



ARTIGO ORIGINAL

OPEN ACCESS

USO DE UMA AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA (ARP) PARA O GERENCIAMENTO DE UMA OBRA DE EDIFICAÇÃO

USE OF A REMOTE PILOTED AIRCRAFT (RPA) TO MANAGE A BUILDING WORK

USO DE UNA AERONAVE PILOTADA A DISTANCIA (ARP) PARA LA GESTIÓN DE UNA OBRA

Arielle Elias Arantes¹ & Moisés de Andrade Abreu²

^{1,2,3} Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Universitário Norte do Espírito Santo

^{1*} aearantes@det.ufes.br ² moises.andrade.a@gmail.com

ARTIGO INFO.

Recebido em: 28.04.2022

Aprovado em: 07.07.2022

Disponibilizado em: 22.07.2022

PALAVRAS-CHAVE: ARP; Obra de edificação; Precisão Cartográfica; Detecção Automática de Mudanças.

KEYWORDS: RPA; Building work; Cartographic Precision; Change Detection.

PALABRAS CLAVE: ARP; Obras de construcción; Precisión Cartográfica; Detección automática de cambios.

*Autor Correspondente: Arantes, A. E.

RESUMO

A coleta de imagens com uma Aeronave Remotamente Pilotada (ARP) pode ser utilizada para a detecção de mudanças e realizar o acompanhamento do progresso de uma obra. Buscou-se avaliar o potencial dos ortomosaicos para o acompanhamento de uma obra de edificação. Para isso, foram realizados 4 voos no período de 29/10/2021 a 03/12/2021, no horário das 13 horas, com uma ARP do modelo Mavic 2 Pro em um empreendimento localizado no município de Eusébio-CE. Os erros planimétricos dos quatro voos variaram de 66 a 69 cm e os altimétricos de 25 cm a 49 cm. Posteriormente, no software AutoCad fez a interpretação visual dos quatro ortomosaicos para a realização do acompanhamento do progresso das etapas de pavimentação, forragem vegetal e construção das quadras. Com isso, percebeu-se que após o dia 26/11 a área pavimentada estava abaixo do previsto no cronograma, levando ao atraso nas demais etapas da obra. Também se aplicou os algoritmos *Spectral Angle Difference (SAD)* e *Multivariate Alteration Detection (MAD)* para a detecção automática de mudanças, sendo que ambos os algoritmos apresentaram erros superiores a 40%, invisibilizando o uso destes algoritmos para o acompanhamento da obra.

ABSTRACT

Images collected with a Remotely Piloted Aircraft (ARP) can be used to detect changes and monitor the progress of a work. We sought to evaluate the

potential of orthomosaics for monitoring building work. For this, 4 flights were carried out from 10/29/2021 to 12/03/2021, at 1 pm, with a Mavic 2 Pro model ARP in an enterprise located in the municipality of Eusébio-CE. The planimetric errors of the four flights ranged from 66 to 69 cm and the altimetric errors from 25 cm to 49 cm. Subsequently, in the AutoCad software, the four orthomosaics were interpreted so as to carry out the monitoring of the progress of the stages of paving, grass settlement and construction of the blocks. As a result, it was noticed that after 11/26 the paved area was below schedule, leading to delays in the other stages of the work. The Spectral Angle Difference (SAD) and Multivariate Alteration Detection (MAD) algorithms were also applied for change detection analysis, whereby both algorithms had errors greater than 40%, making the use of these algorithms impracticable to monitor the work.

RESUMEN

La recopilación de imágenes con una aeronave pilotada remotamente (ARP) se puede utilizar para detectar cambios y monitorear el progreso de un trabajo. Buscamos evaluar el potencial de los ortomosaicos para el seguimiento de una obra de edificación. Para ello, se realizaron 4 vuelos del 29/10/2021 al 03/12/2021, a las 13:00 horas, con un Mavic 2 Pro modelo ARP en una empresa ubicada en el municipio de Eusébio-CE. Los errores planimétricos de los cuatro vuelos oscilaron entre 66 y 69 cm y los errores altimétricos entre 25 y 49 cm. Posteriormente, en el software AutoCad, realizó la interpretación visual de los cuatro ortomosaicos para realizar el seguimiento del avance de las etapas de pavimentación, forraje vegetal y construcción de los bloques. Como resultado, se notó que después del 26/11 el área pavimentada estaba por debajo del cronograma, lo que provocó retrasos en las otras etapas de la obra. También se aplicaron los algoritmos Spectral Angle Difference (SAD) y Multivariate Alteration Detection (MAD) para la detección automática de cambios, y ambos algoritmos presentaron errores superiores al 40%, haciendo invisible el uso de estos algoritmos para monitorear el trabajo.



INTRODUÇÃO

Para a maioria das obras de engenharia civil, os estudos topográficos fornecem as informações necessárias para a realização de representações gráficas de uma porção limitada da superfície terrestre, sendo estes estudos fundamentais para a elaboração de projetos e para o gerenciamento de obras no âmbito da Engenharia Civil (Espartel, 1987). À medida que os estudos tecnológicos na área de agrimensura e cartografia se desenvolvem, a topografia vem evoluindo, impulsionando a utilização de novos instrumentos, um exemplo disso, é a concepção e o aumento do uso de ARPs (Aeronaves Remotamente Pilotadas) na área de mapeamento, a qual comparativamente a topografia tradicional, possibilita um aumento na produtividade dos levantamentos planimétricos e altimétricos, já que esta cobre grandes áreas em menor tempo.

