



LETÍCIA NOGUEIRA DE PÁDUA

**AVALIAÇÃO DA DENSIDADE DA NUVEM DE PONTOS OBTIDA A
PARTIR DE FOTOS DE VANT FOTOGRAFAMÉTRICO**

**INCONFIDENTES – MG
2016**

LETÍCIA NOGUEIRA DE PÁDUA

**AVALIAÇÃO DA DENSIDADE DA NUVEM DE PONTOS OBTIDA A
PARTIR DE FOTOS DE VANT FOTOGRAMÉTRICO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como pré-requisito de conclusão do curso de graduação em Engenharia de Agrimensura e Cartográfica no Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais – *Campus* Inconfidentes, para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Agrimensura e Cartográfica.

Orientador: Prof. Dr. Mosar Faria Botelho

**INCONFIDENTES – MG
2016**

LETÍCIA NOGUEIRA DE PÁDUA

**AVALIAÇÃO DA DENSIDADE DA NUVEM DE PONTOS OBTIDA A
PARTIR DE FOTOS DE VANT FOTOGRAMÉTRICO**

Data de aprovação: 25/10/2016

Orientador: Prof. Dr. Mosar Faria Botelho
IFSULDEMINAS - *Campus* Inconfidentes

Prof. Dr. Angelo Marcos Santos Oliveira
IFSULDEMINAS - *Campus* Inconfidentes

Prof. Esp. Paulo Augusto Ferreira Borges
IFSULDEMINAS - *Campus* Inconfidentes

AGRADECIMENTOS

Primeiramente e imensamente a Deus pela oportunidade de poder realizar mais um dos meus sonhos, e por manter-me sempre firme em minha fé.

A minha família por todo apoio e incentivo, principalmente a minha mãe Lucimara, minha fonte de inspiração e a quem devo tudo o que sou.

Ao Matheus meu companheiro, por todo carinho, apoio e incentivo.

Aos amigos de graduação, por toda jornada que caminhamos juntos ao longo destes anos, todos guardados em meu coração.

Ao Professor e orientador Mosar, por toda paciência, apoio, incentivo e ensinamentos a mim dedicados, no decorrer deste trabalho.

A todos os professores que compartilharam um pouco de seus conhecimentos conosco ao longo da graduação, principalmente ao professor Angelo e Paulo por aceitarem participar da avaliação deste trabalho.

Ao IFSULDEMINAS – *Campus* Inconfidentes, junto com todos seus servidores, por terem me acolhido e por poder fazer do Instituto minha segunda casa.

E a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

“Nunca foi sorte, sempre foi DEUS!”

Autor Desconhecido

RESUMO

Cada vez mais surgem tecnologias voltadas à identificação de elementos na superfície terrestre, estas são desenvolvidas com o objetivo de economizar tempo, diminuir custos e garantir as precisões que os métodos já consolidados fornecem. Dentre estas tecnologias estão os VANTs (Veículo Aéreo Não Tripulado) e os sistemas LIDAR (*Light Detection and Ranging*). Ambos geram modelos digitais de superfícies (MDS) densos, que é um dos produtos da cartografia, que contribui com inúmeras informações quanto à porção da superfície da terra levantada. Sabendo-se disso, fez-se um estudo com os principais sistemas LIDAR disponíveis hoje no mercado, estabelecendo algumas condições, e calculou-se a densidade nominal por metro quadrado de cada sistema. A densidade da nuvem de pontos estimada pelos sistemas LIDAR foram comparadas com a nuvem de pontos gerada com o aerolevante obtido com VANT fotogramétrico. Tratando-se de densidade de pontos por metro quadrado, viabilidade econômica em relação ao tamanho da área levantada, e mantendo-se a acurácia absoluta, o VANT se mostrou uma tecnologia mais viável que os sistemas LIDAR.

Palavras – chave: LIDAR; MDS; Densificação; FOV.

ABSTRACT

New technologies are increasingly arising, and are aimed at identifying elements in the earth's surface, which are developed in order to save time, reduce costs and ensure the precision that the consolidated methods already provide. Among these technologies are the UAV (Unmanned Aerial Vehicle) and LIDAR (Light Detection and Ranging) systems. Both of them generate a thick digital surface model (MDS), which is a mapping product, and it contributes several points of information on the land surface. Thus, a study was accomplished with main the LIDAR systems available on the market, setting some conditions, and calculated the nominal density per square meter of each system. The cloud density points estimated by the LIDAR systems was compared with that cloud of points generated with the aerial photos obtained by the UAV photogrammetric. In the case of points per square meter density, economic viability relative to the size of the area studied, maintaining absolute accuracy, the UAV showed a more viable technology than the LIDAR systems.

Keywords: LIDAR; MDS; Densification; FOV.

Sumário

1.	INTRODUÇÃO	10
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA (ESTADO DA ARTE)	5
3.1	FOTOGRAMETRIA	5
3.2	VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS (VANT)	5
3.2.2	ESTRUTURA DOS VANTs	7
3.2.3	PRODUTOS DOS VANTs.....	8
3.2.4	PLANEJAMENTO DE VOO	8
3.3	LIDAR.....	9
3.4	POSICIONAMENTO POR GNSS.....	10
3.4.1	TIPOS DE POSICIONAMENTO	11
3.5	MODELOS DIGITAIS	11
4.	MATERIAIS E MÉTODOS	13
4.1	MATERIAIS	13
4.2	MÉTODOS	13
4.2.1	ÁREA DE ESTUDO	13
4.2.2	LEVANTAMENTO E PROCESSAMENTO DOS PONTOS DE CONTROLE 14	
4.2.3	LEVANTAMENTO COM VANT FOTOGRAMÉTRICO	15
4.3	PROCESSAMENTO DO LEVANTAMENTO AEROFOTOGRAMÉTRICO	16
4.3.1	CÁLCULO DA ESCALA FINAL DE PROJETO	17
4.3.2	VALIDAÇÃO DA ACURÁCIA ABSOLUTA.....	18
4.3.3	CÁLCULO DA DENSIDADE DA NUVEM DE PONTOS GERADO PELO VANT FOTOGRAMÉTRICO	18
4.4	CÁLCULO DA DENSIDADE NOMINAL DOS SISTEMAS LIDAR.....	18
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	21
5.1	RESULTADOS DA DENSIDADE NOMINAL DOS SISTEMAS LIDAR	21
5.2	RESULTADO DA DENSIDADE DA NUVEM DE PONTOS DO VANT.....	29
5.2.1	VERIFICAÇÃO DA ESCALA ADEQUADA FINAL E DA ACURÁCIA ABSOLUTA	35
5.3	COMPARAÇÕES ENTRE VANT E LIDAR.....	37
5.3.1	COMPARAÇÕES DE DENSIDADE GERADAS POR VANT E POR LIDAR 37	

5.3.2	COMPARAÇÕES DA VIABILIDADE ECONÔMICA DE AMBAS TECNOLOGIAS	37
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	39
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Analogia entre movimentos do helicóptero e o VANT em seus eixos de voo	8
Figura 2 - Princípios e componentes de um sistema LIDAR	10
Figura 3 - Métodos de posicionamento	12
Figura 4 - Área de estudo	15
Figura 5 - Alvos pré – sinalizados confeccionados em isopor.	16
Figura 6 – VANT fotogramétrico	17
Figura 7 - Densidade da nuvem de pontos para o nível de reconstrução tridimensional muito baixo (<i>lowest</i>)	30
Figura 8 - Frequência da densidade da nuvem de pontos por metro quadrado com o nível de reconstrução tridimensional muito baixo (<i>lowest</i>)	30
Figura 9 - Densidade da nuvem de pontos para o nível de reconstrução tridimensional baixo (<i>low</i>).....	31
Figura 10 - Frequência da densidade da nuvem de pontos por metro quadrado com nível de reconstrução tridimensional baixo (<i>low</i>)	31
Figura 11 - Densidade da nuvem de pontos para o nível de reconstrução tridimensional médio (<i>medium</i>)	32
Figura 12 - Frequência da densidade da nuvem de pontos por metro quadrado com o nível de reconstrução tridimensional médio (<i>medium</i>)	32
Figura 13 - Densidade da nuvem de pontos para o nível de reconstrução tridimensional alto (<i>high</i>)	33
Figura 14 - Frequência da densidade da nuvem de pontos por metro quadrado com o nível de reconstrução tridimensional alto (<i>high</i>)	33
Figura 15 - Densidade da nuvem de pontos para o nível de reconstrução tridimensional super alto (<i>ultrahigh</i>)	34
Figura 16 - Frequência da densidade da nuvem de pontos por metro quadrado com nível de reconstrução tridimensional super alto (<i>ultrahigh</i>)	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Coordenadas Planas UTM dos pontos de controle	16
Tabela 2 – Principais sistemas LIDAR presentes no Mercado	20
Tabela 3 - Sistema LIDAR: LMS – Q680i	23
Tabela 4 - Sistema LIDAR: VQ – 580	23
Tabela 5 - Sistema LIDAR: VQ – 480i	24
Tabela 6 - Sistema LIDAR: VQ – 880g	24
Tabela 7 - Sistema LIDAR: PEGASUS HD500	25
Tabela 8 - Sistema LIDAR: PEGASUS HA500	25
Tabela 9 - Sistema LIDAR: ORION H300	26
Tabela 10 - Sistema LIDAR: TITAN	26
Tabela 11 - Sistema LIDAR: GALAXY	26
Tabela 12 - Sistema LIDAR: ALS80 – CM	27
Tabela 13 - Sistema LIDAR: ALS80 – HA	27
Tabela 14 - Sistema LIDAR: ALS80 – HP	28
Tabela 15 - Sistema LIDAR: ALS70 – CM	28
Tabela 16 - Sistema LIDAR: ALS70 – HP	29
Tabela 17 - Sistema LIDAR: ALS70 – HA	29
Tabela 18 - Sistema LIDAR: DRAGON EYE	30
Tabela 19 - Erro Médio Quadrático do projeto	36
Tabela 20 - Valores de precisão planimétrica para dados digitais	37

1. INTRODUÇÃO

Atualmente as pessoas passaram a ter acesso a bases georreferenciadas e imagens de satélite em dispositivos móveis, e fazem cada vez mais uso delas no seu dia a dia, absorvendo as geotecnologias antes presentes apenas no setor corporativo e de pesquisa. Essa disseminação da geotecnologia gerou uma imensa demanda por mais dados, com maior qualidade, atualizações mais frequentes, resoluções maiores etc. Para atender essa demanda, surgem novas tecnologias e métodos ampliando as possibilidades de pesquisa (FERREIRA, 2014).

A evolução e modernização das tecnologias aplicadas à identificação de elementos da superfície terrestre vêm se difundindo e expandindo cada vez mais, dando complementação ou até mesmo a substituição da fotogrametria convencional (em alguns casos), dentre essas evoluções podemos citar o levantamento por VANT (Veículo Aéreo não Tripulado) e o LIDAR (*Light Detection and Ranging*).

Quando nos tratamos dos sistemas LIDAR, o perfilamento a *laser* é uma tecnologia que possibilita a obtenção de informações altimétricas da cena, permitindo o reconhecimento de volumes que se projetam acima da superfície, como edificações, vegetação, torres, linhas de transmissão, etc (FALAT, 2005). Estes volumes são os primeiros produtos da varredura *laser* de uma determinada região, que é um conjunto de pontos irregularmente distribuídos, constituindo um modelo digital de superfície (MDS) da região percorrida (MACHADO, 2006).

O sistema LIDAR apresenta explicitamente densas nuvens tridimensionais de pontos, com menos oclusões, devido aos pequenos ângulos de abertura e, aparentemente

oferece maior facilidade na separação das feições objetivadas do que as imagens aéreas. Entretanto, dados de varredura de alta densidade por sistemas *laser* ainda são caros (MACHADO, 2006). Outra forma de obtenção de MDS são levantamentos com VANT, em que apresenta melhor viabilidade econômica quando comparada com técnica LIDAR, e pode se assemelhar com o produto final obtido, que é uma nuvem de pontos densa.

O interesse em Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT) tem crescido ao redor do mundo. Avanços recentes na tecnologia computacional, desenvolvimento de *software*, materiais mais leves, sistemas globais de navegação, avançados *links* de dados, sofisticados sensores e a miniaturização são os motivos do aumento de desenvolvimentos de VANTs (JORGE; INAMASU; CARMO, 2011). Os VANTs inicialmente foram desenvolvidos para fins militares, e segundo Dalbello (2013), as suas aplicações já tem um vasto campo nas atividades de levantamentos, mineração, mapeamentos e GIS, áreas de expansão urbana, obras, agricultura, florestas, controle e monitoramento de diversos fenômenos, avaliações de desastres e serviços policiais.

Embora ocorra aumento do número de projetos de VANTs voltados para aplicação civil, esta tecnologia ainda pode ser considerada recente e incipiente, principalmente no cenário brasileiro. Deste modo, há carência de estudos que apresentem o estágio atual do desenvolvimento do sensoriamento remoto por VANTs (LONGHITANO, 2010).

Os estudos de VANTs para mapeamento aerofotogramétrico estão em desenvolvimento, e a maioria dos resultados são oriundos de publicações e estudos realizados nos principais centros de pesquisas nacionais e internacionais, portanto ainda requer estudos para ratificar a boa qualidade dos dados gerados por esse tipo de sistema e aperfeiçoá-lo cada vez mais, como também criar uma regulamentação e normas específicas de uso para que esse sistema venha a trazer benefícios ao mercado de aerolevantamento, às empresas de engenharia e à sociedade em geral (ALMEIDA, 2014).

