

## **Fotogrametria com VANT aplicada em estudos ambientais rodoviários**

## **Photogrammetry with UAV applied to environmental road studies**

DOI:10.34117/bjdv8n2-426

Recebimento dos originais: 07/01/2022

Aceitação para publicação: 25/02/2022

### **Silvio Ricardo Santos Ascensão**

Mestre em Recursos Naturais

Instituição: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT)

Endereço: Rua:Antônio Maria Coelho, 3099 - Jardim dos Estados, Campo Grande - MS  
Brasil

E-mail: riascencia@gmail.com

### **Henrique Lopes Siqueira**

Mestre em Tecnologias Ambientais

Instituição: Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, Faculdade de Engenharia,  
Arquitetura e Urbanismo e Geografia

Endereço: Rua:Antônio Maria Coelho, 3099 - Jardim dos Estados, Campo Grande - MS  
Brasil

E-mail: henriquesiqueira.eng@gmail.com

### **Márcio Santos Araújo**

Mestre em Recursos Naturais

Instituição: Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, Faculdade de Engenharia,  
Arquitetura e Urbanismo e Geografia

Endereço: Avenida Costa e Silva, s/n - Bairro Universitário - Campo Grande/MS -  
Brasil - CEP: 79070-900

E-mail: marciogeoms@gmail.com

### **Maurício de Souza**

Mestre em Sensoriamento Remoto

Instituição: Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, Faculdade de Engenharia,  
Arquitetura e Urbanismo e Geografia

Endereço: Avenida Costa e Silva, s/n - Bairro Universitário - Campo Grande/MS -  
Brasil - CEP: 79070-900

E-mail: mauriciomdseng@gmail.com

### **Edson Takashi Matsubara**

Doutor em Ciências da Computação e Matemática Computacional

Instituição: Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, Faculdade de Computação

Endereço: Avenida Costa e s/n - Bairro Universitário - Campo Grande/MS - Brasil -  
CEP:79070-900

E-mail: edsontm@facom.ufms.br

**José Marcato Junior**

Doutor em Ciências Cartográficas

Instituição: Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, Faculdade de Engenharia,  
Arquitetura e Urbanismo e Geografia

Endereço: Avenida Costa e Silva, s/n - Bairro Universitário - Campo Grande/MS -  
Brasil - CEP:79070-900

E-mail: jose.marcato@ufms.br

**RESUMO**

Com a finalidade de se investigar a aplicação da fotogrametria com VANT no âmbito de estudos técnicos e ambientais em rodovias, relacionadas às zonas livres, foram realizadas coletas de imagens com um quadricóptero e sensor embarcados em um veículo terrestre. Os objetivos específicos foram avaliar os resultados de (i) estimativa do diâmetro à altura do peito (DAP) e, respectivamente, a cada árvore selecionada, a (ii) estimativa de sua distância ao bordo da pista, estimativas essas oriundas de uma nuvem de pontos tridimensional gerada a partir das imagens oblíquas terrestres obtidas a curta distância. Para se efetivar as comparações das estimativas supracitadas, foram coletados os valores referentes à verdade de campo usando-se métodos e equipamentos tradicionais. Os resultados das comparações entre os dados estimados através da reconstrução 3D e daqueles pelos métodos convencionais, no âmbito do DAP e da distância ao bordo da pista, se mostraram promissores, com correlação estatística fortíssima e RMSE de 2,62 cm e 8 cm, respectivamente. Conquanto seja importante outros estudos com maior número de indivíduos envolvidos, os resultados apontam para uma possibilidade de aplicação, mesmo sendo um nicho pouco explorado por pesquisadores.

**Palavras-chave:** rodovias, fotogrametria, inventário florestal, curta distância, vant.

**ABSTRACT**

In order to investigate the application of UAV photogrammetry in the context of technical and environmental studies on highways, related to free areas, image collection was performed with a quadricopter and sensor on board a ground vehicle. The specific objectives were to evaluate the results of (i) the estimate of diameter at breast height (DBH) and, respectively, for each selected tree, (ii) the estimate of its distance from the edge of the roadway. To make comparisons of the above estimates, the field truth values were collected using traditional methods and equipment. The results of the comparisons between the data estimated by 3D reconstruction and those estimated by conventional methods, in terms of DAP and distance to the runway edge, were promising, with a very strong statistical correlation and RMSE of 2.62 cm and 8 cm, respectively. While further studies with a larger number of individuals involved are important, the results point to a possibility of application, even though this is a niche little explored by researchers.

**Keywords:** roads, photogrammetry, forest inventory, short distance, uav.

**1 INTRODUÇÃO**

As administrações rodoviárias têm se deparado com as questões relativas à gestão das suas zonas livres, principalmente relacionados à acidentes. Com efeito, uma grande iniciativa, senão a principal, seria o levantamento dos obstáculos fixos tais quais marcos

quilométricos, placas de sinalização, árvores, postes de serviço, hidrantes, caixas de junção, cercas, telas de brilho, grades de proteção, barreiras, paredes e afloramentos rochosos [1], os quais têm relação com a maior gravidade nos acidentes de saída de pista [2].

Define-se como zona livre a “área lateral à pista de rolamento que seja traspassável, sem obstruções e sem obstáculos fixos, podendo ser utilizada por veículos errantes para recobrar o controle ou chegar a uma parada segura” [3].

Os recursos públicos reservados às rodovias brasileiras estiveram na ordem de 0,6% do Produto Interno Bruto – PIB nacional na década de 1970, passando a menos de 0,2% na década de 1990 e não alcançando 0,4% nos anos 2000 a 2010 [5]. Em consequência dessa redução de investimentos houve perda na manutenção desses ativos, o que provocou a ocorrência de objetos fixos de várias espécies em locais de risco e, nesse bojo, alguns indivíduos arbóreos nativos.

Muitos desses acidentes são fatais e há indícios de relação direta entre o número elevado de mortes e a presença de árvores nessa faixa [6]. Dados da Polícia Rodoviária Federal apontam um número de 4046 colisões em objetos estáticos no ano de 2019 nas rodovias federais brasileiras [7]. Nessa mesma linha, uma análise incremental de custo e benefício a respeito da eficácia de alternativas de tratamento de segurança em acidentes que envolviam colisões em árvores nos estados americanos de Kansas e Nebraska demonstrou que a retirada de árvores é a alternativa mais segura e primária de solução desde que não se tenha outros obstáculos fixos próximos [8].

Por outro vértice, a retirada desnecessária de árvores ataca tanto a economicidade quanto o tema da preservação ambiental, esse último bastante relevante se consideradas as questões de sombreamento, quebra de ventos, sequestro de carbono [9], acrescentando-se ainda as incertezas sobre o sequestro de carbono em florestas tropicais, no sentido de quanto esses desmatamentos podem afetar o ciclo de carbono global [10].