Esta tecnologia fundamenta-se nos conceitos de Fotogrametria que, segundo a Sociedade Americana de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto – *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing* - ASPRS, é a arte, ciência e tecnologia de obtenção de informação confiável sobre objetos físicos e o meio ambiente através de processos de gravação, medição e interpretação de imagens fotográficas e padrões de energia eletromagnética radiante. Ainda, esta definição pode ser aplicada em duas principais divisões da Fotogrametria que são respectivamente Fotogrametria Terrestre e a Aerofotogrametria, sendo esta última definida como a obtenção de fotografias do terreno a partir de câmeras de alta resolução embarcadas em aviões ou ARPs, comumente denominadas de *Drones* (Ruy *et al.*, 2007).

De acordo com Zhou e Gheisari (2018), o rápido crescimento do mercado de ARPs estimulou a expansão de sua aplicação em vários setores da construção civil. Nos últimos anos, pesquisas exploraram várias aplicações de ARPs como inspeção do local, inspeção de segurança, monitoramento de progresso, avaliação de danos na construção e manutenção. Nesse sentido, as ARPs, devido a sua capacidade de coleta de dados em um grande alcance espacial, são uma ótima solução no acompanhamento de componentes estruturais que possuem uma significativa reincidência de falhas.

As ARPs podem auxiliar na inspeção visual de estruturas ou até, em alguns casos, substituir os inspetores no campo (Greenwood *et al.*, 2019). Ellenberg *et al.* (2014) comprovou a eficiência da ARP no monitoramento visual e controle de deformações e fissuras em uma ponte. Os algoritmos propostos por Ellenberg *et al.* (2014) sugerem a colocação de marcadores rastreados em 3D por fotogrametria ou 3D SLAM. Assim, foi feita a coleta de imagens de alvenaria rachada por meio de uma ARP, utilizando vários algoritmos de detecção de rachaduras nas imagens obtidas, incluindo detecção de borda, abordagem de percolação, método fractal e tensor votação. Ainda, conforme Siebert e Teizer (2014), as ARPs oferecem dados de mapeamento 3D em grandes canteiros de escavação e movimentação de terra com menor custo, melhor acessibilidade e campo de visão mais amplo.

Dessa forma, é possível observar o grande potencial da utilização de ARPs no gerenciamento de obras horizontais. Sua capacidade de obter dados e imagens de forma ampla e rápida possibilita criar imagens georreferenciadas, as quais mostram-se bastante úteis na obtenção de medidas precisas de área, possibilitando com isso a verificação do progresso das etapas construtivas de uma obra e a medição da produtividade da obra. Logo, o aerolevantamento com ARP mostra um grande potencial no monitoramento do progresso de uma obra, o que segundo



Lin *et al.* (2015) é definido como a avaliação do trabalho em andamento utilizando a análise de imagens coletadas do local. Conforme um estudo desenvolvido por Irizarry e Costa (2016), a análise do progresso feita por uma ARP se mostra vantajosa nos quesitos custo, tempo e acessibilidade.

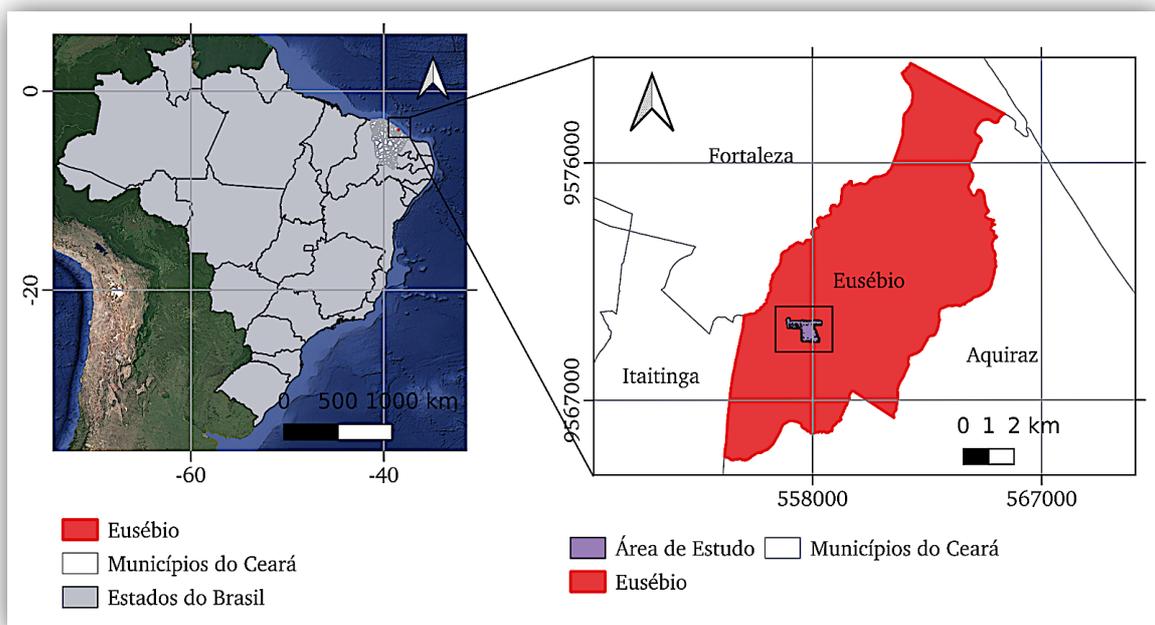
Assim, a análise visual das imagens obtidas no levantamento aerofotogramétrico possui bastante relevância na manipulação dos dados obtidos. Dessa maneira, verifica-se a quantidade do serviço executado, bastando fazer as medições na própria imagem georreferenciada. Além disso, é possível criar um cronograma real de execução da obra, onde seria possível analisar cada serviço frente aos prazos pré-estabelecidos e tomar decisões importantes, como ajustar cronogramas visando a entrega do empreendimento na data pretendida. Neste sentido, este trabalho busca avaliar os potenciais e as limitações do uso de produtos fotogramétricos obtidos com uma ARP para o acompanhamento de uma obra de edificação, tendo por referência, informações planialtimétricas de pontos de controle, obtidos a partir de receptores GNSS de dupla frequência.

MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. ÁREA DE ESTUDO

Para avaliar os potenciais e limitações do uso de ARPs para o gerenciamento de uma obra de edificação, foram realizados 4 voos no período de 29/10/2021 a 03/12/2021, no horário das 13 horas (para mitigar os efeitos provocados pela luz solar), com uma ARP do modelo Mavic 2 Pro em um empreendimento de loteamento localizado no município de Eusébio-CE (Figura 1). Esse local, com área total de 44,91 ha, foi escolhido por ser uma obra ainda em andamento, possibilitando o acompanhamento evolutivo de suas atividades. As disciplinas executadas compreendem desde a supressão vegetal (típica de tabuleiro, com espécies próprias, da caatinga, de mata serrana), infraestrutura e superestrutura viária.

Figura 1. Localização da obra de loteamento no município de Eusébio.



Fonte: Autores (2022)



2.2. LEVANTAMENTO DOS PONTOS DE CONTROLE E DE VERIFICAÇÃO

Além disso, foram utilizados dois receptores GNSS do modelo GPS Trimble R4, os quais detectam as ondas portadoras L1/L2 e os satélites das constelações GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou e QZSS, para a coleta de Pontos de Controle (GCPs) e de Verificação (PVs). Também foram utilizados acessórios como o rádio UFH Trimble TDL 450H, um tripé de metal com pernas extensoras, um bastão extensível com 4,70m AVR para GPS e uma trena de aço graduada em centímetros com 50,00 metros. Os GCPs foram utilizados no georreferenciamento das fotografias aéreas e os PVs foram empregados na avaliação da qualidade posicional dos ortomosaicos.

Os GCPs e PVs foram levantados utilizando o método de posicionamento RTK (Real-time Kinematic), sendo feitos 7 GCPs e 7 PVs, sendo que para os GCPs foram implantadas placas de concreto de dimensões de 80x80x5 cm, as quais foram marcadas com tinta vermelha e preta para facilitar a visualização nas fotos aéreas e auxiliar no georreferenciamento das fotografias aéreas. As Figuras 2 e 3 mostram a localização dos GCPs e Pvs.

Figura 2. Posicionamento dos Pontos de Controle (GCP) utilizados nos aerolevantamentos realizados no período de 29/10/2021 a 03/12/2021.



Fonte: Autores (2022)

Figura 3. Posicionamento dos Pontos de Verificação (PV) utilizados nos aerolevantamentos realizados no período de 29/10/2021 a 03/12/2021.



Fonte: Autores (2022)



2.3. PLANO DE VOO E AEROLEVANTAMENTO

O primeiro passo foi escolher o modelo do equipamento utilizado para fazer o aerolevante, no caso o Mavic 2 Pro da marca DJI. Este modelo possui uma autonomia de voo de 31 minutos, tem um peso total de 907 gramas, um tamanho de 322 x 242 x 84 mm e pode chegar a uma velocidade máxima de 72 km/h, à uma altura de voo de 6 km e um alcance de 8 km. Com relação a câmera, tem um sensor de 1'' CMOS com 20 milhões de pixels efetivos, lente com campo de visão de 77° e distância focal de 28 mm.

Para realizar o plano de voo e acompanhar o voo foi utilizado o aplicativo do *Mission Planner* em um *smartphone* da marca *Samsung* de modelo *S20 Fe*, sendo então delimitado a área desejada, a qual correspondente a 44,91 ha, e a altura de voo foi definida em 90 m, o que resultou em um GSD (*Ground Sampling Distance*) de 2,11 cm/px. Também foi definido o percentual sobreposição das fotografias aéreas, sendo que neste estudo foi utilizado 75% de sobreposição longitudinal e 60% lateral. Considerando o percentual de sobreposição foram tiradas 666 imagens, sendo que dentre os 4 voos, a duração mínima foi de 26,85 minutos.

