizada no CityEngine para este primeiro cenário, o total de área construída foi de 97.429,06m², o que, em valores da planta genérica de 2012 totalizaria a soma de R\$ 95.346.026,70 apenas para a área construída dos imóveis considerados na área de interesse.

Um segundo cenário foi elaborado no qual a área construída foi levada ao máximo de acordo com as formas atuais da projeção das edificações, mas considerando dois parâmetros urbanísticos vigentes pela Lei de Uso e Ocupação do Solo de Joinville: o gabarito da edificação e o coeficiente de aproveitamento. Foi desenvolvida uma nova regra que contemplou estes dois parâmetros de forma que a edificação não ultrapassasse 18 pavimentos nem que o coeficiente de aproveitamento do lote (CAL) fosse superior a 6. Na aplicação da regra os pavimentos sofrem extrusão um a um no valor estipulado para sua altura (3m) e o coeficiente de aproveitamento vai sendo calculado até chegar ao limite de 6. Se o décimo oitavo pavimento for alcançado antes disso a extrusão é interrompida, pois um dos parâmetros chegou ao limite. A declaração das variáveis e a regra para o segundo cenário (FootprintReach) ficaram assim elaboradas:

```
attr idealCAL = 6
@Hidden
attr currentFloorIndex = 1
floorHeightFunction =
    case currentFloorIndex == 1 :
        alturaPavTerreo
    else :
```

```
alturaPavSuperior
```

```
FootprintReach -->
```

```
ReachRecursion( idealCAL * AreaTerren )
```

```
ReachRecursion( restArea ) -->
```

```
case restArea < geometry.area(bottom) :
```

```
Done.
```

```
case currentFloorIndex == 19 :
```

```
Done.
```

```
else :
```

```
extrude(world.y, floorHeightFunction)
```

```
VisualizationReach (currentFloorIndex)
```

```
set (currentFloorIndex, currentFloorIndex + 1)
```

```
comp(f) {top: ReachRecursion( restArea -  
geometry.area) | all: NIL}
```

```
VisualizationReach ( volumeType ) -->
```

```
case volumeType == 1 :
```

```
Volume ("PT")
```

```
else :
```

```
Volume ("PS")
```

O resultado da simulação deste segundo cenário pode ser visto na Figura 14. É possível notar que alguns dos edifícios que apareciam mais altos no primeiro cenário sofreram redução em seu gabarito neste segundo cenário. Tal fato indica que estes edifícios estão hoje fora de conformidade com a Lei de Uso e Ocupação do Solo de Joinville, ou por superar o gabarito máximo permitido ou por ultrapassar o coeficiente de aproveitamento do lote para a área central da cidade.

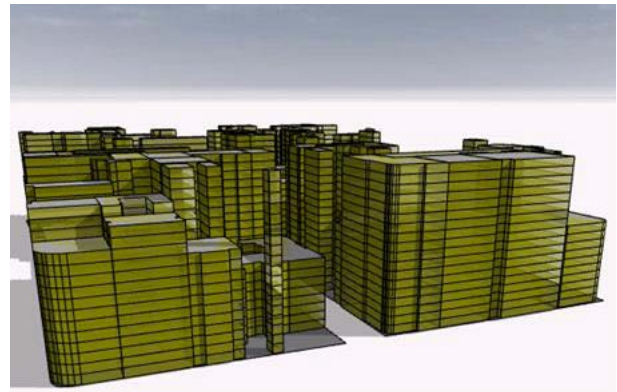


Fig 14 - Segundo cenário gerado pelo CityEngine

O total de área construída neste cenário foi calculada pelo CityEngine como sendo 348.610,87m² o que resultaria num aumento de 358%, que corresponde ao estoque de área construtiva disponível. É importante observar que neste segundo cenário foi provocada uma maximização da área construtiva disponível, mas ainda conforme a projeção das edificações, sendo que algumas destas edificações estão construídas fora dos padrões urbanísticos desejáveis e outras não aproveitaram totalmente a taxa de ocupação disponível.

Em outras palavras, a construção deste segundo cenário enseja questionamentos sobre se levássemos os parâmetros urbanísticos até o limite permitido na Zona Central 1, com recuo frontal de 5m, recuos laterais e de fundo de 1,5m, gabarito de 18 pavimentos, coeficiente de aproveitamento do lote de 6 e taxa de ocupação de 70%. Para responder tais questionamentos construiu-se um terceiro cenário que nos permitiu avaliar a cidade do ponto de vista ideal do obediência a todos os parâmetros urbanísticos e estando no limite da ocupação e do uso do solo.