Estas tecnologias vêm se disseminando na nossa área de geociências e geotecnologias, agregando conhecimentos, reduzindo o tempo de levantamento, permitindo alcançar confiabilidade e precisão. Diante destes fatos alguns questionamentos surgem: Quais destas duas tecnologias (*Laser Scanner* Aerotransportado e VANT) atenderiam melhor cada tipo de projeto em relação à densificação do MDS gerado? São compatíveis em relação ao produto obtido, quando se observa a densificação da nuvem pontos? Com base nestes

questionamentos, este trabalho irá verificar a densificação da nuvem de pontos gerada por ambas tecnologias, e a viabilidade econômica destas, a escala adequada para representação do levantamento com VANT e também a sua acurácia absoluta.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Fazer análise da densificação de pontos dos Modelos Digitais de Superfícies gerados através de VANT fotogramétrico, validando com a técnica dos principais sistemas LIDAR disponíveis no mercado, para verificar suas compatibilidades.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar levantamento planialtimétrico de pontos de controle por posicionamento *GNSS*;
- Gerar nuvem de pontos para construção do Modelo Digital de Superfície (MDS);
- Avaliar a densificação de pontos contido na nuvem para cada metro quadrado;
- Verificar a acurácia planialtimétrica do levantamento aerofotogramétrico empregando VANT, através de pontos de controle pré-sinalizados;
- Calcular a escala adequada do projeto;
- Comparar a nuvem de pontos gerados por VANT com a obtida nominalmente pelo LIDAR;
- Comparação da viabilidade econômica das duas técnicas.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA (ESTADO DA ARTE)

3.1 FOTOGRAMETRIA

Segundo Coelho e Brito (2007) existem muitas definições do que é a Fotogrametria e cada uma reflete uma visão diferente sobre o tema, que expressa diferentes perfis e diferentes épocas. A tendência hoje – sobretudo com o desenvolvimento da fotogrametria digital e de sensores orbitais compatíveis com a atividade fotogramétrica – é que a fotogrametria esteja inserida no contexto global do sensoriamento remoto, grosso modo definido como ciência e tecnologia de aquisição de informação sobre um objeto sem contato direto entre este e o sensor.

Ainda por Coelho e Brito (2007) são vários os objetivos da fotogrametria: reduzir o trabalho de campo no levantamento de coordenadas de um ou vários objetos e o tempo de obtenção de tais dados. Entretanto, o objetivo principal da fotogrametria pode ser enunciado como a reconstrução de um espaço tridimensional, chamado de espaço-objeto, a partir de um conjunto não vazio de imagens bidimensionais, chamado de espaço-imagem.

3.2 VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS (VANT)

VANT é a abreviação de Veículo Aéreo Não Tripulado, sendo a nomenclatura em inglês para *UAV – Unmanned Aerial Vehicle ou Unmanned Airbone Vehicle*. Destaca-se que a palavra *Uninhabited* (não habitado) é encontrada substituindo a *Unmanned* em algumas situações. O termo drone também tem sido aplicado, principalmente nos Estados Unidos, para se referir a veículos aéreos não tripulados que envolvam normalmente emprego mais acentuado da robótica e apresentam maior autonomia na operação (LONGHITANO, 2010).

A evolução tecnológica dos equipamentos de fotografia e navegação e a necessidade de redução de tempo e custos nos processos de aquisição fez surgir sistemas alternativos aos utilizados tradicionalmente na aquisição de fotografia aérea. Estes sistemas, que incluem um veículo aéreo não tripulado, foram desenvolvidos inicialmente e usados por militares tendo em vista operações hostis de maior perigo e ações de reconhecimento em áreas de difícil acesso (VIDAL, 2013).

Conforme Medeiros (2007) os Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT) são pequenas aeronaves, sem qualquer tipo de contato físico direto, capazes de executar diversas

tarefas, tais como monitoramento, reconhecimento tático, vigilância e mapeamento entre outras”.

No Brasil a Instrução Suplementar – IS N.º 21-002^a da Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), diz que embora sejam denominados como VANTs, esses veículos são considerados aeronaves, e está definido como:

“Veículo Aéreo Não Tripulado – VANT: Aeronave projetada para operar sem piloto a bordo e que não seja utilizada para fins meramente recreativos. Nesta definição, incluem-se todos os aviões, helicópteros e dirigíveis controláveis nos três eixos, excluindo-se, portanto, os balões tradicionais e os aeromodelos”.

Todas as possibilidades pensáveis ficam em aberto para o uso desta nova ferramenta. Áreas como a cartografia, exploração mineira a céu aberto, telecomunicações, obras viárias, agricultura, segurança, serviços continuados de acompanhamento e monitorização entre muitas, são exemplos das que já usufruem ou podem vir a usufruir destes novos serviços (VIDAL, 2013).

Porém, os VANTs têm limitação em termos de capacidade de carga a bordo e condições climáticas. Se equipados com equipamentos de transmissão de dados, são capazes de transmitir, em tempo real os dados recolhidos. Sendo assim, as aeronaves não tripuladas têm sido projetadas para vários tipos de missão, mas o relato que se tem é que a origem desses veículos está ligada à área militar, como alvos manobráveis, reconhecimento tático, guerra eletrônica, entre outras (MEDEIROS, 2007).

3.2.1 APLICAÇÕES DOS VANTS

Medeiros (2007) apresentou o desenvolvimento dos VANTs como uma importante opção para o monitoramento e sensoriamento das atividades agrícolas. Já em 2011, a Embrapa (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) em conjunto com outras empresas desenvolveram uma nova solução para aplicações agrícolas, investiram no desenvolvimento de uma plataforma e uma aeronave que fosse capaz de operar nas condições de campo adversas, que são as áreas agrícolas, porém com bom desempenho e baixo risco (JORGE, 2011).

Longhitano (2010) verificou a aplicabilidade de sensoriamento remoto por VANTs, para auxílio na avaliação e monitoramento de impactos ambientais causados por acidentes

envolvendo transportes de cargas perigosas em rodovias. Os resultados mostraram que imagens aéreas podem auxiliar as equipes a avaliarem remotamente a situação ambiental, de forma mais rápida e segura e com geração de melhores informações.

Palermo (2013) usou da tecnologia VANT aliado ao apoio geodésico, para a geração de um modelo digital tridimensional das ruínas do Sítio Arqueológico São Miguel Arcanjo no município de São Miguel das Missões, no estado do Rio Grande do Sul.

Almeida (2014) realizou um estudo que discute a qualidade dos produtos gerados, a viabilidade técnica e econômica de levantamentos aerofotogramétricos usando VANT para mapeamento de pequenas áreas destinadas a projetos viários e também as adaptações de um quadricóptero de custo reduzido quando comparado aos sistemas próprios para mapeamento, disponíveis hoje no mercado. Para o desenvolvimento dos estudos foi escolhida uma área teste (16,30 hectares) localizada no estado da Paraíba, sendo usado um quadricóptero modelo *DJI Phantom Vision 2*, adaptado para a realização de mapeamento aéreo.

Pesquisadores do Departamento Nacional de Produção Mineral do estado do Ceará, da Universidade Federal do Ceará e dos Institutos Federais do Maranhão e Rio Grande do Norte, avaliaram a eficiência da aplicação de VANT para cálculo de volume de materiais de mineração, observando a acurácia do resultado obtido quando comparado com produtos do LIDAR e GNSS (SILVA *et al.*, 2016).

3.2.2 ESTRUTURA DOS VANTs

Um VANT deve possuir embarcado um receptor GNSS e um sistema inercial, que permite a determinação da orientação exterior aproximada para cada imagem tomada durante a missão. Além disso, o sistema deve contemplar uma câmara digital de alta resolução para a aquisição das imagens sobre a área de interesse, porém estas necessitam de correções, devido às deformações que ocorrem durante o processo (TANAKA *et al.*, 2013). Estas correções estão ligadas diretamente a posição e a atitude do sensor no momento da tomada da foto em relação ao referencial do espaço-objeto, este referencial pode ser observado na Figura 1.

Um microcontrolador é responsável por integrar todos os componentes a bordo da aeronave e por enviar e receber dados da aeronave através de um modem, por controle remoto (VIDAL, 2013).

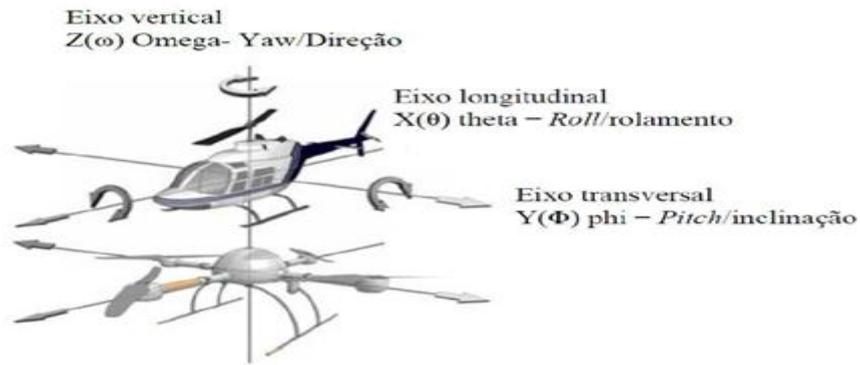


Figura 1 - Analogia entre movimentos do helicóptero e o VANT em seus eixos de voo
 Fonte: ALMEIDA (2014)

3.2.3 PRODUTOS DOS VANTs

As fotos obtidas pelos VANTs assim como todas as imagens obtidas de satélite ou avião devem ser corrigidas de todas as deformações presentes na imagem aérea, decorrentes da projeção cônica da fotografia, que é caracterizada por um aspecto distorcido, como se a imagem tivesse sido arrastada do centro para as bordas da foto, e das variações do relevo, que resultam em variação na escala dos objetos fotografados, para que seja possível utilizar estas imagens, é necessário que haja o processo de ortoretificação em que as imagens passam a ser denominadas ortofoto. A ortofoto equivale geometricamente ao mapa de traço, todos os pontos se apresentam na mesma escala, podendo seus elementos serem medidos e vetorizados com precisão. É possível medir distâncias, posições, ângulos e áreas, como num mapa qualquer (TANAKA *et al.*, 2013).

3.2.4 PLANEJAMENTO DE VOO

O planejamento de voo é de grande relevância para o sucesso do projeto fotogramétrico, pois este depende da qualidade das imagens aéreas obtidas. São elementos básicos a serem definidos no planejamento do voo: localização da região e delimitação da área a ser fotografada, incluindo mapa com linha de voo; dados sobre a câmara; altura de voo e altitude do terreno; superposição entre as fotos e direção do voo; características da mídia digital e capacidade de armazenamento do sensor, entre outros (TEDESCO; TONON; MARTINS, 2013). A finalidade do plano de voo é selecionar e calcular os elementos para a elaboração do mapa de voo que orientará a equipe de execução durante a cobertura aerofotogramétrica.

3.3 LIDAR

Os sistemas LIDAR (*Light Detection and Ranging*) aerotransportados tem crescido enormemente, a maioria dos sistemas LIDAR disponíveis comercialmente utilizam o mesmo princípio: uma aeronave sobrevoa uma região e o equipamento *LASER* (*Laser Range Finder*) efetua uma varredura no chão em direção perpendicular à direção do voo, determinando a distância ao terreno; esta distância é calculada como uma função do tempo exigido pelo raio *laser* para ir e voltar do equipamento até o terreno, na velocidade da luz (MACHADO, 2006). A referida técnica LIDAR vem sendo empregada em serviços de mapeamento, no Brasil, desde a entrada do primeiro sistema LIDAR no mercado nacional, em meados de 2001 (BRANDALIZE, 2004).

Os sistemas LIDAR são compostos por um sensor laser que essencialmente registra o tempo entre o sinal emitido e recebido de um determinado ponto, um Sistema Inercial de Navegação (*INS – Inertial Navigation System*) e um receptor *GNSS* em uma plataforma aerotransportada, como pode ser ilustrado na Figura 2.

O sistema integrado com *GNSS - INS* provê a posição e a atitude do veículo aéreo a qualquer tempo, de forma que é possível determinar a posição espacial dos pontos que refletem o raio *laser*. O sistema *GNSS* é utilizado em modo cinemático pós-processado, requerendo um segundo receptor que deve ser colocado como estação-mestre, em um ponto de coordenadas conhecidas. Estações permanentes também podem ser aproveitadas se forem próximas da região levantada (MACHADO, 2006). O conjunto total de informações é armazenado e processado, resultando em pontos com extrema precisão (x, y e z), que correspondem a superfícies e objetos presentes no terreno (GIONGO *et al.*, 2010).

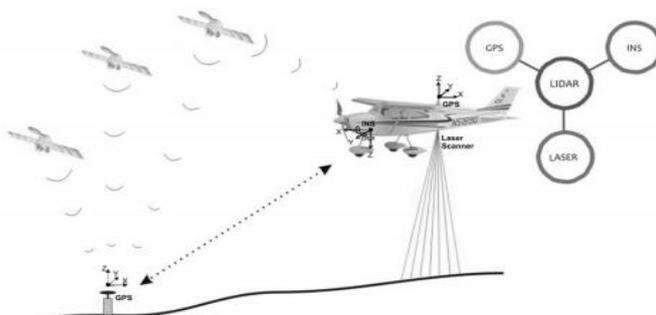


Figura 2 - Princípios e componentes de um sistema LIDAR
Fonte: GIONGO *et al.* (2010)

Levando-se em consideração que o sensor se encontra instalado numa plataforma móvel (avião ou helicóptero), que se desloca acima da superfície, é obrigatória a determinação de um conjunto de parâmetros: posição da aeronave, atitude do sensor no momento do registro dos dados e registro da distância entre o sensor a cada pulso emitido sobre a superfície do terreno. Isto pode ser conseguido pela integração, juntamente com a unidade *laser*, de unidades de posicionamento auxiliar, tais como o *GNSS* e IMU (Sistema de Medição Inercial) (SCHIMALESKY, 2007).