2.4. PROCESSAMENTO DAS FOTOGRAFIAS AÉREAS

As fotos foram processadas na plataforma da Maply, de modo que se precisou apenas fazer o upload das imagens do aerolevante e um arquivo no formato “.txt” contendo as informações das coordenadas dos 7 GCPs. A Maply é uma plataforma que rapidamente transforma as imagens de campo em mapas e modelos de alta precisão e centraliza todas as informações em um único local (MAPLY, 2021). A partir do navegador de internet, possibilita a extração e compartilhamento de informações cruciais do projeto com a equipe de obras.

O custo mensal da utilização desta plataforma é em média, em junho de 2022, R\$ 3.000,00 por mês para armazenamento e processamento ilimitado de voos sobre um mesmo local, necessitando apenas que o operador faça o upload das fotos do levantamento para a plataforma e as informações das coordenadas dos GCPs, não sendo possível acessar as diferentes fases do processamento das imagens. Essa plataforma foi utilizada neste trabalho para executar o processamento das imagens captadas pela ARP e efetuar as medições necessárias para a geração dos mapas evolutivos.

2.5. VERIFICAÇÃO DA QUALIDADE POSICIONAL DOS ORTOMOSAICOS

Para a realização da análise da qualidade posicional dos ortomosaicos, extraiu-se as coordenadas planialtimétricas dos ortomosaicos exatamente onde encontravam-se os PVs, sendo estas coordenadas comparadas com as coordenadas UTM obtidas a partir do levantamento GNSS com RTK. Calculou-se o erro médio quadrático (EMQ) de cada coordenada obtida no levantamento aerofotogramétrico (y_i) com as coordenadas obtidas com o receptor GNSS da Trimble (y_i') (Equação 01).

$$EMQ = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y_i')^2} \quad (1)$$



Também se avaliou a tolerância planialtimétrica, conforme o Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC), a fim de averiguar a qualidade do aerolevanteamento. A PEC foi estabelecida no Brasil em 1984, sendo que o decreto N° 89.819 estabelece as instruções reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional. O Art 8° define o Padrão de Exatidão Cartográfica como um indicador estatístico de dispersão, relativo a 90% de probabilidade, que define a exatidão de trabalhos cartográficos, onde a probabilidade de 90% corresponde a 1,6449 vezes o Erro-Padrão - PEC = 1,6449 EP. Além disso, o Erro-Padrão isolado num trabalho cartográfico não deve ultrapassar 60,8% do Padrão de Exatidão Cartográfica. Dessa forma, as cartas cartográficas segundo a exatidão são classificadas nas Classes A, B e C (Tabela 1).

Tabela 1. Classificação dos produtos cartográficos, conforme a PEC.

Carta	Planimetria		Altimetria	
	Tolerância	Erro Padrão	Tolerância	Erro Padrão
Classe A	0,5 mm x Escala	0,3 mm x Escala	1/2 equidistância	1/3 equidistância
Classe B	0,8 mm x Escala	0,5 mm x Escala	3/5 equidistância	2/5 equidistância
Classe C	1,0 mm x Escala	0,6 mm x Escala	3/4 equidistância	1/2 equidistância

Para definir qual classe encontram-se os ortomosaicos, foi necessário calcular a escala, conforme a Equação 2. Onde “E” corresponde a escala da foto, “F” a distância focal da câmera (pode ser obtida na ficha técnica do equipamento) e “h” a altura escolhida para fazer o voo com a ARP. Posteriormente, multiplicou-se pelos coeficientes de tolerância e erro padrão, a fim de classificar os produtos fotogramétricos em uma das três classes (A, B ou C).

$$\frac{1}{E} = \frac{F}{h} \tag{2}$$

Em seguida, o avanço da obra foi definido pela interpretação visual dos ortomosaicos durante os 6 voos, sendo comparado o progresso realizado nas etapas de pavimentação, paisagismo e da construção das quadras com o cronograma da obra. O progresso total da obra no tempo inicial e final indicou o avanço total de determinada etapa da obra, a qual foi comparada com a classificação dos ortomosaicos iniciais e finais utilizando métodos de detecção automática de mudanças. Por fim, avaliou-se os erros de omissão e comissão dos algoritmos de detecção automática de mudança, comparativamente a classificação os ortomosaicos pela interpretação visual.