O resultado da simulação desse terceiro cenário está apresentando na Figura 15 e visualmente é perceptível que as edificações se configuraram com gabaritos menores em comparação com o segundo cenário. Tal fato se deve a que as edificações como estão construídas atualmente ocupam a área das parcelas de forma irregular, ou melhor dizendo, fora de conformidade com os atuais parâmetros urbanísticos. Isso se explica por se tratar de uma área das mais antigas na ocupação da cidade e que foi sendo sedimentada em seu uso e ocupação

sem uma preocupação com o atendimento a qualquer ordenamento. Na prática a ocupação das parcelas se deu ao longo do tempo em muitos casos com a ausência de recuos frontais, laterais e de fundos e consequentemente com taxa de ocupação maior que 70%.

O total de área construída calculado pelo CityEngine para este terceiro cenário foi de 291.194,96m², valor 299% superior ao calculado para a situação atual (primeiro cenário). Tomou-se este valor como limite do estoque construtivo atual, pois certamente, na medida em que o mercado imobiliário demandar o aumento de área construída, as autorizações e licenças a serem fornecidas pelo poder público municipal para a construção levará em conta os atuais parâmetros urbanísticos e este valor, portanto, não será superado.

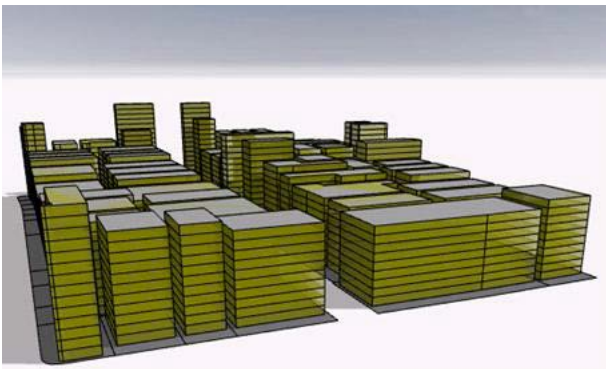


Fig 15 - Terceiro cenário gerado pelo CityEngine

A redução do número de pavimentos em geral das edificações está certamente ligada ao coeficiente de aproveitamento do lote que é o fator mais fortemente limitante para o acréscimo de área construída. Numa área central, como esta em questão, na qual o limite do gabarito é de 18 pavimentos, e em sendo atendidos os recuos e taxa de ocupação, pode-se inferir que se as edificações simuladas neste terceiro cenário não alcançaram a totalidade de pavimentos possíveis foi certamente por influência limitadora do coeficiente de aproveitamento do lote. O que conduziu a novos cenários para o cálculo do potencial adicional de construção apenas variando o valor do coeficiente de aproveitamento do lote, que é se mostrou como o parâmetro mais restritivo.

Simulou-se no CityEngine para a área de

interesse variações unitárias do coeficiente de aproveitamento do lote de 6 (limite atual) até 10 e obtiveram-se os valores apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Majoração do coeficiente de aproveitamento do lote e aumento da área construída

Coeficiente de Aproveitamento do Lote	Total de área construída (m ²)
6	291.194,96
7	340.752,84
8	379.102,32
9	425.436,25
10	464.027,89

Pelos resultados obtidos, levando em consideração a morfologia da área de interesse, a quantidade de parcelas (lotes), suas dimensões, recuos, gabarito e taxa de ocupação, o aumento de 1 (uma) unidade no coeficiente de aproveitamento do lote seria responsável por algo em torno de 43.000m² (valor médio) de área construída adicional. De outra forma, pode-se afirmar que o relaxamento dos parâmetros urbanísticos com aumento de uma unidade no coeficiente de aproveitamento do lote responde potencialmente por um adicional de área construída de 43.000m² na área de interesse. Da perspectiva da valoração dos imóveis, tal incremento de potencial adicional de construção elevaria o valor dos imóveis em cerca de R\$ 41 milhões, em valores atuais conforme a planta genérica de valores. Considerando-se que a área de interesse tomada nesta pesquisa é relativamente pequena, tem-se uma ideia de quanto o mercado imobiliário se beneficia com o relaxamento dos parâmetros urbanísticos promovidos durante uma Operação Urbana consorciada e, portanto, quanto estaria disposto a pagar antecipadamente para ter o direito de usar os CEPAC e, finalmente, quanto o poder público municipal pode se valer deste instrumento, previsto no Estatuto da Cidade, como forma de autofinanciamento da cidade.