São vários os normativos legais brasileiros que abordam o assunto corte de árvores e de forma geral algumas interpretações têm como premissa que “qualquer atividade que envolva a supressão de vegetação nativa depende de autorização, seja qual for o tipo da vegetação e o estágio de desenvolvimento” [11].

Desse modo, o inventário florestal além de ser fundamental ao cumprimento da legislação vigente, para os administradores rodoviários, concorre como o primeiro passo para a análise de viabilidade técnica, econômica e ambiental. Ressalta-se ainda sua importância num âmbito estratégico pois fornece dados sobre estoque de biomassa e suas

alterações, tanto para atividades domésticas dos países, como para outras instituições internacionais, como o *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)* e *Food and Agriculture Organization (FAO)* [12], além do objetivo do conhecimento e investigação do desenvolvimento da vegetação [13].

Entretanto, o trabalho de campo para coleta dos parâmetros dendrométricos necessários para cálculo do volume, especialmente no caso de empreendimentos lineares, como rodovias e ferrovias, utilizando-se os métodos convencionais, requer tempo e recursos [1, 14, 15]. Acrescentam-se ainda as possibilidades dos erros de medição, como lembra [16], tais quais os erros sistemáticos, de estimativa, acidentais e compensantes.

Nesse contexto, como uma tecnologia emergente apresenta-se o sensoriamento remoto e a fotogrametria (SR&F), mais especificamente associados à coleta de imagens por meio de pequenas aeronaves não tripuladas e suas plataformas, chamados VANT (Veículo aéreo não tripulado) ou VARP (Veículo aéreo remotamente pilotado), sucedidas de conveniente uso de programas computacionais apropriados [9, 15, 17-21].

Esse emprego do SR&F não é uma novidade. No início dos anos 1990 imagens de satélite foram usadas para fins de inventário florestal nacional na Finlândia [22], bem como fotografias aéreas oriundas de voos com aviões e equipamentos fotográficos especiais com finalidade de planejamento florestal [23]. Mesmo os voos não tripulados remontam 100 anos, conforme relatos de [15].

O SR se mostra como uma vantagem sem paralelo na investigação ambiental macro ecológica [24]. Contudo, uma abordagem com imagens a curta distância voltada a estimativa do DAP (diâmetro à altura do peito) em árvores próximas às pistas não foi localizada durante a pesquisa. A maioria das pesquisas relacionadas as margens das rodovias empregam a tecnologia móvel de escaneamento laser (*Mobile Laser Scanner - MLS*) [25].

Pesquisas com imagens de satélite (*Forest canopy cover - CC*), métrica amplamente usada para várias aplicações de gerenciamento de recursos naturais [26] ou com a tecnologia LiDAR (*Light Detection And Ranging*) são mais comuns, mas apresentam baixa resolução, no primeiro caso e custos proibitivos no segundo [27, 28], apesar de gerar nuvens de pontos 3D e modelos digitais do terreno por meio de feixe *laser* [29].

Outro aspecto importante tem ligação direta à segurança viária seja pela visibilidade das placas de sinalização ou, como comentado por [30], com a remoção de

arbustos e árvores na beira da estrada, melhora-se a visibilidade tanto do motorista quanto do animal silvestre, evitando-se colisões ou saídas de pista. [31-33].

O objetivo geral desta pesquisa foi investigar o uso da fotogrametria com sensores acoplados em VANT em estudos ambientais no contexto do sistema modal rodoviário. Como primeiro objetivo específico, destaca-se estimar, com o uso da fotogrametria, o parâmetro dendrométrico, qual seja, o DAP, em árvores isoladas que estão na zona livre das rodovias. O segundo objetivo específico, seguindo a premissa da fotogrametria e o método de imageamento com a utilização de VANT, como no primeiro objetivo, foi estimar a distância de cada indivíduo até o bordo da pista.

## **2 TRABALHOS RELACIONADOS**

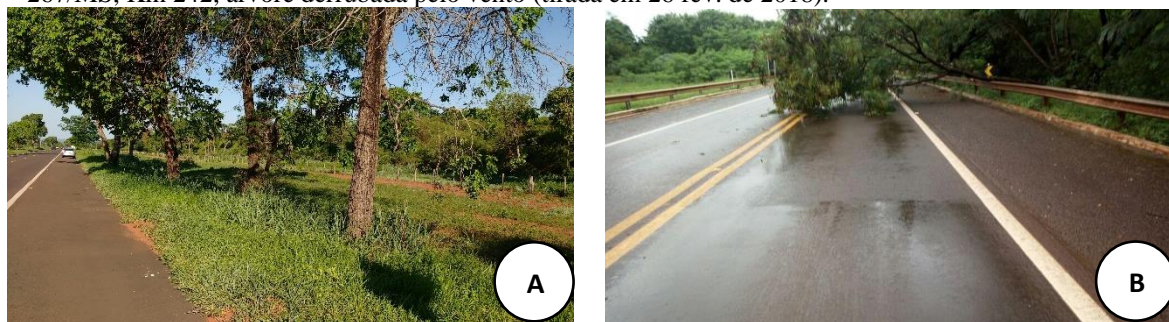
### **2.1 ZONA LIVRE DE OBSTÁCULOS RODOVIÁRIA**

Em relação à espacialização dos indivíduos arbóreos às margens das rodovias e a definição se estão ou não em situação de causarem risco aos seus usuários, é fundamental definir quando ocorrem essas condições. A norma brasileira [3], além de definir as diretrizes de projeto de dispositivos de contenção, trata da largura da zona livre que deve ser prevista em rodovias e vias expressas urbanas com velocidade acima de 60 Km/h.

A citada norma, para a definição dessa largura, leva em consideração três fatores: o Volume Diário Médio (VDM), a declividade lateral do talude do aterro ou corte e a velocidade de projeto, apresentando os valores em uma tabela, os quais variam de 2 a 14 metros. Ainda é fornecida uma fórmula para o cálculo da zona livre de obstáculos quando na parte externa de curvas, majorando-a em função do menor raio de curva.

Embora nos dias atuais ser comum nas rodovias brasileiras a ocorrência de árvores nativas que se desenvolveram na zona livre (Figura 1), os projetos de rodovias devem prever uma zona livre, de forma que [34] determina, para projeto de paisagismo em implantação rodoviária, que as árvores de grande porte devem ser plantadas distantes, no mínimo, 10 metros do bordo da pista.