2.6. INTERPRETAÇÃO VISUAL DAS MUDANÇAS

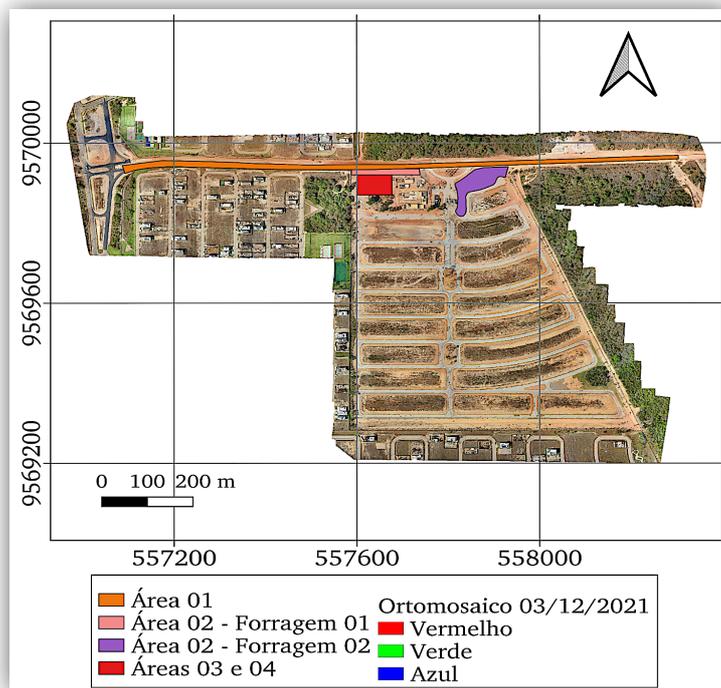
Por meio da interpretação visual dos ortomosaicos obtidos dos aerolevanteamentos foi possível obter o progresso estimado da obra em cada voo e o progresso total de determinada etapa da obra, gerando assim mapas evolutivos. Para isso, foi utilizado o software AutoCad para fazer a representação gráfica em escala dos elementos a serem analisados. Assim, foram escolhidas as seguintes etapas da obra: forração vegetal/paisagismo, construção das quadras e pavimentação. As áreas a serem estudadas e a data inicial e final estão apresentadas na Tabela 2. A Figura 4 mostra a localização das quatro áreas selecionadas para representar as diferentes etapas da obra (Tabela 2).



Tabela 2. Data inicial e final, etapa da obra e região em análise para a geração dos mapas evolutivos e aplicação dos algoritmos de detecção de mudança.

Voos	Etapas da obra	Região
29/10/2021 e 03/12/2021	Execução de pavimento asfáltico	Área 1
19/11/2021 e 03/12/2021	Execução de forração vegetal	Área 2
29/10/2021 e 03/12/2021	Execução de quadras	Área 3
29/10/2021 e 26/11/2021	Execução de quadras	Área 4

Figura 4. Áreas de verificação de avanço para geração dos mapas evolutivos e aplicação dos algoritmos de detecção de mudança.



Fonte: Autores (2022)

Através da ferramenta Comparativo entre voos na plataforma Maply, que possibilita visualizar dois voos de forma simultânea, foi possível comparar as mudanças ocorridas entre as datas escolhidas. Após verificar as áreas que ocorreram as mudanças que o estudo se propôs a analisar, com o software AutoCad, criou-se os mapas evolutivos a partir dos projetos do serviço em estudo. Desse modo, o avanço do serviço pode ser medido através da área da hachura que representa a variação de uma data para outra. Esse valor foi obtido utilizando a ferramenta propriedades, com a hachura selecionada, no AutoCad e a ferramenta de área da plataforma da Maply, bastando criar uma área com o mouse em cima da imagem georreferenciada do local em estudo.

Para a comparação entre o progresso da obra e o cronograma previsto foi calculada a variação da área de uma data para outra considerando a data inicial e as datas intermediárias. A produtividade semanal foi comparada com a produtividade prevista, sendo indicado as datas onde o progresso da obra estava abaixo ou acima do previsto no cronograma.



2.7. DETECÇÃO AUTOMÁTICA DE MUDANÇAS

Visando identificar o progresso da obra nas suas diferentes etapas de forma automática aplicou-se dois algoritmos de detecção automática de mudanças, sendo estes o Spectral Angle Difference (SAD) e o Multivariate Alteration Detector (MAD). Para rodar estes algoritmos utilizou-se o software QGIS v3.18 e os plugins do *Orfeos Toolbox* e o *Semi-Automatic Classification plugin*. O SAD também é denominado de SAM - *Spectral Angle Mapping difference*, sendo semelhante ao CVA (*Change Detection Vector*). O algoritmo SAD determina a similaridade espectral entre os espectros de Tempo 1 e os espectros de Tempo 2 calculando o ângulo entre os espectros e tratando-os como vetores em um espaço com dimensionalidade igual ao número de bandas (Kruse *et al.*, 1993). O MAD é um método de transformação por componentes principais (PC) que se baseia na redução da redundância de informações e produz informações de variáveis não correlacionadas com variância decrescente (Nielson *et al.*, 1998).

Primeiramente selecionou-se as datas iniciais e finais, que contemplariam as diferentes etapas da obra, sendo estas a execução do pavimento asfáltico, a forração da vegetação e a execução das quadras (Tabela 02). Devido a capacidade computacional disponível e ao tamanho dos ortomosaicos, estes foram recortados para regiões específicas, conforme a etapa da obra e a localização de determinado serviço. As áreas mencionadas na Tabela 02 podem ser visualizadas na Figura 04.