A tecnologia LIDAR é baseada nos mesmos princípios utilizados no sistema de RADAR, com a diferença de que, ao invés do uso de ondas de rádio para localizar os objetos de interesse, o sistema LIDAR utiliza pulsos *laser*. A tecnologia LIDAR foi inicialmente prevista para a utilização em levantamento de dados para a elaboração de Modelos Digitais de Elevação (MDE), em que os métodos tradicionais não eram suficientes, principalmente em áreas de difícil acesso (GIONGO et al., 2010). A precisão de Modelos Digitais de Elevação criados a partir de dados de *laser scanner* variam de acordo com o sistema utilizado e as condições de operação. Fatores como o tipo de terreno e a calibração do sensor com relação ao IMU e *GNSS* são fundamentais para a obtenção de produtos precisos (FERREIRA, 2014).

A automatização de procedimentos, aliada à precisão, acurácia e densidade das coordenadas tridimensionais dos pontos adquiridos, de forma extremamente rápida, torna a varredura pelo sistema LIDAR revolucionária (MACHADO, 2006). Aplicando-se algoritmos matemáticos ao resultado da varredura LIDAR, torna-se possível a identificação dos objetos no MDS (BOTELHO, 2007).

3.4 POSICIONAMENTO POR *GNSS*

O *GNSS* (*Global Navigation Satellite System*) são tecnologias que utilizam navegação ou posicionamento por satélites e os problemas que as envolvem. Além de sistemas de posicionamentos como GPS, GLONASS e Galileo, cálculos de órbitas de precisão e os efeitos da atmosfera (ionosfera e troposfera) também são importantes componentes desse sistema (MONICO, 2008).

O Sistema de Posicionamento Global, conhecido por GPS (*Global Positioning System*) ou NAVSTAR-GPS (*Navigation Satellite with Time And Ranging*), é um sistema projetado para fornecer o posicionamento tridimensional, velocidade e horário, em tempo

real, de um ponto sobre a superfície da Terra. Qualquer usuário possui em sua disposição, no mínimo, quatro satélites que podem ser rastreados (MONICO, 2008). Esse sistema foi desenvolvido pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos, originalmente, com fins militares estratégicos. Na década de setenta, o seu uso foi estendido para aplicações civis, em forma de uma grande evolução dos equipamentos eletrônicos e programas computacionais. Representa atualmente, uma avançada alternativa de posicionamento para a cartografia (MEDEIROS, 2007).

3.4.1 TIPOS DE POSICIONAMENTO

Ainda de acordo com Monico (2008) pode-se classificar o posicionamento em absoluto, relativo e diferencial:

- Absoluto: o referencial é o geocentro (centro de massa da terra);
- Relativo: quando se relaciona com uma rede de pontos de coordenadas conhecidas;
- Diferencial: as coordenadas da estação móvel são determinadas através das correções geradas na estação de referência;

Estes tipos de posicionamento recebem ainda outro complemento, de acordo com o tempo de rastreamento do ponto, as correções utilizadas, e se o usuário está parado ou em movimento, conforme ilustra a Figura 3:

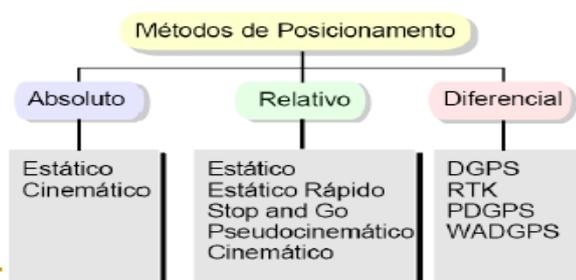


Figura 3 - Métodos de posicionamento
Fonte: BORGES (2015)

3.5 MODELOS DIGITAIS

Atualmente, o conceito de mapeamento envolve a ideia de modelos digitais de superfícies, em particular a do relevo terrestre, e não mais apenas o traçado de curvas de nível analógicas sobre uma base de poliéster. O Modelo Digital de Superfície (MDS) pode ser formado por um conjunto de coordenadas tridimensionais, gerado a partir de um par estéreo

de fotos aéreas, um par de imagens de um sensor orbital ou pelo sensor *laser scanner* aerotransportado (BOTELHO, 2007).

Um MDS pode expressar vários tipos de atributos: temperatura, pressão e declividade, além, é claro, da altitude. Quando um MDS exprime altitudes, chama-se Modelo Numérico de Elevações (MNE) ou Modelo Digital de Elevações (MDE) ou DEM (*Digital Elevation Model*). Os processos fotogramétricos extraem, geralmente, altitudes ou alturas (COELHO e BRITO, 2007).

Um Modelo Digital de Terreno (MDT) representa o comportamento de um fenômeno que ocorre em uma região da superfície terrestre. Os dados de MDTs são de fundamental importância em aplicações de geoprocessamento desenvolvidas no ambiente de um Sistema de Informações Geográficas (SIG). Esses modelos são obtidos a partir de uma amostragem do fenômeno dentro da região de interesse. As amostras são processadas de forma a criar modelos digitais que vão representar a variabilidade do fenômeno nessa região (FELGUEIRAS, 2015).

Os modelos digitais são utilizados por uma série de procedimentos de análises úteis para aplicações de geoprocessamento. A utilização dos modelos digitais, pelas análises, possibilita o estudo de um determinado fenômeno sem a necessidade de se trabalhar diretamente na região geográfica escolhida. As análises podem ser qualitativas ou quantitativas e são importantes para fins de simulações e tomadas de decisão no contexto de desenvolvimento de aplicações, ou modelagens, de geoprocessamento que utilizam SIGs (FELGUEIRAS, 2015).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 MATERIAIS

Aqui serão apresentadas as etapas e processamentos necessários, para a execução deste projeto, bem como os equipamentos e *softwares* utilizados.

Para o levantamento de campo foram utilizados os seguintes equipamentos:

- 1 receptor GNSS (*Spectra Precision – Promark 220*) com precisão de $5\text{mm} \pm 1\text{ppm}$ e portadoras L1/L2;
- 1 bastão.

Para o processamento de todos os dados e confecção dos produtos finais, foram utilizados os seguintes *softwares*:

- *GNSS Solutions*;
- *Microsoft Office Excel 2007*;
- *Agisoft PhotoScan Professional*;
- *Surfer 8.02*.

4.2 MÉTODOS

4.2.1 ÁREA DE ESTUDO

A área escolhida para ser levantada com o VANT fotogramétrico, é sobre o Sítio Nova Esperança, localizado na Avenida Juscelino Kubistchek de Oliveira em Inconfidentes-MG, e pode ser observado na Figura 4. Inicialmente com auxílio do *Google Earth*, foi possível coletar as coordenadas geodésicas aproximadas do limite da propriedade, necessárias para o planejamento das faixas de voos do VANT. Obtidas as coordenadas foi possível planejar a missão, definindo as faixas de voo, recobrimento longitudinal e lateral, velocidade e altura de voo.

4.2.2 LEVANTAMENTO E PROCESSAMENTO DOS PONTOS DE CONTROLE

Para a orientação exterior do projeto fotogramétrico e georreferenciamento torna-se necessário o rastreamento de pontos de controle no terreno, para este projeto coletaram-se dez pontos de controle, distribuídos homogeneamente por toda a área de interesse. Na Figura 4 podemos observar a cobertura da área que foi levantada e a posição dos pontos de controle rastreados.

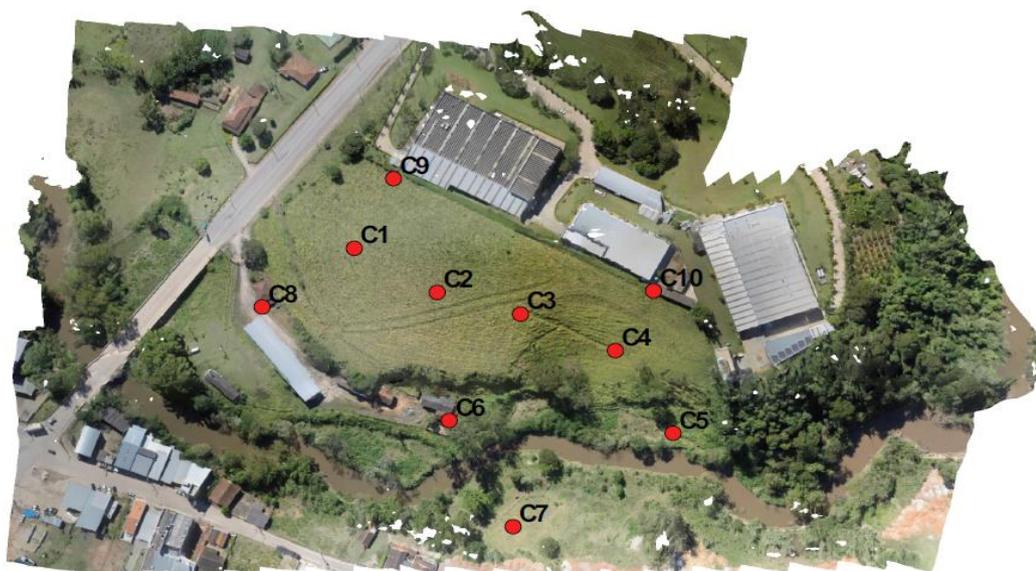


Figura 4 - Área de estudo
Fonte: Autora (2016)

Os pontos de controle foram rastreados no método de posicionamento relativo estático rápido, ocuparam-se estes pontos por um tempo mínimo de 15 minutos, com uma taxa de gravação de 1 segundo. Finalizada a coleta dos pontos, passou-se para o processamento dos dados brutos registrados. Todo o processo de obtenção de coordenadas e desvios padrões foram calculados no *software GNSS Solutions* com as portadoras L1 e L2, analisando sempre a solução do vetor ambiguidade como sendo fixo e as precisões dentro de um padrão considerado de confiança, a base utilizada para o transporte de coordenadas foi a MGIN localizada na cidade de Inconfidentes/MG e pertencente à Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC). Na Tabela 1 são apresentadas as coordenadas planas UTM dos pontos de controle, bem como seus respectivos desvios padrão, todas referenciadas ao sistema geodésico brasileiro SIRGAS2000 (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas).

Tabela 1 - Coordenadas Planas UTM dos pontos de controle

COORDENADAS DOS PONTOS DE CONTROLE						
Pontos	E (m)	N (m)	h (m)	σE (m)	σN (m)	σh (m)
C1	363884,652	7531482,214	878,977	0,005	0,009	0,017
C2	363929,915	7531455,480	882,873	0,005	0,007	0,016
C3	363975,432	7531442,298	883,211	0,006	0,007	0,015
C4	364027,172	7531420,165	870,268	0,007	0,007	0,014
C5	364058,641	7531370,070	856,536	0,009	0,009	0,018
C6	363936,436	7531377,773	860,813	0,008	0,01	0,015
C7	363971,338	7531313,381	855,547	0,007	0,01	0,018
C8	363834,358	7531446,661	860,589	0,007	0,011	0,015
C9	363906,102	7531524,450	882,077	0,008	0,009	0,012
C10	364047,949	7531456,359	888,656	0,008	0,01	0,014

4.2.3 LEVANTAMENTO COM VANT FOTOGRAMÉTRICO

Para o levantamento da área utilizou-se um VANT fotogramétrico (Figura 6) acoplado com uma câmera *GoPro Hero 3+ Black Edition*, resolução de 12 megapixels, distância focal de 2,77 milímetros e CCD de 1,55 micrômetro (*Charge Coupled Device*). Realizaram-se no total 5 faixas de voos a uma altura média de 80 m (metros) com velocidade aproximada de 6,66 m/s (metros por segundo), com recobrimento longitudinal de 80% (por cento) e lateral de 60% para as imagens capturadas. Para a posterior identificação dos pontos de controle nas imagens, usaram-se como alvos, placas de isopor retangulares pintadas de azul com dimensões de 0,5 x 1 metro (Figura 5).



Figura 5 – Alvos pré – sinalizados confeccionados com isopor



Figura 6 – VANT fotogramétrico

4.3 PROCESSAMENTO DO LEVANTAMENTO AEROFOTOGRAMÉTRICO

As imagens digitais brutas obtidas são tratadas inicialmente, ou seja, eliminam-se as distorções que ocorrem devido à curvatura da lente da câmera que as capturou, após, selecionam-se as fotos de interesse para iniciar o processo de geração dos MDS.

Todo o projeto fotogramétrico foi executado em uma *Workstation* HP Z220 CMT BR Intel Xeon CPU E3 -1240 V2 @ 3.40 GHz, 8 GB de RAM, no *software* Agisoft *PhotoScan Professional* versão 2.1.5. O *PhotoScan*, em seu manual, afirma que tende a gerar nuvem de pontos densas tanto quanto as nuvens geradas por LIDAR (PHOTOSCAN, 2016).

Nesta fase fez-se o processamento desde o nível mais baixo de densificação da nuvem de pontos até o mais alto, assim obtendo diversos MDS. Ao final obtiveram-se resultados com quantidades de pontos muito baixo (*lowest*), baixo (*low*), médio (*medium*), alto (*high*) e super alto (*ultrahigh*).