**Fig. 1** A – Rodovia BR-262/MS Km 440, árvores próximas à pista (21 out. de 2018); B – Rodovia BR-267/MS, Km 242, árvore derrubada pelo vento (tirada em 26 fev. de 2018).



Fonte: O autor (2018).

## 2.2 DENDROMETRIA, DAP E CAP

No que tange ao inventário florestal, apesar da simplicidade do procedimento, os métodos tradicionais foram padronizados e generalizados, podendo causar erros inerentes [35]. Ademais o levantamento por métodos tradicionais, pode ser mais caro e demorado, cabendo ainda lembrar sobre os riscos à equipe envolvida nos serviços [15].

Neste trabalho foi explorada a parte quantitativa do inventário florestal e nesse aspecto a estimativa do volume de árvores individuais é importante [36]. As equações matemáticas são necessárias já que estimam o volume de árvores por meio de medidas simples como o DAP e a altura total de árvores em pé [37]. O DAP é básico para a volumetria e sua determinação é fundamental para outros levantamentos como o de aumento anual de área Basal das árvores (*BAI*, sigla em inglês, unidade em  $\text{cm}^2 / \text{árvore} / \text{ano}$ ), a qual permite o monitoramento e interpretação do crescimento das árvores e seus volumes [38].

Nos países que usam o sistema universal métrico o DAP é medido a 1,30 metros do solo, convencionado desse modo pela conveniência para o uso de medidores e evitar a influência de sapopemas, raízes tabulares muito comuns em espécies tropicais [39]. As medidas podem ser tomadas pela circunferência à altura do peito (CAP), que são menos sensíveis aos erros para o cálculo de volume de madeira [39].

## 2.3 SENSORIAMENTO REMOTO E FOTOGRAMETRIA

Apesar do uso do SR no monitoramento e mapeamento de indicadores de biodiversidade em áreas com acesso difícil, ainda não substitui totalmente os dados de campo. Os levantamentos com o escâner laser aéreo podem identificar altura e densidade de vegetação, mas não conseguem identificar outros atributos importantes, tais quais

altura de vegetação e clareiras. Desse modo, é sugerido o VANT como ferramenta de apoio [40].

O levantamento florestal por SR possui 3 os métodos: escaneamento aéreo a laser, detecção e alcance por rádio (*RADAR*, sigla em inglês) e imagens óticas (satélite ou imagem aérea). Com baixos custos, a partir do uso de VANTs, pode-se adquirir dados 3D de alta qualidade para estimar a biomassa florestal em florestas de pequeno a médio porte ou ainda para amostragem em grandes áreas florestais. [41]

Embora a arte e a ciência da fotogrametria, inicialmente denominada metrofotografia pelo seu inventor Laussedat, em 1851 [17] tenham por muito tempo ficado em segundo plano, os desenvolvimentos tecnológicos recentes como a miniaturização de eletrônicos especializados e seus baixos custos, especialmente drones [14, 15, 41-43], a evolução das câmeras e suas altas resoluções [44], o incremento constante na velocidade computacional [45] além da nova geração de programas acessíveis, que permitem o uso de câmeras comuns para produzirem nuvens de pontos densas com alta resolução espacial, alta precisão geométrica e eficiência [46], trouxeram uma gama de possibilidades de novas aplicações.

Em virtude da importância da forma de processamento das informações para os resultados almejados nesta pesquisa, vale destacar sobre a reconstrução 3D de objetos por fotogrametria, que atualmente é realizado baseado em nuvem de pontos gerada através de técnicas de correspondência densa de imagens, onde a *Structure from Motion (SfM)* [47] e a *Multi-View Stereo (MVS)* [48] são as principais técnicas implementadas [19].

O trabalho aqui exposto segue no mesmo sentido de várias pesquisas que trazem aplicações inovadoras de SR&F como o monitoramento de deslocamento de encostas, medição industrial, análise forense, levantamento de deformação [44], redes de abastecimento de água, eletricidade ou gás [19] e escavação de túneis [49], bem como levantamento da sinalização horizontal rodoviária [50], condição da superfície do pavimento [17, 51, 52], monitoramento ecológico [53], dinâmica dos acidentes rodoviários [18], avaliação de suscetibilidade de rochas em condições de emergência [54], missões de busca e salvamento [56] além de implantações ferroviárias [43] e suas manutenções [20, 57].

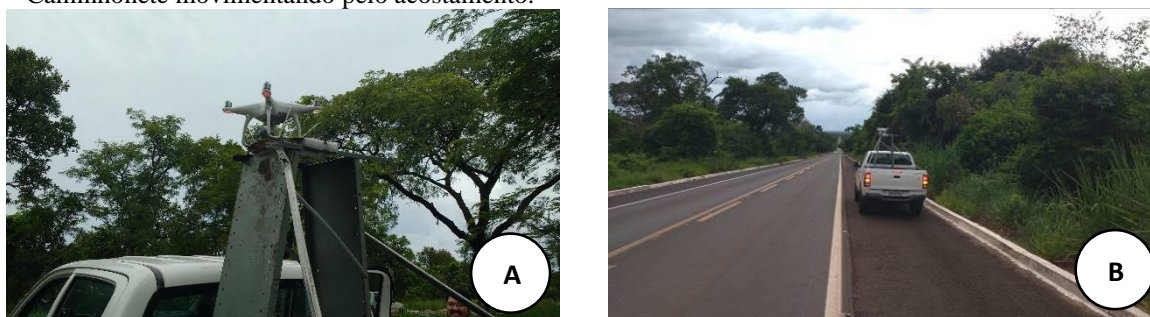
### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 FOTOGRAMETRIA COM VANT APLICADA NA ESTIMATIVA DO DAP E NA ESTIMATIVA DA DISTÂNCIA AO BORDO DA PISTA

##### 3.1.1 Materiais e equipamentos

Preliminarmente a coleta de imagens ocorreria com o voo do drone sobre um segmento selecionado em uma rodovia, contudo, como medida de segurança, optou-se pela execução com o drone embarcado em um veículo terrestre (Figura 2 A e B), indo ao encontro da escolha de [51] em relação ao balão como plataforma para a câmera embarcada.

**Fig. 2 A** - Drone fixado à estrutura metálica montada na carroceria de uma caminhonete (20 mar. de 2019);  
**B** – Caminhonete movimentando pelo acostamento.



Fonte: O autor (2019).

A equipe observou que seriam precisos vários testes até se formatar o método que pudesse alcançar os objetivos. Portanto optou-se pela seleção de um novo local, com as características semelhantes ao perfil de uma rodovia, mas que pudesse ser acessado com mais facilidade, rapidez e envolvesse menores custos. Desse modo, foi selecionado um segmento na Avenida Gury Marques, em Campo Grande/MS, onde as larguras das faixas de rolamento se adequavam às de uma rodovia.