Antes de rodar os algoritmos no software QGIS v3.18, foi necessário fazer o registro das imagens das áreas 01 a 04, tendo por referência o ortomosaico recortado mais recente do dia 03/12/2021. Todas as imagens foram registradas com referência a esta, com exceção da Área 04, sendo que para esta foi utilizada a imagem referência do dia 29/10/2021, já registrada com a imagem do dia 03/12/2021. Foi utilizado um algoritmo de registro automático de imagens no QGIS v3.18. Esta etapa é fundamental, para que não haja deslocamentos de uma imagem para outra, visto que isso levaria a ruídos e erros ao aplicar os algoritmos de detecção automática de mudanças. Infelizmente, devido a limitação de tempo e do processamento computacional não foi feita nenhuma correção de iluminação/contraste nas imagens.

Em seguida, rodou-se os algoritmos SAD e MAD inserindo as imagens da data inicial e final para cada região, conforme especificado na Tabela 02. Com as imagens de mudança foi necessário definir os intervalos correspondentes às maiores e menores mudanças, sendo que valores próximos de 0 indicariam nenhuma mudança, e valores altos positivos ou negativos indicariam mudanças significativas. A definição dos intervalos foi feita por meio de testes, sendo definido que valores acima de -1 ou 1 indicariam grandes mudanças e valores de -1 a 0 ou de 0 a 1 nenhuma mudança. A partir destes intervalos realizou-se a reclassificação das imagens, sendo que as imagens foram convertidas para o formato *shapefile* no software QGIS v3.18. Então foram exportados apenas os polígonos com mudanças e calculado a área total para cada região. Para estimar os erros dos algoritmos SAD e MAD, foi necessário delimitar por meio da interpretação visual as áreas de pavimentação, forragem e quadras inseridas nas 4 regiões e calcular a área desses polígonos (área verdadeira).

O erro de omissão foi calculado pela subtração da área verdadeira com a área de mudança, determinada pelos algoritmos SAD ou MAD, sendo então dividido pela área verdadeira e multiplicado por 100 para termos o erro percentual. O erro de comissão foi estimado a partir da



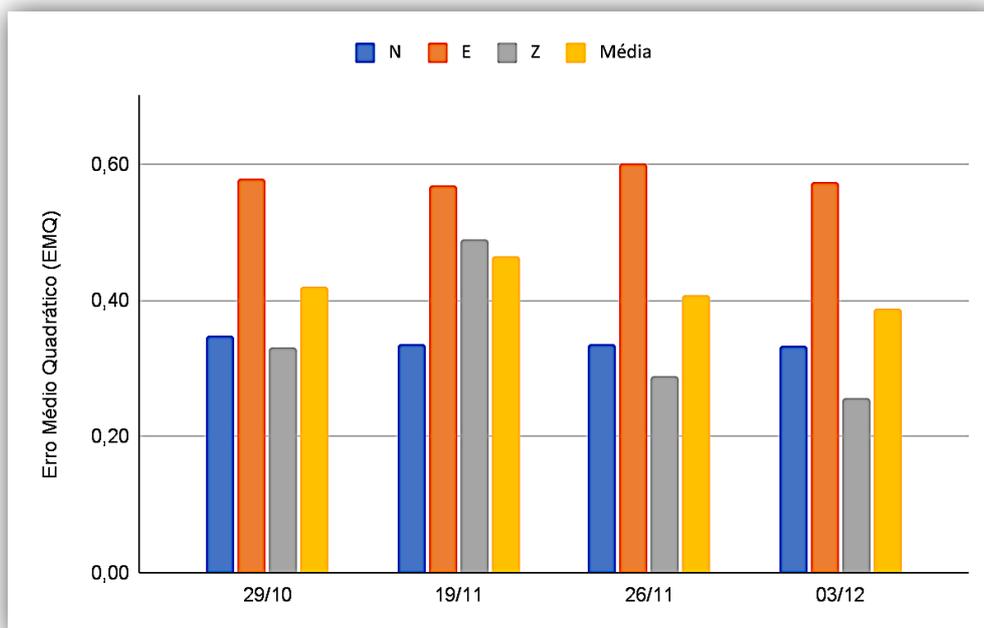
ferramenta Diferença no QGIS, onde entra-se com os *shapefiles* de mudança e com os polígonos delimitados pela interpretação visual, sendo então “apagado” os polígonos dos *shapefiles* de mudanças inseridos dentro dos polígonos delimitados, e recalculado a área dos *shapefiles* de mudança apenas para os polígonos fora da região de interesse. A área fora do local de interesse para cada região foi dividida pela área verdadeira e multiplicada por 100 para termos os erros de comissão.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A verificação da qualidade dos ortomosaicos foi feita através da comparação das coordenadas obtidas por meio do posicionamento RTK com os receptores GNSS da Trimble R4 com as coordenadas extraídas dos ortomosaicos georreferenciados. Considerando o EMQ dos pontos de verificação, percebe-se que a média do EMQ planialtimétrico (em amarelo) foi menor para o Ortomosaico do dia 03/12 com um valor de 0,39 m, seguido do dia 26/11 com 0,41 m, 29/10 com 0,42 m e 19/11 com 0,46 m (Figura 5). Para a maioria das datas, o EMQ altimétrico foi menor do que o planimétrico, com exceção do dia 19/11.