Os níveis da densificação da nuvem de pontos estão relacionados com a quantidade de pontos homólogos identificados nos pares estereoscópicos. Portanto, nível mais baixo induz a densificação de pontos menos densa, enquanto o nível mais alto induz a uma nuvem extremamente densa.

O projeto foi processado e georreferenciado com referência ao sistema geodésico brasileiro SIRGAS2000 (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas), e representado no sistema de coordenadas planas com projeção UTM.

Para a geração da nuvem de pontos trabalharam-se com 111 imagens digitais, cobrindo no total uma área de aproximadamente 0,18 quilômetros quadrados. O intervalo de

tempo de exposições feitas na câmara fotográfica transportada pelo VANT é ajustado de tal maneira que cada ponto da superfície da Terra é fotografado mais de uma vez de diferentes posições (TEMBA, 2000).

Os *softwares* fotogramétricos são capazes de restabelecer a posição e altitude da câmara no momento da exposição. A posição e interseção de cada ponto no modelo estereoscópico são restabelecidos pela correlação de imagens que determina pontos homólogos nas imagens digitais (TEMBA, 2000; COELHO e BRITO, 2007).

4.3.1 CÁLCULO DA ESCALA FINAL DE PROJETO

O *Ground Sample Distance* (GSD) representa o tamanho real, que um determinado pixel representa em função da resolução espacial de uma imagem, nas mesmas unidades do terreno. Já um *pixel* (*Picture element*) é a menor unidade de uma imagem digital e define sua resolução (KUGLER, 2008).

Portanto, a partir do tamanho do GSD podemos calcular a melhor escala para representação do projeto. De acordo com o IBGE (2016), as equações 1 e 2 permitem realizar o cálculo da escala de projeto.

$$E = \frac{1}{M} \quad (1)$$

$$e_m = 0,0002 * M \quad (2)$$

Onde e_m : erro tolerável em metros, varia na razão direta do denominador da escala, ou seja, quanto menor for a escala, maior será o erro admissível. Os objetos cujas dimensões forem menores que os valores dos erros de tolerância, não serão representados graficamente, portanto, menor que o tamanho do GSD.

Adaptando-se a equação 2 tem-se que:

$$M = \frac{e_m}{0,0002} \quad (3)$$

4.3.2 VALIDAÇÃO DA ACURÁCIA ABSOLUTA

A fim de verificar a acurácia absoluta dos produtos gerados, o RMS (*Root Medium Square*) do projeto foi comparada à valores de referências, apresentados pela *American Society for Photogrammetry & Remote* (ASPRS, 2014) que considera o tamanho do GSD e o RMS nas mesmas unidades do terreno, e comparado também a valores de referência que consideram o RMS em pixel apresentados por Melo e Pachêco (2004) e também Coelho e Brito (2007).

4.3.3 CÁLCULO DA DENSIDADE DA NUVEM DE PONTOS GERADO PELO VANT FOTOGRAMÉTRICO

Os projetos fotogramétricos foram realizados para diversas densidades (muito baixa (*lowest*), baixa (*low*), média (*medium*), alta (*high*) e super alta (*ultrahigh*). Para cada projeto correspondente a uma densidade, seus arquivos de pontos tridimensionais foram exportados em formato “ascii”¹. Estes arquivos de coordenadas tridimensionais foram sobrepostos a uma malha regular de 1 m². A repetição da incidência dos pontos foram quantificadas, gerando ao final um novo arquivo “ascii”, contendo a densidade de pontos por metro quadrado, e a frequência de ocorrência do mesmo evento, ou seja, o número de vezes que a mesma quantidade de pontos por metro quadrado ocorreu no projeto.

Estes arquivos “ascii” resultantes foram importados no *software Surfer* versão 8.02, onde foram confeccionados os mapas de densidades das nuvens de pontos. A partir destes arquivos foram gerados também gráficos no *software Microsoft Office Excel 2007*, para melhor visualização da repetição de ocorrência da densidade de pontos.

*

4.4 CÁLCULO DA DENSIDADE NOMINAL DOS SISTEMAS LIDAR

Inicialmente foram feitas pesquisas dos sistemas LIDAR disponíveis no mercado, das principais empresas que fabricam estes equipamentos para aerolevantamentos. As

¹ Arquivos deste tipo podem ser lidos e manipulados diretamente pelo usuário através do uso de editores ou paginadores de uso geral, pois a forma binária do seu conteúdo corresponde a um padrão aberto e bem conhecido de todos.

empresas consultadas foram LEICA, RIEGL, OPTECH e TRIMBLE, destas coletou-se no total um número de 20 sistemas LIDAR, como pode ser visto na Tabela 2:

Tabela 2 – Principais sistemas LIDAR presentes no Mercado

TRIMBLE	RIEGL	TELEDYNE OPTECH	LEICA
HARRIER			
68i	LMS - Q680i	GALAXY	ALS 80 CM
	VQ - 480i	TITAN	ALS 80 HA
	VQ - 580	ORION C300 -1	ALS 80 HP
	VQ - 880 -G	ORION H300	ALS 70 CM
		ORION M300	ALS 70 HA
		PEGASUS HA500	ALS 70 HP
		PEGASUS HD500	ALS 60
			DRAGON
			EYE

Estes foram alvos de pesquisa porque satisfizeram as condições que foram impostas. As aeronaves devem operar numa faixa de altura de voo entre 800 e 1.500 metros.

O valor mínimo de operação de voo foi estabelecido observando as recomendações da Agência Nacional de Aviação Civil – Brasil (ANAC), que diz que sobre cidades, povoados, lugares habitados, sobre grupos de pessoas ao ar livre, sobre o solo ou em áreas montanhosas, devem-se voar num raio mínimo de 600 m, com centro na aeronave e contado acima do maior obstáculo da região em relação a posição estimada da aeronave em voo. E o limite máximo de 1.500 m de altura foi estabelecido, porque acima desta altura o aerolevante se torna muito alto e pouco viável com relação a precisão espacial.

Para o cálculo das densidades de pontos por metro quadrado em uma nuvem de pontos gerado por LIDAR, adotou-se a metodologia de cálculos apresentados por Brandalize (2004), em que a densidade de pontos varia de acordo com a altura e velocidade da plataforma, a abertura do FOV (*Field of View*) e a taxa de repetição do pulso *laser*. A equação utilizada para calcular a quantidade de pontos, está apresentada a seguir (equação 4). Estes cálculos foram desenvolvidos em uma planilha no *software Microsoft Office Excel 2007*, para todos os sistemas LIDAR envolvidos na pesquisa.

$$D = \frac{F}{\left(2 * H' * \operatorname{tg}\left(\frac{\theta}{2}\right)\right) * v} = \frac{F}{L * v} \quad (4)$$

Onde D: expressa o número de pontos *laser* amostrados em uma unidade de área, para uma única faixa de voo, sua unidade de medida são pontos por metro quadrado (pontos/m²);

F: Frequência expressa o número de pulsos emitidos por segundo, sua unidade de medida é um múltiplo do hertz (Hz), normalmente, o quilohertz (kHz);

H': Altura de voo operacional corresponde à distância vertical máxima entre a plataforma e a superfície do terreno. Por esta razão, depende do tipo de plataforma e do sistema LIDAR utilizados, sua unidade de medida é o metro (m);

θ : Ângulo de varredura corresponde ao ângulo de abertura ou giro do *scanner*, chamado também por diversos autores como FOV (*field of view*), sua unidade de medida é o grau (°).

v: Velocidade média da plataforma, sua unidade de medida normalmente é em metros por segundo (m/s).

L: Largura da faixa de varredura é determinada a partir de relações trigonométricas, sua unidade de medida é o metro (m).

Valores como a taxa de repetição do pulso *laser* (F), o ângulo de varredura (FOV) e o intervalo de alturas de voos que tais plataformas dos sistemas operam, foram extraídas do manual de cada um deles. Estes manuais foram encontrados nos *sites* das empresas fabricantes. Adotou-se uma velocidade média para todos os procedimentos de 70 m/s (252 km/h), que é a velocidade média mais comum de operação destas plataformas, e as alturas de voo para cada uma das situações, foram calculadas de acordo com o desempenho do sistema com relação à taxa de repetição do pulso *laser*.

A abertura do FOV interfere na densificação dos pontos, assim criou-se uma planilha em que a altura de operação de voo esta relacionada com a taxa de repetição do pulso *laser*, ou seja, para que o sistema LIDAR desempenhe todo seu potencial, quando estiver voando na menor altura de voo, este deve estar configurado para a maior capacidade de frequência, e vice – versa. A velocidade média é constante e variou-se o FOV com aberturas de 20, 30 e 40 graus, sendo 40° o valor médio da metade da abertura máxima do FOV de todos os sistemas pesquisados, encontrando assim diversos resultados para diversas situações configuradas.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 RESULTADOS DA DENSIDADE NOMINAL DOS SISTEMAS LIDAR

A seguir serão apresentadas as tabelas de cálculos da densidade nominal de pontos por metro quadrado. Como já dito anteriormente, o intervalo de altitudes de voos adotados para este trabalho está entre 800 e 1.500 metros, e os cálculos variaram de acordo com a abertura do FOV mais utilizados nestes tipos de levantamentos.

A partir dos resultados obtidos, foram extraídos da planilha apenas valores com densidade maior do que 4 pontos/m², porque resultados menores não são interessantes para reconstrução tridimensional de objetos (BOTELHO, 2007). Logo, apenas 16 dos 20 sistemas LIDAR pesquisados atenderam às expectativas com abertura do FOV em 20° (Tabela 3 a Tabela 18). Apenas 13 sistemas atenderam a abertura do FOV em 30° (Tabela 3; Tabela 5 a Tabela 8; Tabela 10 a Tabela 16; Tabela 18) e 11 para abertura do FOV em 40° (Tabela 3; Tabela 6 a Tabela 8; Tabela 11 a Tabela 16; Tabela 18). A seguir serão apresentadas as tabelas para cada sistema LIDAR que atendeu as condições impostas e as expectativas esperadas.

Observando a Tabela 3, nota-se que a maior densidade ocorre para uma altura de voo de 854,94 metros com FOV de 20° e frequência 400.000 Hz, e a menores densidades ocorrem para todas as aberturas de FOV.

Tabela 3 - Sistema LIDAR: LMS – Q680i

LMS - Q680i				
FOV 20°				
H' (m)	v (m/s)	F (Hz)	L (m)	D(pts/m²)
854,94	70	400000	301,50	19
944,85	70	350000	333,21	15
1044,22	70	300000	368,25	12
1154,05	70	250000	406,98	9
1275,42	70	200000	449,78	6
1409,55	70	150000	497,09	4
FOV 30°				
854,94	70	400000	458,16	12
944,85	70	350000	506,35	10
1044,22	70	300000	559,60	8
1154,05	70	250000	618,45	6
1275,42	70	200000	683,49	4
FOV 40°				
854,94	70	400000	622,34	9
944,85	70	350000	687,80	7
1044,22	70	300000	760,13	6
1154,05	70	250000	840,08	4

Observando a Tabela 4, nota-se que para este sistema apenas estas configurações atendem as condições impostas.

Tabela 4 - Sistema LIDAR: VQ – 480i

VQ - 480i				
FOV 20°				
H'	v (m/s)	F (Hz)	L (m)	D(pts/m²)
881,65	70	100000	310,92	5

Observando a Tabela 5, nota-se que a maior densidade ocorre para uma altura de voo de 873,68 metros com FOV de 20° e frequência 150.000 Hz, e a menor densidade também com FOV de 20° e frequência de 100.000 Hz para uma altura de voo de 1.015,07 metros.

Tabela 5 - Sistema LIDAR: VQ – 580

VQ - 580				
FOV 20°				
H'	v (m/s)	F (Hz)	L (m)	D(pts/m²)
873,68	70	150000	308,11	7
1015,07	70	100000	357,97	4
FOV 30°				
873,68	70	150000	468,20	5

Observando a Tabela 6, nota-se que a maior densidade ocorre para uma altura de voo de 877,50 metros com FOV de 20° e frequência 300.000 Hz, e a menor densidade com FOV de 30° e frequência de 200.000 Hz para uma altura de voo de 1.309,08 metros.

Tabela 6 - Sistema LIDAR: VQ – 880g

VQ - 880g				
FOV 20°				
H'	v (m/s)	F (Khz)	L (m)	D(pts/m²)
877,50	70	300000	309,45	14
1071,78	70	250000	377,97	9
1309,08	70	200000	461,65	6
FOV 30°				
877,50	70	300000	470,25	9
1071,78	70	250000	574,37	6
1309,08	70	200000	701,53	4
FOV 40°				
877,50	70	300000	638,77	7
1071,78	70	250000	780,19	5

Observando a Tabela 7, nota-se que a maior densidade ocorre para uma altura de voo de 836,70 metros com FOV de 20° e frequência 450.000 Hz, e a menor densidade com FOV de 40° e frequência de 300.000 Hz para uma altura de voo de 1.312,20 metros.

Tabela 7 - Sistema LIDAR: PEGASUS HD500

PEGASUS HD500				
FOV 20°				
H'	v (m/s)	F (Hz)	L (m)	D(pts/m²)
836,70	70	450000	295,06	22
972,10	70	400000	342,82	17
1129,42	70	350000	398,30	13
1312,20	70	300000	462,75	9
FOV 30°				
836,70	70	450000	448,39	14
972,10	70	400000	520,95	11
1129,42	70	350000	605,26	8
1312,20	70	300000	703,21	6
FOV 40°				
836,70	70	450000	609,07	11
972,10	70	400000	707,63	8
1129,42	70	350000	822,15	6
1312,20	70	300000	955,21	4

Observando a Tabela 8, nota-se que a maior densidade ocorre para uma altura de voo de 807,41 metros com FOV de 20° e frequência 300.000 Hz, e a menor densidade com FOV de 30° e frequência de 250.000 Hz para uma altura de voo de 1.266,27 metros.