Após 2 coletas preliminares, foram determinadas a altura e velocidades convenientes para, na terceira coleta, se conseguir a geração de uma nuvem de pontos densa o suficiente para os objetivos propostos.

Na coleta das imagens foi utilizado um quadricóptero *Phantom 4*, fabricado pela *DJI*, com 1.380 g (com bateria e hélices) e uma câmera de 12 megapixels, fixado a uma estrutura de um veículo terrestre. A altura da câmera ao solo foi estabelecida à 2,90 m. A interface entre o aparelho fixado externamente e o operador, no interior do veículo, foi feita por meio do rádio controle e *smartphone*, com a instalação do devido aplicativo *DJI GO* versão 4.



A câmera *RGB* embarcada no drone e utilizada neste experimento tinha as seguintes características: sensor CMOS de 1/2.3 polegadas para capturar vídeo (até 4096 x 2160 p em 24fps ou 4K em até 30fps) e imagens com 12 megapíxeis, lentes FOV (*Field Of View*) de 94°, 20 mm e f/2,8 foco infinito, com tamanho máximo de imagens de 4000 x 3000 píxeis.

Essa coleta de imagens ocorreu no dia 14 de maio de 2019, das 14:40 às 15:20. Dia ensolarado, sem nuvens, com a obtenção de 473 imagens, das quais 472 foram utilizadas no processamento. A extensão do segmento foi de 130 metros, em linha reta e havia 20 indivíduos arbóreos.

### 3.1.2 Método

O veículo trafegou pelo acostamento, com velocidades entre 3 e 5 Km/h, com a câmera do drone voltada para o lado oposto da pista, ou seja, os primeiros obstáculos além do acostamento oposto estariam a uma distância aproximada de 10,75 m., no mínimo, corroborando que quanto mais fina a *GSD*, pode-se melhorar a qualidade das características geométricas extraídas das nuvens de pontos [40].

As imagens foram coletadas por disparo manual, com o veículo se deslocando pelo acostamento e com a câmera voltada para o lado oposto. Primeiramente num sentido e depois retornando, na mesma direção, mas no sentido oposto, sempre à 5 Km/h, sem alterar o ângulo da câmera no sentido vertical. Depois alterava-se o ângulo da câmera, entre 6 e 7 graus, e procedia-se com o mesmo formato de coleta. Esse procedimento foi repetido três vezes, ou seja, houve três ângulos diferentes (em relação ao eixo vertical) e para cada ângulo uma “passada” em cada sentido.

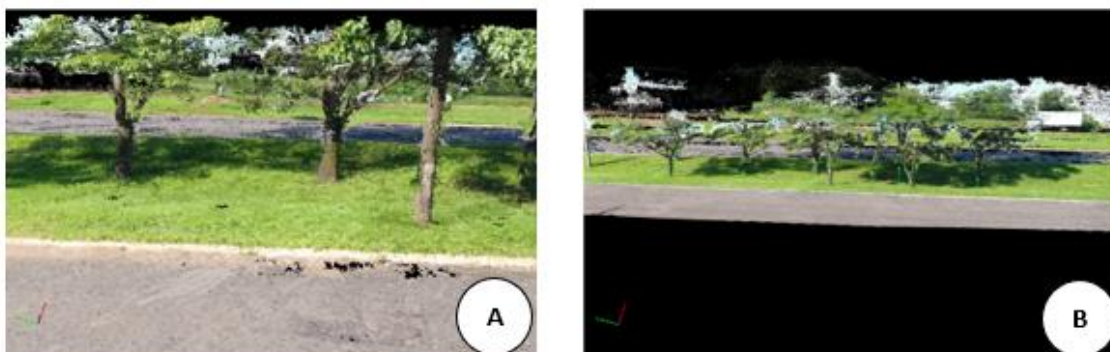
Não foram usados pontos de controle. Para [15] a acurácia relativa tem relação com o *Ground Sampling Distance (GSD)*, e reflete quanto um objeto é bem representado em um modelo digital oriundo de imagens, ou seja, dependerá da resolução da câmera e da altura do voo, ou no nosso caso, da distância do objeto. Já a acurácia absoluta pode ser definida como quanto de proximidade há nos locais no modelo em relação às posições verdadeiras na Terra.

O processamento geométrico das imagens *RGB* para a geração da nuvem de pontos 3D foi realizado pelo *software Pix4D*, versão 4.1.25, sendo possível a geração de uma nuvem de pontos suficientemente densa para a identificação de cada indivíduo arbóreo (Figura 3 A).

Logo no início do procedimento para o processamento, cabe ressaltar que no menu opções de modelo de processamento foi escolhido o *Standard, 3D Models*, que é indicado para imagens oblíquas oriundas de voo ou do solo, mas com alta taxa de sobreposição. As outras opções de processamento, como escala das imagens, foram sempre escolhidas o padrão (*default*).

Desse modo, através da ferramenta *polyline*, marcou-se na nuvem de pontos o objeto de interesse, no caso em tela, cada árvore (ver Figura 3 B). Ato contínuo foi aberta uma janela no *software* que apresenta todas as imagens que serviram para o processamento e que contém aquela árvore objeto da primeira estimativa. O operador então estima a primeira medida a fim de determinar a altura do DAP, ou seja, 1,30, com o mouse, marcando-se o ponto inicial (rente ao solo) e o final. Depois, em cada imagem vai ajustando a linha de altura até que o valor médio estimado seja 1,30, concluindo-se essa primeira fase.

**Fig. 3** -A - Imagens da nuvem de pontos 3D, gerada por meio do programa *Pix4D*, das imagens coletadas em veículo terrestre, a 2,90 m do solo; em 4-B é possível observar as linhas da ferramenta *polyline*.



Uma vez determinada a altura estimada de 1,30 do solo no programa computacional, na qual se deve proceder a medição do DAP, inicia-se novamente o procedimento de marcar a *polyline*, início e fim, porém agora, no sentido horizontal, exatamente no fim da altura de 1,30, nas extremidades visíveis nas imagens do caule da árvore.

Em relação às estimativas de distância das árvores ao bordo da pista, através do mesmo processamento geométrico das imagens realizadas pelo *software Pix4D* e da mesma nuvem de pontos 3D foi possível estimar a distância da geratriz do caule até o bordo da pista (face externa do meio fio), através da utilização da ferramenta *polyline*.

O procedimento de predição desta distância foi análogo ao descrito para estimar o DAP, apenas com a diferença que o ajuste feito nas imagens da ferramenta *polyline* se

ateve ao ponto de contato solo x tronco e ao bordo do meio fio, de forma que essa linha fosse aproximadamente perpendicular ao eixo longitudinal da via considerada.