De maneira resumida, a metodologia aqui expressa pode ser apresentada no seguinte fluxograma da Figura 16.

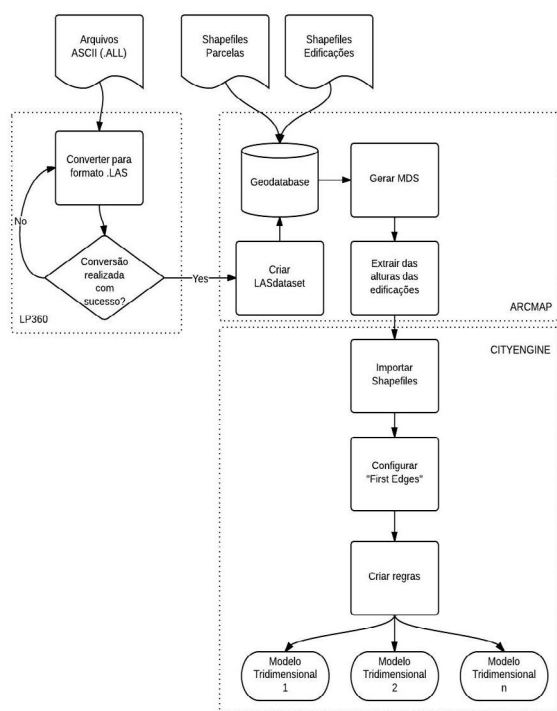


Fig 16 - Fluxograma da Metodologia de Avaliação do Potencial Adicional de Construção.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O autofinanciamento das administrações públicas municipais é um desafio que tem sido travado com maior ênfase desde a promulgação da Constituição de 1988. A transferência de responsabilidades para o poder municipal onerou as suas contas e, até certo ponto, é um dos grandes obstáculos à capacidade de investimento das prefeituras por todo o Brasil.

O lançamento do Estatuto da Cidade trouxe, a partir do ano 2000, uma série de novas possibilidades tanto do ponto de vista da organização e ordenamento territorial quanto do financiamento para atendimento às demandas crescentes por infra-estrutura. O instrumento dos Certificados de Potencial Adicional de Construção – CEPAC está lá previsto, mas até então tem sido pouco ou quase nunca utilizado pelas administrações municipais. Tal instrumento existe na forma de títulos que são lançados pelo poder público municipal no mercado de valores e que permitem ser utilizados em áreas específicas onde se planeja realizar operações de grande porte relacionadas à implantação de infra-estrutura urbana, as chamadas Operações Urbanas Consorciadas. A lógica do instrumento CEPAC é inversa ao que até então se pratica em

nosso país. Normalmente, a prefeitura aplica recursos próprios (em muitos casos vai buscar receita por longo tempo) para só então partir para o investimento. Com a utilização dos CEPAC a ordem é no sentido contrário, pois a partir de um bom planejamento, é possível calcular até que ponto se pode relaxar as leis que regulam o uso e a ocupação do solo no entorno da Operação Urbana, lançar os títulos no mercado, capitalizar-se e só então partir para a execução das obras. É provável que esta lógica inversa tenha sido até o presente momento o maior entrave para uma maior difusão dos CEPAC.

A metodologia presente neste estudo teve como objetivo analisar via parametrização no CityEngine como o dimensionamento do potencial adicional de construção poderia ser feito a partir da recuperação de informações altimétricas dos espaços construídos com o uso de dados LiDAR – superando as informações bidimensionais e passando a levar em conta o espaço tridimensional contínuo de uma área determinada. Foi escolhido o município de Joinville pela disponibilidade de dados, e mesmo sem haver atualmente uma previsão de implantação de Operações Urbanas Consorciadas com a utilização de CEPAC, a metodologia mostrou-se eficiente e foi possível calcular a partir de modelos bastante consistentes o potencial adicional de construção e o seu respectivo valor a partir da majoração de parâmetros urbanísticos, como o coeficiente de aproveitamento do lote. Foi possível concluir que, para a área considerada e com os parâmetros urbanísticos levados em conta, para cada unidade do coeficiente de aproveitamento do lote aumentada o acréscimo potencial de área construída girou em torno de 43mil m², com respectivo valor aproximado de 41 milhões de Reais.