Tabela 8 - Sistema LIDAR: PEGASUS HA500

PEGASUS HA500				
FOV 20°				
H'	v (m/s)	F (Hz)	L (m)	D(pts/m²)
807,41	70	300000	284,74	15
1266,27	70	250000	446,55	8
FOV 30°				
807,41	70	300000	432,69	10
1266,27	70	250000	678,59	5
FOV 40°				
807,41	70	300000	587,74	7

Observando a Tabela 9, nota-se que para este sistema apenas estas configurações atendem as condições impostas.

Tabela 9 - Sistema LIDAR: ORION H300

ORION H300				
FOV 20°				
H'	v (m/s)	F (Hz)	L (m)	D(pts/m²)
1020,16	70	150000	359,76	6

Observando a Tabela 10, nota-se que para este sistema apenas estas configurações atendem as condições impostas.

Tabela 10 - Sistema LIDAR: TITAN

TITAN				
FOV 20°				
H'	v (m/s)	F (Hz)	L (m)	D(pts/m²)
880,36	70	150000	310,46	7
FOV 30°				
880,36	70	150000	471,78	5

Observando a Tabela 11, nota-se que a maior densidade ocorre para uma altura de voo de 1.032,18 metros com FOV de 20° e frequência 250.000 Hz, e a menor densidade com FOV de 40° e frequência de 250.000 Hz para uma altura de voo de 1.032,18 metros.

Tabela 11 - Sistema LIDAR: GALAXY

GALAXY				
FOV 20°				
H'	v (m/s)	F (Hz)	L (m)	D(pts/m²)
1032,18	70	250000	364,00	10
1464,74	70	200000	516,55	6
FOV 30°				
1032,18	70	250000	553,14	6
FOV 40°				
1032,18	70	250000	751,37	5

Observando a Tabela 12, nota-se que a maior densidade ocorre para uma altura de voo de 939,76 metros com FOV de 20° e frequência 300.000 Hz, e a menor densidade com FOV de 40° e frequência de 250.000 Hz para uma altura de voo de 1.147,82 metros.

Tabela 12 - Sistema LIDAR: ALS80 – CM

ALS80 - CM				
FOV 20°				
H'	v (m/s)	F (Hz)	L (m)	D(pts/m²)
939,76	70	300000	331,41	13
1147,82	70	250000	404,78	9
1401,95	70	200000	494,40	6
FOV 30°				
939,76	70	300000	503,61	9
1147,82	70	250000	615,12	6
FOV 40°				
939,76	70	300000	684,09	6
1147,82	70	250000	835,55	4

Observando a Tabela 13, nota-se que a maior e menor densidade ocorre para a mesma altura de voo de 926,29 metros e mesma frequência de 200.000 Hz, a maior com FOV de 20° e menor com FOV de 40°.

Tabela 13 - Sistema LIDAR: ALS80 – HA

ALS80 - HA				
FOV 20°				
H'	v (m/s)	F (Hz)	L (m)	D(pts/m²)
926,29	70	200000	326,66	9
FOV 30°				
926,29	70	200000	496,40	6
FOV 40°				
926,29	70	200000	674,28	4

Observando a Tabela 14, nota-se que a maior densidade ocorre para uma altura de voo de 998,21 metros com FOV de 20° e frequência 350.000 Hz, e a menor densidade com FOV de 40° e frequência de 300.000 Hz para uma altura de voo de 1.281,73 metros.

Tabela 14- Sistema LIDAR: ALS80 – HP

ALS80 - HP				
FOV 20°				
H'	v (m/s)	F (Hz)	L (m)	D(pts/m²)
998,21	70	350000	352,02	14
1281,73	70	300000	452,01	9
FOV 30°				
998,21	70	350000	534,94	9
1281,73	70	300000	686,88	6
FOV 40°				
998,21	70	350000	726,64	7
1281,73	70	300000	933,02	5

Observando a Tabela 15, nota-se que a maior densidade ocorre para uma altura de voo de 873,45 metros com FOV de 20° e frequência 250.000 Hz, e as menores densidades com FOV de 20° e frequência de 150.000 Hz para uma altura de voo de 1179,04 metros, e FOV de 30° e frequência de 200.000 Hz para uma altura de voo de 1.014,81 metros.

Tabela 15 - Sistema LIDAR: ALS70 – CM

ALS70 - CM				
FOV 20°				
H'	v (m/s)	F (Hz)	L (m)	D(pts/m²)
873,45	70	250000	308,03	12
1014,81	70	200000	357,88	8
1179,04	70	150000	415,79	5
FOV 30°				
873,45	70	250000	468,08	8
1014,81	70	200000	543,83	5
FOV 40°				
873,45	70	250000	468,08	8

Observando a Tabela 16, nota-se que a maior densidade ocorre para uma altura de voo de 881,10 metros com FOV de 20° e frequência 350.000 Hz, e as menores densidades com FOV de 30° e frequência de 250.000 Hz para uma altura de voo de 1452,69 metros, e FOV de 40° e frequência de 300.000 Hz para uma altura de voo de 1.131,36 metros.

Tabela 16 - Sistema LIDAR: ALS70 – HP

ALS70 - HP				
FOV 20°				
H'	v (m/s)	F (Hz)	L (m)	D(pts/m²)
881,10	70	350000	310,72	16
1131,36	70	300000	398,98	11
1452,69	70	250000	512,30	7
FOV 30°				
881,10	70	350000	472,18	11
1131,36	70	300000	606,29	7
1452,69	70	250000	778,50	5
FOV 40°				
881,10	70	350000	641,39	8
1131,36	70	300000	823,56	5

Observando a Tabela 17, nota-se que para este sistema apenas estas configurações atendem as condições impostas.

Tabela 17 - Sistema LIDAR: ALS70 – HA

ALS70 - HA				
FOV 20°				
H'	v (m/s)	F (Hz)	L (m)	D(pts/m²)
1217,21	70	150000	429,25	5

Observando a Tabela 18, nota-se que a maior densidade ocorre para uma altura de voo de 867,73 metros com FOV de 20° e frequência 350.000 Hz, e a menores densidades ocorrem para todas as aberturas de FOV.

Tabela 18 - Sistema LIDAR: DRAGON EYE

DRAGON EYE				
FOV 20°				
H'	v (m/s)	F (Hz)	L (m)	D(pts/m²)
867,73	70	350000	306,01	16
958,99	70	300000	338,19	13
1059,85	70	250000	373,76	10
1171,32	70	200000	413,07	7
1294,51	70	150000	456,51	5
FOV 30°				
867,73	70	350000	465,02	11
958,99	70	300000	513,92	8
1059,85	70	250000	567,97	6
1171,32	70	200000	627,71	5
FOV 40°				
867,73	70	350000	631,66	8
958,99	70	300000	698,09	6
1059,85	70	250000	771,51	5

5.2 RESULTADO DA DENSIDADE DA NUVEM DE PONTOS DO VANT

As figuras 7 e 8 se referem ao processo de densificação da nuvem de pontos em seu nível mais baixo (*lowest*). Ao interpretar o gráfico (Figura 8) pode-se observar que a maior densidade foi de 50 pontos por metro quadrado. As maiores incidências de pontos por metro quadrado ocorreram entre a faixa de 3 a 6 pontos por metro quadrado. Observa-se, tanto na imagem como no gráfico, que a média para esta nuvem de pontos foi de 5 pontos por metro quadrado. Para esse processo (*lowest*) de geração da nuvem de pontos o *software* gastou 1 minuto e 2 segundos.

DENSIFICAÇÃO DA NUVEM DE PONTOS - LOWEST
SISTEMA DE PROJEÇÃO UTM - SIRGAS2000

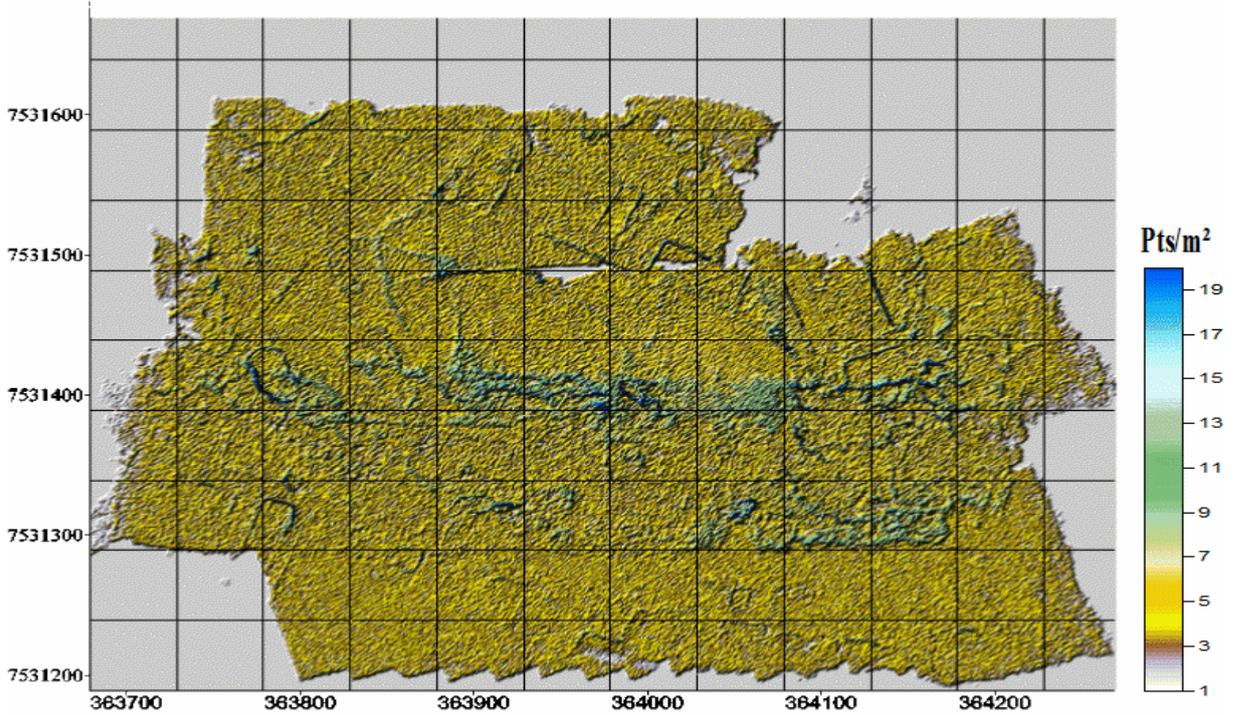


Figura 7 - Densidade da nuvem de pontos para o nível de reconstrução tridimensional muito baixo (*lowest*)

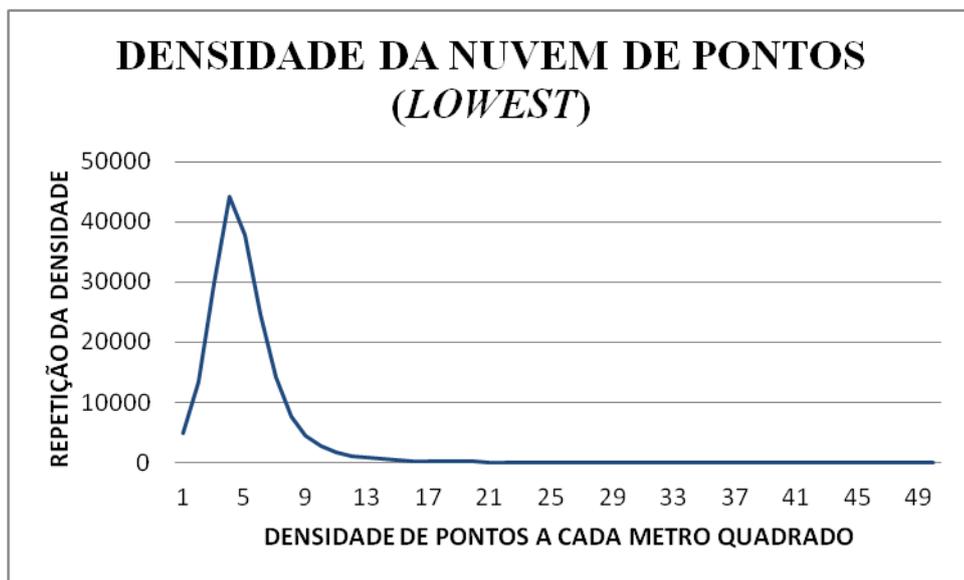


Figura 8 - Frequência da densidade da nuvem de pontos por metro quadrado com nível de reconstrução tridimensional muito baixo (*lowest*)

As figuras 9 e 10 se referem ao processo de densificação da nuvem de pontos em seu nível baixo (*low*). Ao interpretar o gráfico (Figura 10) pode-se observar que a maior densidade foi de 165 pontos por metro quadrado. As maiores incidências de pontos por metro quadrado ocorreram entre a faixa de 14 a 24 pontos por metro quadrado. Observa-se, tanto na imagem como no gráfico, que a média para esta nuvem de pontos foi de 20 pontos por metro

quadrado. Para esse processo (*low*) de geração da nuvem de pontos o *software* gastou 3 minutos e 30 segundos.