### 3.1.3 Coleta dos dados de comparação

Realizada no dia 12 de junho de 2019, entre as 15:00 e 16:30 horas. A leitura da circunferência à altura do peito (1,30 m) foi feita por meio de uma trena longa em fita de fibra de vidro de 30 metros, com graduação em milímetro, a qual foi usada também para medição da distância do indivíduo arbóreo ao meio fio, conforme Figura 4 (A, B, C e D).

**Fig. 4** A - O CAP foi medido à 1,30 metros do solo; B, C e D - Detalhe das coletas das distâncias ao bordo da pista, que foram medidas a partir da base do tronco de cada árvore, na face mais próxima em relação a pista até a face externa do meio fio, ou seja, limítrofe com a pista.



Fonte: O autor (2019).

Sobre as distâncias das árvores ao bordo da pista, acrescenta-se que como parâmetro foi tomada sempre a distância da geratriz do tronco próximo do solo até a face externa do meio fio, ou seja, a lateral do meio fio mais próximo à pista.

## 4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

### 4.1 FOTOGRAMETRIA COM VANT APLICADA NA ESTIMATIVA DO DAP

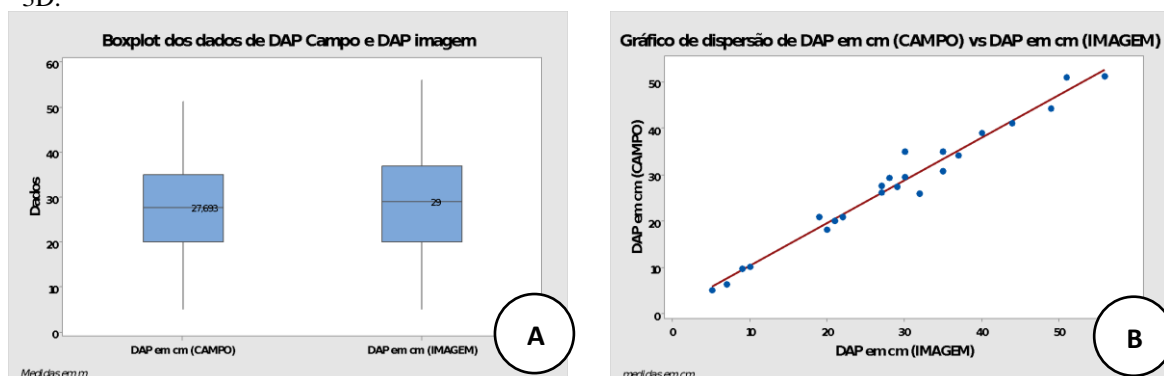
Os diâmetros estimados por meio do software *Pix4D* foram comparados com aqueles medidos de forma convencional e apresentados à Tabela 1.

**Tabela 1** Lista com a nomenclatura adotada para cada árvore e seus respectivos DAPs, já calculados através das medidas de campo dos CAPs. Também são apresentados em vermelho as estimativas de DAP, realizadas por meio da nuvem de pontos gerada pelo *software Pix4D*

Árvores	Verdade de Campo				Estimativa			
	DAP1 (cm)	DAP2 (cm)	DAP3 (cm)	DAP4 (cm)	DAP1 (cm)	DAP2 (cm)	DAP3 (cm)	DAP4 (cm)
A1	30,9				35,0			
A2	44,2				49,0			
A3	29,6				30,0			
A4	20,8				19,0			
A5	9,9	6,4	5,1	11,9	9,0	7,0	5,0	N.V.
A6	26,1				27,0			
A7	34,1				37,0			
A8	41,1				44,0			
A9	27,4				29,0			
A10	10,2				10,0			
A11	35,0				35,0			
A12	21,0	20,1			22,0	21,0		
A13	50,9				51,0			
A14	25,9				32,0			
A15	27,7				27,0			
A16	29,3				28,0			
A17	51,2				56,0			
A18	18,1				20,0			
A19	39,0				40,0			
A20	35,0				30,0			

Para todos os cálculos estatísticos, através do *software* estatístico *Minitab* versão 17.1.0, adotou-se como significância  $p > 0,10$ . Apresenta-se na sequência os boxplots tanto dos dados de verdade de campo quanto daqueles estimados em laboratório, à Figura 5-A. Na Figura 5-B apresenta-se um gráfico de dispersão do DAP medido, calculado a partir do CAP coletado pelo método da fita diamétrica versus o DAP estimado com o uso da nuvem de pontos.

**Fig. 5** A - Boxplot dos DAP coletados em campo por método tradicional e os estimados através da nuvem 3D. B - Gráfico de dispersão dos DAP medidos por método convencional e os dados estimados pela nuvem 3D.



Fonte: Minitab (2019).

Como a amostra tem mais do que 15 pontos de dados, a normalidade não é um problema, devido ao Teorema Central do Limite, o qual estabelece que quando o tamanho

da amostra é suficientemente grande, a distribuição da média amostral pode ser bem aproximada por uma distribuição normal, qualquer que seja a forma da distribuição da população [58].

#### 4.2 FOTOGRAMETRIA COM VANT APLICADA NA ESTIMATIVA DA DISTÂNCIA AO BORDO DA PISTA

Na Tabela 2 pode-se observar as distâncias medidas pelo método convencional bem como as medidas estimadas por meio da nuvem de pontos 3D.

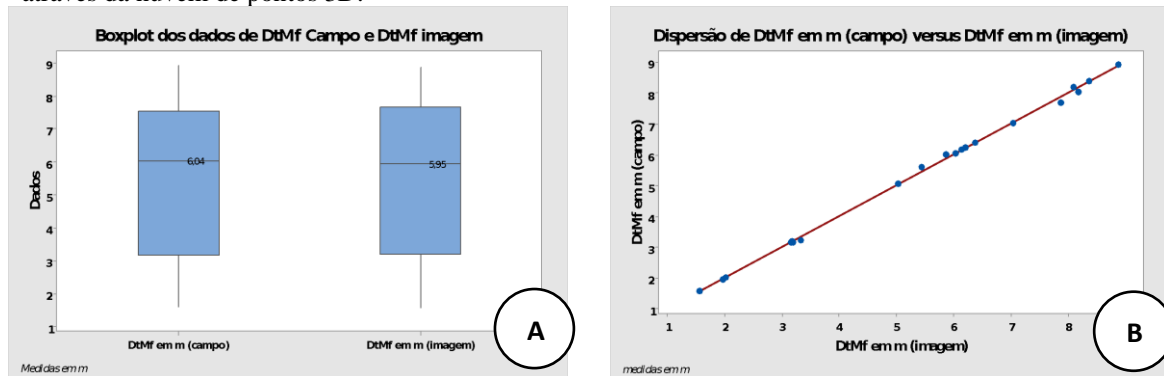
**Tabela 2** Medidas da distância das árvores ao meio fio (DtMf), apresentadas pelo método convencional, com trena e pelo método proposto pela nuvem de pontos 3D.