A ferramenta CityEngine mostrou-se satisfatória para a modelagem tridimensional e possui potencial para outras análises mais complexas como também para modelagem em níveis de detalhe mais refinados. Outros trabalhos relacionados tem sido desenvolvidos em nível nacional e uma sugestão de continuidade deste trabalho é que se realize complementarmente análises para o espaço abaixo da superfície, com a ferramenta CityEngine, como forma de ampliar a perspectiva tridimensional do território.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pelo financiamento da pesquisa através do edital Universal N° 14/2011, à Prefeitura Municipal de Joinville pela cessão dos dados, à UDESC pela estrutura fornecida.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFONSO, L.C.F. **Certificados de potencial adicional de construção: a experiência de São Paulo**. In: CUNHA, E.M.P.; De CESARE, C.M. Financiamento das Cidades: Instrumentos Fiscais e de Política Urbana - Seminários Nacionais. p. 263-282. Brasília: Ministério das Cidades, 2007.

ASPRS - AMERICAN SOCIETY FOR PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING. **LAS Specification Version 1.4 - R3**. Technical Report. 28 p. Maryland: ASPRS, 2013.

AYDIN, C.C., DEMİR, O. & ATASOY, M. **Third Dimension (3D) in Cadastre and Its Integration with 3D GIS in Turkey**. FIG Working Week 2004. 15 p. Atenas: FIG, 2004.

BARBER, D.; MILLS, JON. **3D Laser Scanning for Heritage (second edition): Advice and guidance to users on laser scanning in archaeology and architecture**. 40 p. Swindon: English Heritage, 2011.

BRASIL. **Lei Federal N°10.257/2001 – Estatuto da Cidade**. Documento eletrônico acessado em 15 de janeiro de 2014. Disponível em http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/LEIS_2001/L10257.htm

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. N° 64 (2). p. 257-271, 2012.

ÇAGDAS, V., & STUBKJÆR, E. **Design research for cadastral systems**. Computers, Environment and Urban Systems. 11 p. Maryland Heights: Elsevier, 2010.

CENTENO, J.; BÄHR, H.-P. **Opções para coleta e visualização de dados para o Cadastro Técnico Multifinalitário**. COBRAC 2008: Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário. 11 p. Florianópolis: UFSC. 2008.

CENTENO, J.; MITISHITA, E. A. **Laser scanner aerotransportado no estudo de áreas urbanas: A experiência da UFPR**. XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. p. 3645-3652. Florianópolis: INPE. 2007.

DALMOLIN, Q.; SANTOS, D. **Sistema laser scanner: conceitos e princípios de funcionamento**. 3ed. 97 p. Curitiba: UFPR, 2004.

ESRI. **What is a LAS Dataset**. Documento eletrônico acessado em 27 de fevereiro de 2014. Disponível em http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#/What_is_a_LAS_dataset/015w00000057000000/

IBGE. Joinville. Documento eletrônico acessado em 03 de janeiro de 2014. Disponível em <http://www.cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?lang=&codmun=420910>

JOINVILLE. **Lei Complementar 312: Lei de Uso de Ocupação do Solo**. Anexos. 37 p. Joinville: Câmara Municipal, 2010.

JOINVILLE. **Joinville em Números**. Documento eletrônico acessado em 10 de julho de 2011. Disponível em <http://www.joinville.sc.gov.br/arquivo/download/codigo/1143-Joinville%252Bem%252BN%25C3%25BAmeros.html>

NOAA - NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION - COASTAL SERVICE CENTER. **Lidar 101: An introduction to Lidar technology, data, and applications**. 72 p. Washington: NOAA, 2012.

OOSTEROM, P. van, STOTER, J. & LEMMEN, C. **Modelling of 3D Cadastral Systems**. Documento eletrônico acessado em 10 de junho de 2011. Disponível em <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.100.5243&rep=rep1&type=pdf>

PCSP (PREFEITURA DA CIDADE DE SÃO PAULO). **Prospecto de Registro da Operação Urbana Consorciada Água Espreada**. 2008. Documento eletrônico acessado em 15 de janeiro de 2014. Disponível em <http://www.bmfbovespa.com.br/Pdf/Agua02092008A.pdf>

SANDRONI, P. **O Cepac como instrumento de captação de mais-valias urbanas e financiamento de grandes projetos urbanos**.

Dados LiDAR e Parametrização no Cityengine

35 p. In: Operações Urbanas, Anais Seminário Brasil França. Brasília: FUNAG/IHEDN, 2009.

WUTKE, Juliana Dias. **Métodos para a Avaliação de um Sistema Laser Scanner Terrestre**. Dissertação na Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da UFPR. 86 p. Curitiba: UFPR, 2006.