DENSIFICAÇÃO DA NUVEM DE PONTOS - LOW **SISTEMA DE PROJEÇÃO UTM -SIRGAS2000**

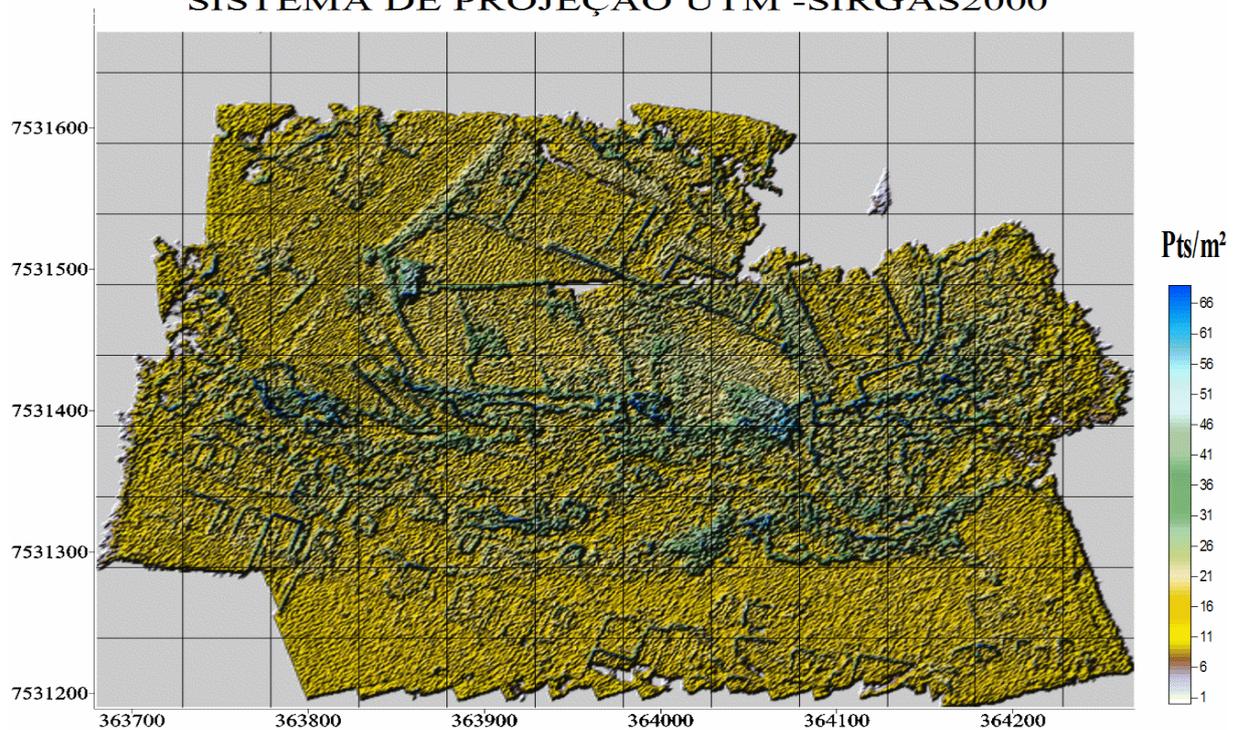


Figura 9 - Densidade da nuvem de pontos para o nível de reconstrução tridimensional baixo (*low*)

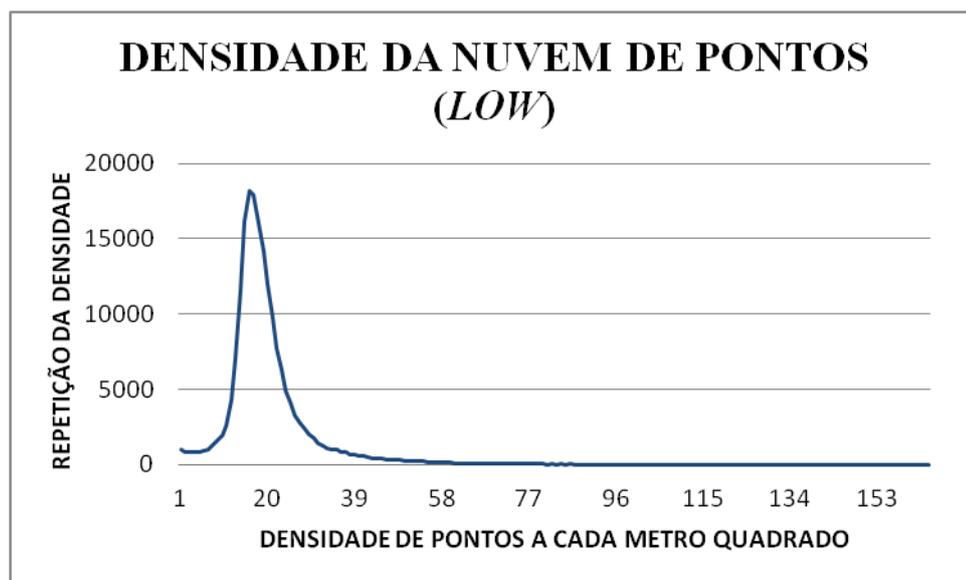


Figura 10 - Frequência da densidade da nuvem de pontos por metro quadrado com nível de reconstrução tridimensional baixo (*low*)

As figuras 11 e 12 se referem ao processo de densificação da nuvem de pontos em seu nível médio (*medium*). Ao interpretar o gráfico (Figura 12) pode-se observar que a maior

densidade foi de 714 pontos por metro quadrado. As maiores incidências de pontos por metro quadrado ocorreram entre a faixa de 47 a 113 pontos por metro quadrado. Observa-se, tanto na imagem como no gráfico, que a média para esta nuvem de pontos foi de 80 pontos por metro quadrado. Para esse processo (*medium*) de geração da nuvem de pontos o *software* gastou 38 minutos e 27 segundos.

DENSIFICAÇÃO DA NUVEM DE PONTOS - MEDIUM
SISTEMA DE PROJEÇÃO UTM -SIRGAS2000

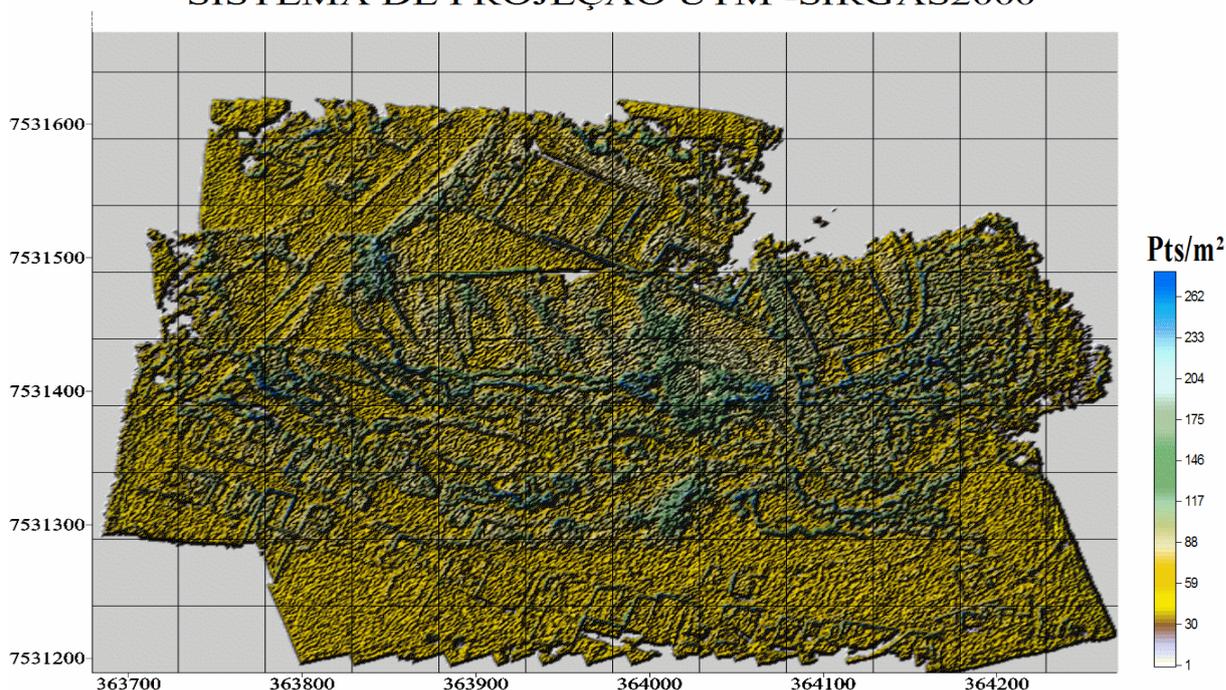


Figura 11 - Densidade da nuvem de pontos para o nível de reconstrução tridimensional médio (*medium*)

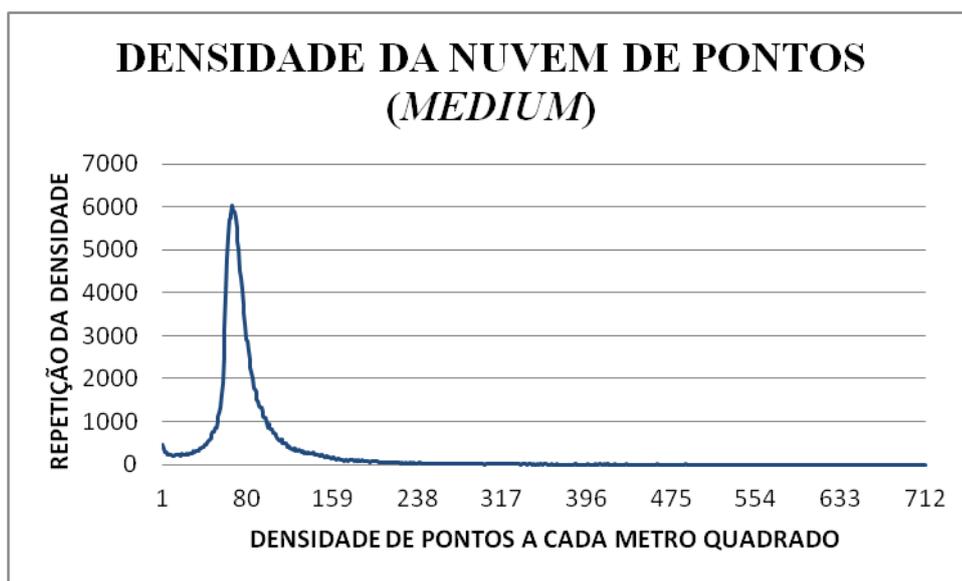


Figura 12 - Frequência da densidade da nuvem de pontos por metro quadrado com nível de reconstrução tridimensional médio (*medium*)

As figuras 13 e 14 se referem ao processo de densificação da nuvem de pontos em seu nível alto (*high*). Ao interpretar o gráfico pode-se observar (Figura 14) que a maior densidade foi de 2598 pontos por metro quadrado. As maiores incidências de pontos por metro quadrado ocorreram entre a faixa de 236 a 332 pontos por metro quadrado. Observa-se, tanto na imagem como no gráfico, que a média para esta nuvem de pontos foi de 316 pontos por metro quadrado. Para esse processo (*high*) de geração da nuvem de pontos o *software* gastou 17 minutos e 45 segundos.

DENSIFICAÇÃO DA NUVEM DE PONTOS - HIGH
SISTEMA DE PROJEÇÃO UTM - SIRGAS2000

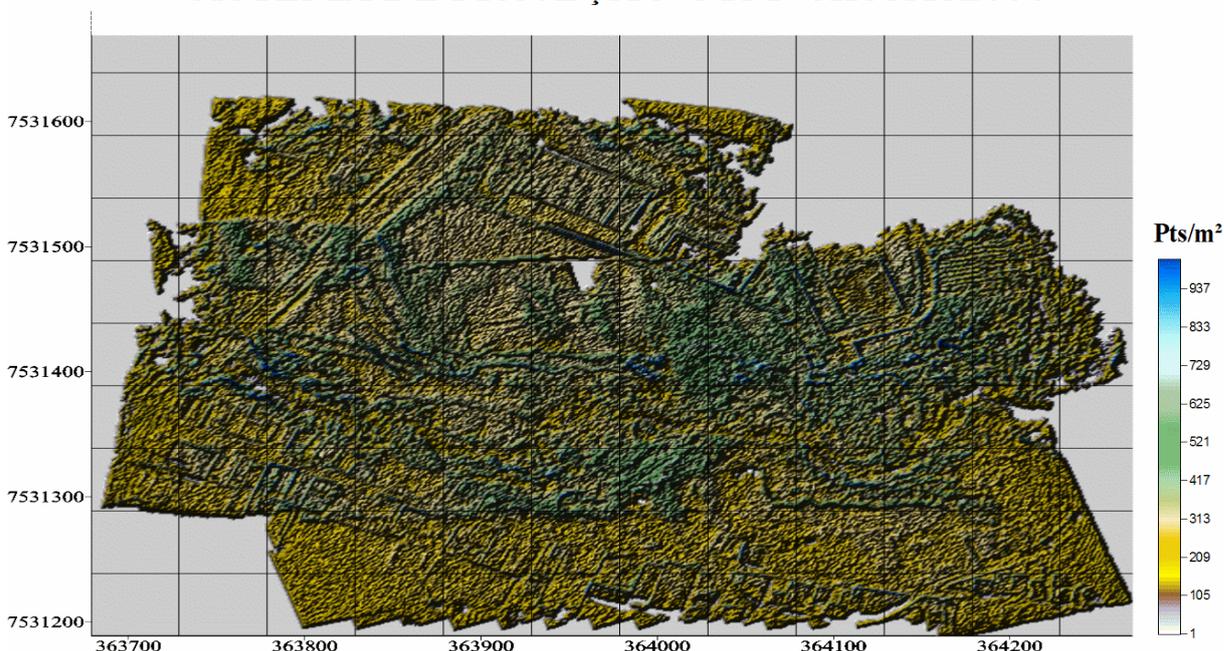


Figura 13 - Densidade da nuvem de pontos para o nível de reconstrução tridimensional alto (*high*)