Árvores	Verdade de Campo	Estimado
	DtMf (m)	DtMf (m)
A1	6,41	6,38
A2	6,18	6,13
A3	2,01	2,01
A4	6,03	5,87
A5	8,20	8,10
A6	3,15	3,16
A7	5,60	5,43
A8	6,05	6,03
A9	1,97	1,96
A10	5,07	5,03
A11	8,93	8,88
A12	1,59	1,55
A13	6,24	6,21
A14	3,21	3,17
A15	8,38	8,36
A16	3,22	3,32
A17	7,02	7,03
A18	3,15	3,19
A19	7,70	7,87
A20	8,04	8,18

Fonte: o autor.

Apresenta-se na sequência um comparativo dos gráficos boxplot, de forma que se verifica a proximidade entre os resultados obtidos pelos métodos tradicional e pela nuvem de pontos das distâncias das árvores ao meio fio (DtMf), à Figura 6-A e à Figura 6-B o respectivo gráfico de dispersão.

**Fig. 6** A - Boxplot dos DtMf coletados por método tradicional e os estimados através da nuvem 3D; B - Gráfico de dispersão dos DtMf medidos pelo método convencional os estimados pelo método proposto, através da nuvem de pontos 3D.



Fonte: Minitab (2019).

## 5 DISCUSSÃO

### 5.1 FOTOGRAMETRIA COM VANT APLICADA NA ESTIMATIVA DO DAP

Os resultados estimados de DAP alcançados por meio da nuvem de pontos são significativamente próximos aos medidos em campo. A correlação  $r$  com o valor de 0,99 se apresenta como fortíssima, apesar da amostra de 23 itens.

Através dos relatórios oriundos da regressão linear, pode-se notar a existência de uma relação entre o DAP medido em campo e o DAP estimado pelas imagens, a qual é estatisticamente significativa, com  $P < 0,001$ , para  $p < 0,10$ .

Em termos do  $R^2$  e  $R^2$  ajustado obteve-se o valor de 97,14% e 97,00%. Ademais a correlação  $r$  ficou em 0,99, o que, olhando apenas para esses dados, poder-se-ia considerar como fortíssima correlação. Entretanto, o tamanho da amostra ( $n = 23$ ) não é grande o suficiente para fornecer uma estimativa precisa da força da relação. Para obter uma estimativa mais precisa, devem ser usadas grandes quantidades de amostras (normalmente 40 ou mais).

Ainda se procedeu como meio de análise dos resultados o cálculo do *Root Mean Square Error (RMSE)* obtendo-se 2,62 centímetros, valor esse que se considera baixo, visto que não foram usados pontos de controle para auxílio da acurácia para as triangulações do processamento das imagens pelo *Pix4D*.

## 5.2 FOTOGRAMETRIA COM VANT APLICADA NA ESTIMATIVA DA DISTÂNCIA AO BORDO DA PISTA

Os resultados estimados da distância de cada elemento arbóreo, sendo estes os mesmos utilizados no ensaio do DAP, até o meio fio (que poderíamos designar como bordo da pista) também ficaram com valores bastante próximos aos medidos pelo método convencional. O *Minitab* calculou como a correlação  $r = 1,00$ , ou seja, fortíssima, em que pese ter-se uma amostra com 20 itens.

Esse resultado demonstra que é possível estimar a distância das árvores próximas à pista, tanto dentro da zona livre como fora dela, tendo como base a faixa pintada do bordo da pista ou o meio fio, com uma boa acurácia, especialmente com a finalidade de tomada de decisão dos gestores.

Em acréscimo, para se determinar entidades estatísticas importantes à análise, procedeu-se a regressão linear, adotando a distância estimada através da nuvem de pontos 3D como variável explicativa (única), obtendo-se, para significância  $p < 0,10$ ,  $P < 0,001$  e o  $R^2$  e  $R^2$  ajustado o mesmo valor de 99,87%. Adicionalmente aos resultados acima, propôs-se a verificação do RMSE, obtendo-se de 0,08 metros.

## 6 CONCLUSÕES

A presente pesquisa apresentou e investigou duas novas propostas relacionadas aos estudos ambientais em rodovias, expostas através dos dois objetivos específicos: (i) estimar, com o uso da fotogrametria, o DAP em árvores isoladas que estão na zona livre das rodovias, a partir do processamento das imagens coletadas por um sensor RGB de um quadricóptero comercial de baixo custo, acoplado à um veículo terrestre, por meio de um programa computacional, qual seja, o *Pix4D*, capaz de reconstruir a superfície 3D e geração de uma densa nuvem de pontos; (ii) estimar, com o uso da fotogrametria, para cada indivíduo arbóreo que fora estimado o DAP, sua distância até o bordo da pista, utilizando-se de método análogo ao anterior, por meio da nuvem de pontos gerada pelo programa computacional.

Os valores referentes à verdade de campo foram coletados usando-se a fita diamétrica e trena. Em relação ao primeiro objetivo, comparando-se os resultados obtidos com a nuvem 3D e aqueles tomados convencionalmente verificou-se uma correlação  $r$  de 0,99, ou seja, fortíssima, com a ressalva da amostra ser composta por 23 itens. Em termos do  $R^2$  e  $R^2$  ajustado obteve-se o valor de 97,14% e 97,00%, ao passo que os resultados obtidos resultaram em um RMSE de 2,62 centímetros.

Quanto ao segundo objetivo, as comparações mostraram uma correlação  $r$  igual a 1,00, uma relação considerada fortíssima, mas ressaltando-se também o fato da amostra ter 20 itens. Calculou-se para  $R^2$  e  $R^2$  ajustado o mesmo valor, na ordem de 99,87%. O RMSE obtido para este ensaio foi de 0,08 metros, o qual considerou-se bastante alinhado aos propósitos almejados.

Os resultados são promissores visto que com o método proposto foi possível obter medidas precisas tanto de variáveis dendrométricas quanto de distâncias das árvores ao bordo da pista. O aprofundamento desses estudos, especialmente no que tange a automação dos processos de estimativa de medidas após a geração da nuvem de pontos tridimensional, no aumento do campo amostral e na coleta de imagens a curta distância que englobe da base ao topo da copa de cada indivíduo arbóreo podem contribuir na aplicabilidade em segmentos rodoviários mais longos.