As coordenadas E tiveram um erro 60% maior do que as coordenadas N, o que se deve a distribuição dos pontos de controle na área levantada pelo Mavic Pro, sendo que houve uma maior variação na distribuição dos GCPs no sentido vertical se comparado ao horizontal (Figuras 2 e 3). É importante destacar também que os pontos de verificação estavam concentrados na porção superior, local onde foram feitas as medições do avanço da obra nas etapas de pavimentação e paisagismo. Neste local apenas o GCP 6 foi utilizado para o georreferenciamento das fotografias localizadas na porção superior da área de estudo. Para minimizar o erro planialtimétrico de ~40 cm é importante que os GCPs estejam bem distribuídos na área de estudo e que apresentem uma distribuição semelhante ao dos PVs.

Figura 5. Erro médio Quadrático (m) das coordenadas N, E, Z e a média do EMQ planialtimétrico.



Fonte: Autores (2022)



Para avaliar a qualidade dos ortomosaicos, conforme o especificado na PEC, foi utilizada a Equação 2 para calcular a escala, sendo considerada a distância focal corresponde a 28 mm (sensor de 1” CMOS com 20 milhões de pixels efetivos, lente com campo de visão de 77°) e a altura de 90 m. Com isso, obtivemos que os ortomosaicos possuem uma escala de 1:3214 e portanto, a equidistância entre as curvas de nível deve ser inferior a 1,53 m. A partir da escala e da Tabela 01, obteve-se as seguintes tolerâncias planimétrica e altimétrica para as três classes da PEC (Tabela 3).

Tabela 3. Tolerâncias e Erros Padrões conforme o Padrão de Exatidão Cartográfica.

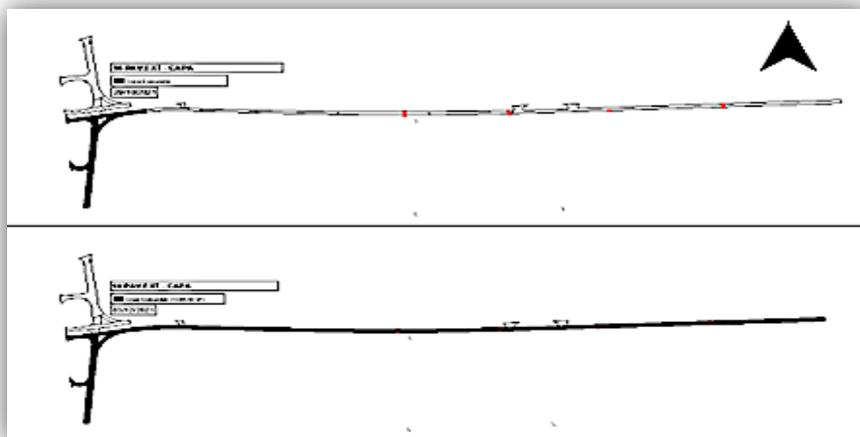
Carta	Tolerância Planimétrica (m)	Tolerância Altimétrica (m)	Erro Padrão Planimétrico	Erro Padrão Altimétrico
Classe A	1,61	0,77	0,96	0,51
Classe B	2,57	0,92	1,61	0,61
Classe C	3,21	1,15	1,93	0,77

A Tabela 03 mostra as tolerâncias e erros da PEC para as três classes de precisão cartográfica. Considerando os quatro aerolevantamentos, os erros variaram de 0,66 m a 0,69 m, sendo menores do que o especificado para a Classe A da PEC, cuja tolerância é de 1,61 m e o erro padrão de 0,96 m. Já os altimétricos variaram de 0,25 m no dia 03/12 a 0,49 no dia 19/11, sendo inferior a tolerância de 0,77 m e o erro padrão de 0,51 da Classe A da PEC.

3.1. MAPAS EVOLUTIVOS

A fim de avaliar o avanço da pavimentação na obra de edificação foi avaliado as mudanças ocorridas entre os dias 29/10 e 03/12, sendo que a hachura preta na Figura 6 indica a pavimentação existente nas duas datas. Neste estudo não foi considerada a evolução das camadas do pavimento flexível de forma separada, apenas o avanço da pavimentação para a camada de rolamento acabada. Os valores de área obtidos na primeira e última data, totalizam um avanço de 7581,17 m² em 34 dias (7 semanas, 5 dias úteis e a última semana 4 dias úteis), o que equivale a um avanço diário de 222,98 m² e uma produtividade semanal de 1083,03 m².

Figura 6. Mapa evolutivo da etapa de pavimentação, onde as áreas em preto indicam a área pavimentada e em branco as áreas não pavimentadas.