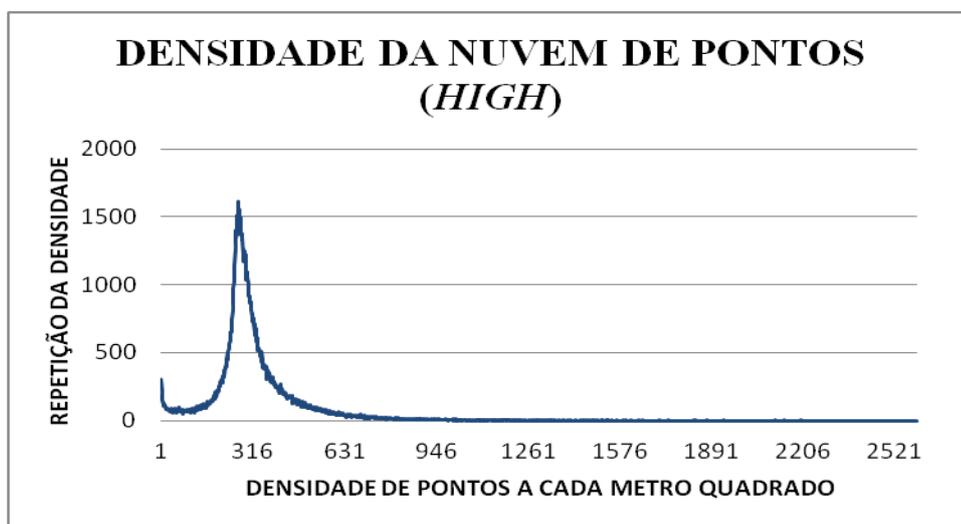


Figura 14 - Frequência da densidade da nuvem de pontos por metro quadrado com nível de reconstrução tridimensional alto (*high*)

As figuras 15 e 16 se referem ao processo de densificação da nuvem de pontos em seu nível mais alto (*ultrahigh*). Ao interpretar o gráfico (Figura 16) pode-se observar que a maior densidade foi de 1774 pontos por metro quadrado. As maiores incidências de pontos por metro quadrado ocorreram entre a faixa de 1 a 16 e 153 a 388 pontos por metro quadrado. Observa-se, tanto na imagem como no gráfico, que a média para esta nuvem de pontos foi de 240 pontos por metro quadrado. Para esse processo (*ultrahigh*) de geração da nuvem de pontos o *software* gastou 3 dias e 2 horas.

DENSIFICAÇÃO DA NUVEM DE PONTOS - ULTRAHIGH
SISTEMA DE PROJEÇÃO UTM - SIRGAS2000

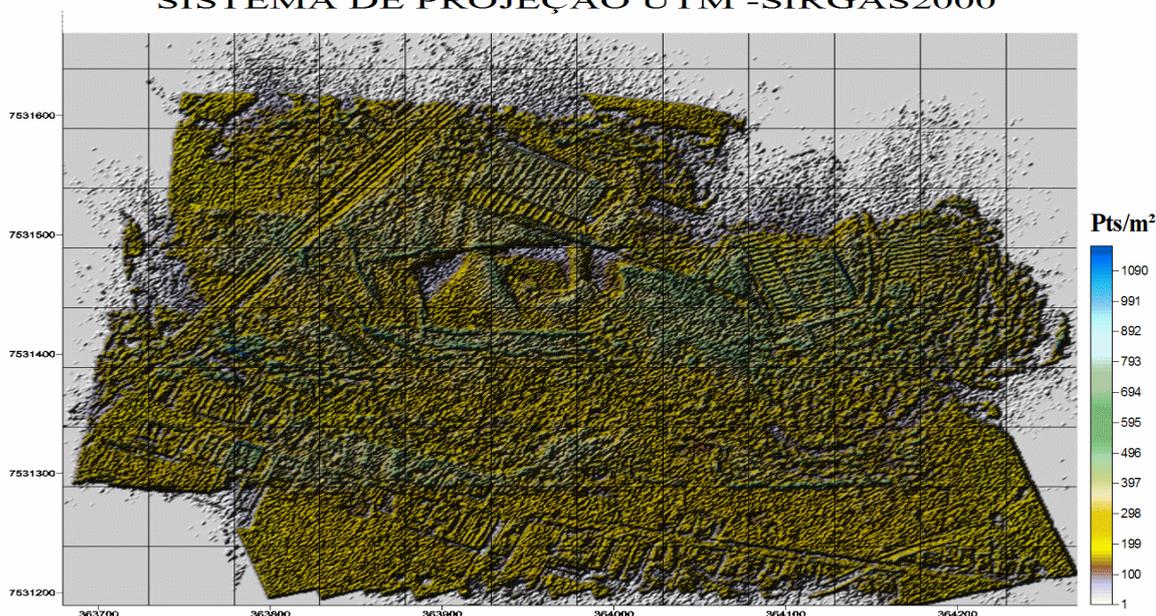


Figura 15 - Densidade da nuvem de pontos para o nível de reconstrução tridimensional super alto (*ultrahigh*)

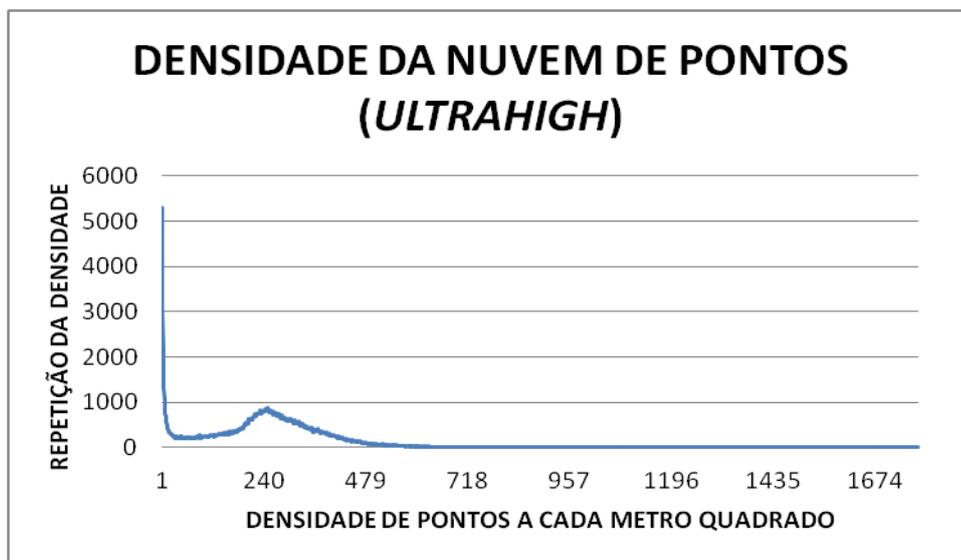


Figura 16 - Frequência da densidade da nuvem de pontos por metro quadrado com nível de reconstrução tridimensional super alta (*ultrahigh*)

5.2.1 VERIFICAÇÃO DA ESCALA ADEQUADA FINAL E DA ACURÁCIA ABSOLUTA

A partir dos 10 pontos de controles do projeto, é possível gerar o RMS (erro médio quadrático) que indica a acurácia absoluta, pois não utiliza a média, resultando em um valor absoluto em relação a referência, portanto consiste em analisar o grau de concordância entre o valor estimado e o valor de referência, o que é denominado de acurácia absoluta (GALO, 1994). A Tabela 19 demonstra os RMS calculados pelo *PhotoScan*.

Tabela 19 – Erro Médio Quadrático do projeto

PONTO	X erro (mm)	Y erro (mm)	Z erro (mm)	Total (mm)	Imagem (pix)
C1	-0,080	-2,252	-0,457	2,300	0,153
C2	0,851	3,171	1,734	3,713	0,146
C3	-5,873	-1,773	4,035	7,343	0,331
C4	-2,384	-0,419	-0,116	2,423	0,065
C5	-4,507	-3,316	-5,721	8,003	0,261
C6	0,370	10,315	9,073	13,743	0,503
C7	-5,474	-1,903	1,349	5,950	0,271
C8	-9,202	3,656	4,013	10,684	0,464
C9	-0,925	-1,591	-0,479	1,902	0,318
C10	0,531	5,122	1,268	5,304	0,449
Total	4,209	4,262	3,928	7,163	0,317

Fonte: Autora

Pode-se observar na Tabela 19, que o RMS total para as componentes X, Y, Z, que representam as coordenadas planas UTM (E, N, h), foi de aproximadamente 7 milímetros, e o erro em *pixels* de 0,317.

De acordo com os dados gerados, temos que o GSD para as imagens digitais trabalhadas é de 3,2 centímetros (para realização dos cálculos do GSD ver Kugler (2008)), utilizando-se a equação 3 resulta-se num denominador de escala correspondente a 160, podendo-se adotar a escala de 1:200 como sendo ideal para a representação de todos os elementos pertencentes a área de levantamento, que está de acordo com a *American Society for Photogrammetry & Remote* (ASPRS), Tabela 20.

Conforme estabelece a Norma da ASPRS (2014), o valor de classificação para produtos cartográficos digitais são as Classes I, II e III, dos quais considerando o experimento realizado, onde o GSD (Tamanho do pixel no terreno) alcançado foi de 3,2 centímetros (obtido pelo *software*), temos que a escala topográfica sugerida está de acordo com a

calculada pela equação 3, atendendo as especificações para se enquadrar na classe I, considerando a precisão planimétrica do projeto (Tabela 20).

Tabela 20 - Valores de precisão planimétrica para dados digitais

Common Orthoimagery Pixel Sizes	Associated Map Scale	ASPRS 1990 Accuracy Class	Associated Horizontal Accuracy According to Legacy ASPRS 1990 Standard	
			RMSE _x and RMSE _y (cm)	RMSE _x and RMSE _y in terms of pixels
0.625 cm	1:50	1	1.3	2-pixels
		2	2.5	4-pixels
		3	3.8	6-pixels
1.25 cm	1:100	1	2.5	2-pixels
		2	5.0	4-pixels
		3	7.5	6-pixels
2.5 cm	1:200	1	5.0	2-pixels
		2	10.0	4-pixels
		3	15.0	6-pixels
5 cm	1:400	1	10.0	2-pixels
		2	20.0	4-pixels
		3	30.0	6-pixels
7.5 cm	1:600	1	15.0	2-pixels
		2	30.0	4-pixels
		3	45.0	6-pixels
15 cm	1:1,200	1	30.0	2-pixels
		2	60.0	4-pixels
		3	90.0	6-pixels
30 cm	1:2,400	1	60.0	2-pixels
		2	120.0	4-pixels
		3	180.0	6-pixels

Fonte: ASPRS (2014)

No produto final para que um objeto fique bem definido, é necessário que este seja representando no mínimo por 3 pixels, portanto, para uma escala visual recomenda-se um valor três vezes menor que a escala de projeto calculada. Podendo-se recomendar para as aplicações dos produtos gerados a escala de 1:600.

Para Melo e Pachêco (2004), o bom ajustamento do modelo, se dá com um alcance de RMS inferior a 1 pixel. Para Coelho e Brito (2007) um bom ajustamento é caracterizado por valores empíricos entre 0,3 e 0,4 *pixel*. Obteve-se um valor de RMS em pixel de 0,317, que se enquadra nas duas suposições, afirmando o bom ajustamento referente às precisões do projeto.

5.3 COMPARAÇÕES ENTRE VANT E LIDAR

5.3.1 COMPARAÇÕES DE DENSIDADE GERADAS POR VANT E POR LIDAR

De acordo com os resultados apresentados, pode-se notar que a nuvem de pontos gerada pelo LIDAR se compara às nuvens de pontos gerados pelo VANT, no nível de densificação mais baixo (*lowest*) e baixo (*low*). Nestes níveis a média de pontos por metro quadrado, foi de 5 e 20 pontos, respectivamente. A maior densidade dos sistemas LIDAR encontrado foi de 21,8 do sistema PEGASUS HD500 da empresa OPTECH, que é compatível com a nuvem de pontos gerada no nível *low*.

Enquanto para o nível mais baixo de reconstrução da nuvem de pontos (*lowest*) pelo *PhotoScan*, todos os sistemas LIDAR foram equivalentes em relação a densidade de pontos, observando sempre as configurações necessárias para encontrar determinada densidade, conforme as Tabelas 2 à Tabela 17.

5.3.2 COMPARAÇÕES DA VIABILIDADE ECONÔMICA DE AMBAS TECNOLOGIAS

Informações cedidas pela empresa Esteio Engenharia e Aerolevantamentos S.A. que presta serviços de mapeamento na Microrregião de Curitiba, e TELEDYNE OPTECH empresa Canadense especializada na fabricação dos sistemas LIDAR, relatam que o valor de um aerolevante com sistemas LIDAR varia de acordo com determinados fatores, entre estes podemos destacar as dimensões da área (quanto maior a área, menor o valor por quilômetro quadrado), mobilização (distância entre a área e a base operacional), produto final a ser entregue, local dos serviços e época do ano (condições meteorológicas boas: valores menores, condições meteorológicas ruins: valores maiores), logística (existência de aeroporto próximo a área de interesse) e de combustível, e densidade de pontos por metro quadrado um dos fatores mais relevantes.