## REFERÊNCIAS

1. M. Jalayer et al., "Evaluation of Remote Sensing Technologies for Collecting Roadside Feature Data to Support Highway Safety Manual Implementation". *J. Transp. Saf. Secur.*, 2015. **7**(4), p. 345-357 DOI: 10.1080/19439962.2014.976691.
2. C. V. Zegeer et al., "Accident effects of sideslope and other roadside features on two-lane roads". *Transp. Res. Record*, 1988(1195).
3. ABNT, *NBR 15486: Segurança no Tráfego – Dispositivos de contenção viária – Diretrizes*, 2016, Associação Brasileira de Normas Técnicas: Rio de Janeiro. p. 27.
4. J. Fernandez Galarreta, N. Kerle, and M. Gerke, "UAV-based urban structural damage assessment using object-based image analysis and semantic reasoning". *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 2015. **15**(6), p. 1087-1101.
5. M. J. Dávila-FernánDez, "Desindustrialização e o investimento em infraestrutura como instrumento conciliador de uma política industrial base no Brasil". *Brazilian Journal of Political Economy*, 2015. **35**(3), p. 576-600.
6. M. C. Damião et al., "A gravidade dos acidentes com colisões em árvores: um estudo de caso". *Pensamento & Realidade*, 2012. **27**(4).
7. BRASIL. *Acidentes*. Ministério da Justiça e Segurança Pública. Departamento de Polícia Rodoviária Federal. 2019 [cited 2020 16 jan. 2020]; Available from: <https://www.prf.gov.br/portal/dados-abertos/acidentes>.
8. K. A. Lechtenberg et al., "Cost-effective safety treatment of trees on low-volume rural roads". *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2015(2472), p. 194-202.
9. D. Panagiotidis et al., "Determining tree height and crown diameter from high-resolution UAV imagery". *International Journal of Remote Sensing*, 2017. **38**(8-10), p. 2392-2410.
10. R. C. Goodman, O. L. Phillips, and T. R. Baker, "The importance of crown dimensions to improve tropical tree biomass estimates". *Ecological Applications*, 2014. **24**(4), p. 680-698 DOI: doi:10.1890/13-0070.1.
11. CETESB. *Aspectos correlacionados ao licenciamento*. Autorização para Supressão de Vegetação Nativa / Intervenção em Áreas de Preservação Permanente 2018 [cited 2018 21 mar. 2018]; Available from: [http://licenciamento.cetesb.sp.gov.br/cetesb/intervencoes\\_doc\\_nativa.asp](http://licenciamento.cetesb.sp.gov.br/cetesb/intervencoes_doc_nativa.asp).
12. K. D. Johnson et al., "Integrating LIDAR and forest inventories to fill the trees outside forests data gap". *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015. **187**(10) DOI: 10.1007/s10661-015-4839-110.1029/2011jg001930.
13. R. d. P. Salomão, M. F. F. d. Silva, and N. d. A. Rosa, "Inventário ecológico em floresta pluvial tropical de terra firme, Serra Norte, Carajás, Pará". 1988.

14. J. F. Reinoso et al., "Cartography for Civil Engineering Projects: Photogrammetry Supported by Unmanned Aerial Vehicles". *Iran. J. Sci. Technol.-Trans. Civ. Eng.*, 2018. **42**(1), p. 91-96 DOI: 10.1007/s40996-017-0076-x.
15. A. Kwasniak and A. Kerezman, "Drones in Transportation Engineering: A Discussion of Current Drone Rules, Equipment, and Applications". *ITE J.-Inst. Transp. Eng.*, 2017. **87**(2), p. 40-43.
16. O. J. d. Campos, *Cubagem de árvores*, in *Centro de Ciências Físicas e Matemáticas* 2014, Universidade Federal de Santa Catarina: Florianópolis - SC. p. 87.
17. M. Ahmed, C. T. Haas, and R. Haas, "Toward low-cost 3D automatic pavement distress surveying: The close range photogrammetry approach". *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2011. **38**(12), p. 1301-1313 DOI: 10.1139/111-088.
18. A. Morales et al., "Energy analysis of road accidents based on close-range photogrammetry". *Remote Sensing*, 2015. **7**(11), p. 15161-15178 DOI: 10.3390/rs71115161.
19. F. Cigna et al., "Mapping Ground Instability in Areas of Geotechnical Infrastructure Using Satellite InSAR and Small UAV Surveying: A Case Study in Northern Ireland". *Geosciences*, 2017. **7**(3) DOI: 10.3390/geosciences7030051.
20. G. Gabara and P. Sawicki, "A new approach for inspection of selected geometric parameters of a railway track using image-based point clouds". *Sensors (Switzerland)*, 2018. **18**(3), p. 1-16 DOI: 10.3390/s18030791.
21. S. Minaeian, J. Liu, and Y. J. Son, "Effective and Efficient Detection of Moving Targets from a UAV's Camera". *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2018. **19**(2), p. 497-506 DOI: 10.1109/tits.2017.2782790.
22. E. Tomppo and M. Katila. "Satellite image-based national forest inventory of finland for publication in the igarss' 91 digest". in *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1991. IGARSS'91. Remote Sensing: Global Monitoring for Earth Management., International.* 1991. 3. p. 1141-1144. IEEE.
23. J. Hyypä et al., "Accuracy comparison of various remote sensing data sources in the retrieval of forest stand attributes". *Forest Ecology and Management*, 2000. **128**(1), p. 109-120 DOI: [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(99\)00278-9](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(99)00278-9).
24. C. B. Liu et al., *Monitoring remediation of temporary land use in road construction using remote sensing technique*, in *2014 Third International Workshop on Earth Observation and Remote Sensing Applications*, Q. Weng, et al., Editors. 2014, IEEE: New York. p. 185-189.
25. C. Cabo et al., "An Algorithm for Automatic Road Asphalt Edge Delineation from Mobile Laser Scanner Data Using the Line Clouds Concept". *Remote Sensing*, 2016. **8**(9) DOI: 10.3390/rs8090740.