De acordo com tais empresas, um equipamento mais básico com altura de voo menor que 1000 metros custa por volta de US\$ 500.000 (quinhentos mil dólares), enquanto um mais sofisticado e mais complexo pode chegar a custar US\$ 1.500.000,00 (um milhão e quinhentos mil dólares), ou até mais dependendo de suas configurações, o que torna um levantamento com este tipo de equipamento caro.

A título de exemplo a empresa Esteio Engenharia e Aerolevantamentos S.A., afirma que o tamanho da área é fator importante, o custo por quilômetro quadrado para se deslocar uma aeronave, equipe e equipamento para executar uma área pequena, do tipo 3, 4, 5 km², é bastante alto da ordem de R\$ 15.000 a R\$ 20.000/km² ou até maiores, enquanto que para mapear uma área grande, 100, 200, 500, 1.000 km², é baixo, de R\$ 1.000 a R\$ 5.000/km².

Sobre o VANT fotogramétrico como este que foi utilizado, seu custo de aquisição, em média, está em torno de R\$ 40.000 (quarenta mil reais), e um aerolevante custa, no mínimo, em torno de R\$ 1.200 (mil e duzentos reais) por voo. Em um caso que o VANT opere a uma altitude de voo de 200 metros, a uma velocidade de 8 metros por segundo, este é capaz de cobrir uma área de até 1 km².

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Analisando todos os resultados pode-se concluir que a nuvem de pontos gerada pelo VANT fotogramétrico, se assemelha com a gerada por sistemas LIDAR, quando se trabalham com os níveis mais baixos de densificação de nuvem de pontos. Nos níveis mais alto de densificação da nuvem de pontos, o VANT se sobressai de maneira grandiosa aos sistemas LIDAR, com ocorrências de mais de 1.000 pontos por metro quadrado, em diversas ocasiões.

Pode-se notar que a densidade da nuvem de pontos no nível mais alto (*ultrahigh*), comparado ao nível alto (*high*), não melhorou sua densificação, apesar de demorado o tempo de processamento (3 dias). Porém não se pode afirmar qual o motivo desse fato. Acredita-se que sua máscara para localização de pontos homólogos esteja muito restrita o que dificulta a localização de pontos semelhantes. Destacando-se que no nível alto (*high*), o usuário consegue uma densidade por metro quadrado de mais de 2.000 pontos, em pouco mais de 15 minutos, o que torna a geração do MDS relativamente muito rápida, contribuindo para o produto final obtido, sem a necessidade de processamento em nível super alto (*ultrahigh*).

Quanto à viabilidade econômica, o VANT também se mostra mais vantajoso, principalmente para áreas com extensões menores, pois para sobrevoar, por exemplo, uma mesma área de 5 km², o custo com o VANT está em torno de R\$ 6.000 (seis mil reais) e com o LIDAR em torno de R\$ 20.000 (vinte mil reais). Entretanto para áreas com extensões muito maiores, não é recomendando, visto que para cobrir toda a área, seria preciso vários aerolevantamentos com VANT, conseqüentemente, o que demandaria muito tempo e mais custos.

Portanto, admite-se neste trabalho, que ficaram evidentes as grandes vantagens do VANT fotogramétrico sobre os sistemas LIDAR quando tratamos da densificação da nuvem de pontos, da viabilidade econômica em relação à pequenas áreas de levantamento, e à acurácia absoluta que foi mantida.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. **IS N° 21-002: INSTRUÇÃO SUPLEMENTAR.** Brasil: Diário Oficial da União, 2012. Disponível em: <https://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/iac-e-is/is/is-21-002a/@@display-file/arquivo_norma/IS_21-002A.pdf>. Acesso em: 05 jun. 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. **REGULAMENTO BRASILEIRO DA AVIAÇÃO CIVIL. Requisitos Operacionais: Operações Complementares e Por Demanda.** Brasil, BR, 25 ago. 2010. Disponível em: <http://www2.anac.gov.br/transparencia/pdf/bps33s/RBAC_135.pdf>. Acesso em: 05 set. 2016.

ALMEIDA, Igor de Carvalho. **Estudo sobre o uso de Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) para mapeamento aéreo com fins de elaboração de projetos viários.** 2014. 149 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2014. Disponível em: <files.labtopope.webnode.com/.../Estudo_veiculo_aereo_nao_tripula...>. Acesso em: 25 jun. 2016.

ASPRS. **Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data.** 1 ed., 2014. Disponível em: <<https://www.asprs.org/pad-division/asprs-positional-accuracy-standards-for-digital-geospatial-data.html>>. Acesso em: 15 set. 2016.

BRANDALIZE, Maria Cecília Bonato. **A qualidade cartográfica dos resultados do laserscanner aerotransportado.** 2004. 271 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/.../207885.pdf?...>>. Acesso em: 20 jun. 2016.

BORGES, Paulo Augusto Ferreira. **Posicionamento pelo GNSS.** Inconfidentes: IFSULDEMINAS, 2015. Color.

BOTELHO, Mosar Faria. **Modelagem tridimensional de edificações usando dados do sistema laser scanner e imagem orbital de alta resolução espacial.** 2007. 144 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

COELHO, L; BRITO, N. J. 2007. **FOTOGRAMETRIA DIGITAL.** Universidade do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, Brasil: 2009.

DALBELO, Luiz. **VANT e Suas Aplicações.** São Paulo: Santiago & Cintra, 2013. Color. Disponível em: <mundogeoconnect.com/2013/arquivos/.../19_jun-cd-luiz-dalbelo.pdf>. Acesso em: 25 jun. 2016.

FALAT, Denise Rodbard. **Perfilamento a LASER para detecção de construções clandestinas e determinação de altura de edificações.** Esteio Engenharia e Aerelevantamentos S.a., Curitiba, p.01-15, 2005. Disponível em:

<www.esteio.com.br/.../edificacoes_clandestinas-GeoBR2005_artigo.pdf>. Acesso em: 26 jun. 2016.

FELGUEIRAS, Carlos Alberto. **Análises sobre modelos digitais de terreno em ambiente de sistemas de informações geográficas.** 2015. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/~carlos/trab_cientific/selper8f.pdf>. Acesso em: 13 ago. 2016.

FERREIRA, Alexandre Moreno Richwin. **Avaliação de câmara de pequeno formato transportada por Veículo Aéreo Não Tripulado - VANT, para uso em aerolevantamentos.** 2014. 93 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geociências Aplicadas, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2014. Disponível em: <http://repositorio.unb.br/bitstream/10482/17305/1/2014_AlexandreMorenoRichwinFerreira.pdf>. Acesso em: 23 jun. 2016.

GALO, Maurício; CAMARGO, Paulo de Oliveira. **O uso do GPS no controle de qualidade de cartas.** In: 10 CONGRESSO BRASILEIRO DE CADASTRO TÉCNICO MULTIFINALITÁRIO - COBRAC. 1994, Florianópolis. Proceedings... . Florianópolis: Sc, 1994. p. 41 - 48. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/265208956_Utilizacao_do_GPS_no_controle_de_qualidade_de_cartas>. Acesso em: 10 maio 2016.

GIONGO, Marcos; KOEHLER, Henrique S; MACHADO, Sebastião A; KIRCHNER, Marco M. **LIDAR: princípios e aplicações florestais.** Pesq. Flor. Bras., [s.l.], v. 30, n. 63, p.231-244, 28 out. 2010. Embrapa Florestas. DOI: 10.4336/2010.pfb.30.63.231. Disponível em: <<http://pfb.cnpf.embrapa.br/pfb/index.php/pfb/article/viewFile/148/133>>. Acesso em: 08 ago. 2016.

IBGE. **Noções Básicas de Cartografia.** 2016. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/cartografia/manual_nocoas/representacao.html>. Acesso em: 08 ago. 2016.

JORGE, Lúcio André de Castro; INAMASU, Ricardo Yassushi; CARMO, Rhendrix Borges do. **Desenvolvimento de um VANT totalmente configurado para aplicações em Agricultura de Precisão no Brasil.** 2011. Anais Xv Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Curitiba, p.0399-0406, 30 abr. 2011. Disponível em: <www.dsr.inpe.br/sbsr2011/files/p1484.pdf>. Acesso em: 28 jul. 2016.

KUGLER, Angela. **Qual a Escala de Um Voo Digital?** Curitiba: Esteio Engenharia e Aerolevantamentos S.A., 2008. Disponível em: <<http://www.esteio.com.br/downloads/2008/EscalaDigital.pdf>>. Acesso em: 10 jun. 2016.

LONGHITANO, George Alfredo. **VANTS para sensoriamento remoto: aplicabilidade na avaliação e monitoramento de impactos ambientais causados por acidentes com cargas perigosas.** 2010. 148 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestre em Engenharia, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010. Disponível em: <www.teses.usp.br/teses/.../Dissertacao_George_Alfredo_Longhitano.pdf>. Acesso em: 25 fev. 2016.

MACHADO, Alvaro Muriel Lima. **Extração automática de contornos de edificações utilizando imagem gerada por câmara digital de pequeno formato e dados LIDAR.** 2006.

213 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós- Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná dspace.c3sl.ufpr.br/dspace/bitstream/handle/1884/3923/tese.pdf?...1, Curitiba, 2006. Disponível em: dspace.c3sl.ufpr.br/dspace/bitstream/handle/1884/3923/Tese.pdf?...1>. Acesso em: 22 jun. 2016.

MEDEIROS, Fabricio Ardais. **Desenvolvimento de um Veículo Aéreo Não Tripulado para aplicação em agricultura de precisão.** 2007. 122 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007. Disponível em: http://w3.ufsm.br/laser/images/Fabricio_Ardais_Medeiros_Dissertacao.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2016.

MELO, Ivan D. F; PACHÊCO, Admilson P.. **Aspectos da correção geométrica de imagens orbitais.** Pernambuco: UFPE, 2004. Disponível em: <https://www.ufpe.br/cgtg/ISIMGEO/CD/html/.../Artigos/f048.pdf>>. Acesso em: 20 set. 2016.

MONICO, João Francisco Galera. **Posicionamento pelo GNSS.** 2. ed. São Paulo: Unesp, 2008. 476 p.

MORI, Anderson Moraes. **O uso de sistema inercial para apoiar a navegação autônoma.** 2013. 180 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestre em Ciências, Engenharia e Transporte, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013. Disponível em: www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde.../Dissertacao_Mori.pdf>. Acesso em: 24 fev. 2016.

PALERMO, Rodrigo de Avila; LEITE, Taís Correia. **Integração de levantamento fotogramétrico aéreo com o uso de VANT e levantamento fotogramétrico terrestre para o mapeamento tridimensional das ruínas de São Miguel das Missões.** 2013. 174 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Cartográfica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013. Disponível em: www.lume.ufrgs.br/handle/10183/77752?locale=pt_BR>. Acesso em: 06 ago. 2016.

PHOTOSCAN, Agisoft. **PHOTOSCAN PRESENTATION.** Disponível em: <http://www.agisoft.com/>>. Acesso em: 16 jul. 2016.

SCHIMALESKY, Valmir. **Avaliação da qualidade da informação altimétrica derivada da varredura a laser em uma região coberta por vegetação: um estudo de caso.** 2007. 79 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal de Paraná, Curitiba, 2007. Disponível em: <http://livros01.livrosgratis.com.br/cp107111.pdf>>. Acesso em: 14 ago. 2016.

SILVA, Cristiano Alves; DUARTE, Cynthia R; SOUTO, Michael V. S; SANTOS, André L. S; AMARO, Venerando E; BICHO, Cristina P; SABADIA, José A. B. **Avaliação da acurácia do cálculo de volume de pilhas de rejeito utilizando VANT, GNSS e LIDAR.** Boletim Ciências Geodésicas, Curitiba, v. 22, n. 1, p.73-94, mar. 2016.

TANAKA, Edson M; ANDRADE, André G; GAWSKI, Maurício; COLETTA, Pedro C. D. **Validação de levantamento planialtimétrico realizado pelo Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) - sensefly na cultura de cana-de-açúcar.** Pompeia, SP, 2013.

Disponível em: < <http://docplayer.com.br/14631248-Validacao-de-levantamento-planialtimetrico-realizado-pelo-veiculo-aereo-nao-tripulado-vant-sensefly-na-cultura-de-cana-de-acucar.html>>. Acesso em: 15 jul. 2016.

TEDESCO, Angelica Nogueira de Souza; TONON, Tamires Lopes; MARTINS, Wanessa Cristina. **Obtenção de imagem tridimensional (3d) por Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) em faixa de dutos.** Espírito Santo: Instituto Federal do Espírito Santo, 2013. Disponível em: <http://www.cartografia.org.br/cbc/trabalhos/4/528/CT04-84_18351425.pdf>. Acesso em: 25 fev. 2016.

TEMBA, Plínio. **Fundamentos da Fotogrametria.** Belo Horizonte: UFMG, 2000. Disponível em: <<http://csr.ufmg.br/geoprocessamento/publicacoes/fotogrametria.pdf>>. Acesso em: 10 maio 2016.

VIDAL, Augusto Manuel Fonseca. **Extração e avaliação de geo-informação pelo uso de imagens adquiridas por Veículos Aéreos Não Tripulados.**2013. 59 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Geográfica, Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto., Porto, 2013. Disponível em: <sigarra.up.pt/fcup/pt/publs_pesquisa.show_publ_file?pct_gdoc_id...>. Acesso em: 06 ago. 2016.