26. O. S. Ahmed, S. E. Franklin, and M. A. Wulder, "Integration of Lidar and Landsat Data to Estimate Forest Canopy Cover in Coastal British Columbia". *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2014. **80**(10), p. 953-961 DOI: 10.14358/pers.80.10.953.
27. J. I. Rejas et al., "Environment mapping using a 3D laser scanner for unmanned ground vehicles". *Microprocessors and Microsystems*, 2015. **39**(8), p. 939-949 DOI: 10.1016/j.micpro.2015.10.003.
28. H. T. Berie and I. Burud, "Application of unmanned aerial vehicles in earth resources monitoring: focus on evaluating potentials for forest monitoring in Ethiopia". *European Journal of Remote Sensing*, 2018. **51**(1), p. 326-335.
29. M. I. Smedley, R. Paulson, and A. Tucker, "Remote sensing for highway management of landslides". *Proc. Inst. Civil Eng.-Geotech. Eng.*, 2009. **162**(3), p. 141-150 DOI: 10.1680/geng.2009.162.3.141.
30. M. P. Huijser and A. V. Kociolek, "Wildlife-vehicle collision and crossing mitigation measures: a literature review for Blaine County, Idaho". *Western Transportation Institute, Montana State University, Bozeman*, 2008.
31. V. Jaren et al., "Moose-train collisions: the effects of vegetation removal with a cost-benefit analysis". *Alces*, 1991. **27**(1), p. 93-99.
32. S. Lavsund and F. Sandegren, "Moose-vehicle relations in Sweden: a review". *Alces*, 1991. **27**, p. 118-126.
33. H. P. Andreassen, H. Gundersen, and T. Storaas, "The effect of scent-marking, forest clearing, and supplemental feeding on moose-train collisions". *The Journal of Wildlife Management*, 2005. **69**(3), p. 1125-1132.
34. I. d. P. R.-. IPR, *Instruções de proteção ambiental das faixas de domínio e lindeiras das rodovias federais*, D.N.d.I.d. Transportes, Editor 2005, IPR: Rio de Janeiro. p. 161.
35. J. Morgenroth and C. Gomez, "Assessment of tree structure using a 3D image analysis technique—A proof of concept". *Urban For. Urban Green.*, 2014. **13**(1), p. 198-203 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2013.10.005>.
36. B. Simental-Cano et al., "Species-specific and regional volume models for 12 forest species in Durango, Mexico". *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 2017. **23**(2).
37. U. Dieguez et al., "Dendrometría". *Madrid, España, Mundiprensa*, 2003.
38. E. Cienciala et al., "Discerning environmental factors affecting current tree growth in Central Europe". *Science of the Total Environment*, 2016. **573**, p. 541-554 DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.08.115.
39. J. A. A. da SILVA and F. d. P. Neto, *Princípios básicos de dendrometria* 1979, Recife - PE: UFRPE. 191.

40. N. Saarinen et al., "Assessing Biodiversity in Boreal Forests with UAV-Based Photogrammetric Point Clouds and Hyperspectral Imaging". *Remote Sensing*, 2018. **10**(2) DOI: 10.3390/rs10020338.
41. D. J. Kachamba et al., "Biomass estimation using 3D data from unmanned aerial vehicle imagery in a tropical woodland". *Remote Sensing*, 2016. **8**(11), p. 968.
42. R. P. Breckenridge et al., "Comparison of unmanned aerial vehicle platforms for assessing vegetation cover in sagebrush steppe ecosystems". *Rangeland Ecology and Management*, 2011. **64**(5), p. 521-532 DOI: 10.2111/rem-d-10-00030.1.
43. J. Y. Lin et al. "Monitoring Abandoned Dreg Fields of High-speed Railway Construction with UAV Remote Sensing Technology". in *International Conference on Intelligent Earth Observing and Applications 2015*. 2015. 9808. p. Bellingham: Spie-Int Soc Optical Engineering.
44. M. R. Osman and K. N. Tahar, "3D accident reconstruction using low-cost imaging technique". *Advances in Engineering Software*, 2016. **100**, p. 231-237 DOI: 10.1016/j.advengsoft.2016.07.007.
45. H. J. Miller and S. L. Shaw, "Geographic Information Systems for Transportation in the 21st Century". *Geography Compass*, 2015. **9**(4), p. 180-189 DOI: doi:10.1111/gec3.12204.
46. R. Beger et al., "Data fusion of extremely high resolution aerial imagery and LiDAR data for automated railroad centre line reconstruction". *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2011. **66**(6), p. S40-S51 DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2011.09.012.
47. S. Ullman, "The interpretation of structure from motion". *Proceedings of the Royal Society of London. Series B. Biological Sciences*, 1979. **203**(1153), p. 405-426.
48. S. M. Seitz et al. "A comparison and evaluation of multi-view stereo reconstruction algorithms". in *2006 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'06)*. 2006. 1. p. 519-528. IEEE.
49. A. Gaich and M. Pötsch, "3D images for data collection in tunnelling - applications and latest developments / 3D-Bilder für die Datenerfassung im Tunnelbau - Anwendung und aktuelle Entwicklungen". *Geomechanik und Tunnelbau*, 2015. **8**(6), p. 581-588 DOI: 10.1002/geot.201500041.
50. B. Soheilian, N. Paparoditis, and D. Boldo, "3D road marking reconstruction from street-level calibrated stereo pairs". *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2010. **65**(4), p. 347-359 DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2010.03.003.
51. S. Zhang et al., "Characterizing Pavement Surface Distress Conditions with Hyper-Spatial Resolution Natural Color Aerial Photography". *Remote Sensing*, 2016. **8**(5) DOI: 10.3390/rs8050392.

52. L. H. C. Branco and P. C. L. Segantine, *MaNIAC-UAV - a methodology for automatic pavement defects detection using images obtained by Unmanned Aerial Vehicles*, in *4th International Conference on Mathematical Modeling in Physical Sciences*, E.C. Vagenas, et al., Editors. 2015, Iop Publishing Ltd: Bristol.
53. B. V. Sokolov et al., *Complex Objects Remote Sensing Monitoring and Modeling: Methodology, Technology and Practice*, in *2013 8th Eurosim Congress on Modelling and Simulation*, K. AlBegain, et al., Editors. 2013, Ieee: New York. p. 443-447.
54. G. Gigli et al., "3-D geomechanical rock mass characterization for the evaluation of rockslide susceptibility scenarios". *Landslides*, 2014. **11**(1), p. 131-140 DOI: 10.1007/s10346-013-0424-2.
55. S. Sushant et al., *Localization of an Unmanned Aerial Vehicle for Crack Detection in Railway Tracks*. 2017 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics2017, New York: Ieee. 1360-1365.
56. E. Yanmaz et al., "Drone networks: Communications, coordination, and sensing". *Ad Hoc Networks*, 2018. **68**, p. 1-15 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2017.09.001>.
57. S. Sushant et al., *Localization of an Unmanned Aerial Vehicle for Crack Detection in Railway Tracks*, in *2017 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics2017*, Ieee: New York. p. 1360-1365.
58. M. C. C. Werkema, *Ferramentas estatísticas básicas para o gerenciamento de processos*. 1ª ed2006, Belo Horizonte - MG: Werkema Editora. 302.