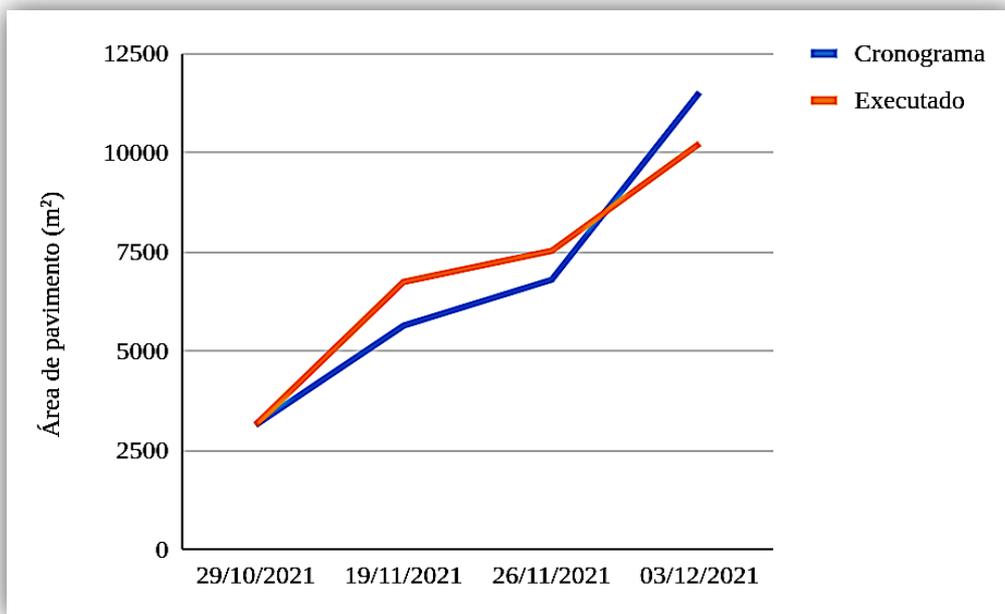


Fonte: Autores (2022)



Fazendo o comparativo com o cronograma da obra com o avanço obtido nos dias 29/10, 19/11, 26/11 e 03/12, foi verificado que nos períodos entre os dias 29/10 e 19/11 a quantidade executada estava acima da proposta pelo cronograma, com uma produtividade de 1200,59 m² por semana (Figura 7). Ademais, entre os dias 19/11 e 26/11 a produtividade cai para 778,00 m² por semana, permanecendo acima do previsto. Por fim, verifica-se que houve uma tentativa de manter-se acima da curva do cronograma, com um aumento de produtividade, entretanto a quantidade executada, com produtividade semanal de 2705,00 m² ficou abaixo do previsto no cronograma da obra.

Figura 7. Progresso da etapa de pavimentação considerando o previsto no cronograma da obra e o executado.

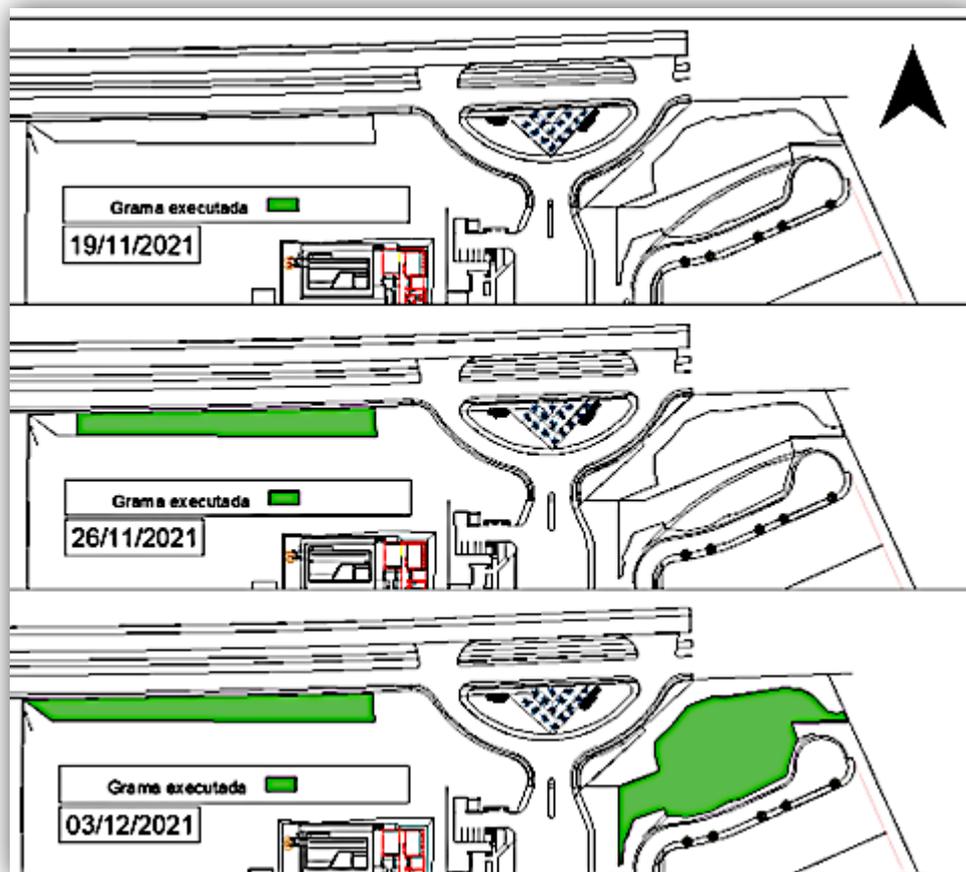


Fonte: Autores (2022)

Para avaliar o progresso do paisagismo foram utilizados três voos correspondentes aos períodos de 19/11, 26/11 e 03/12, considerando dois locais (Fornagem 1 e Fornagem 2) (Figura 4 e 8). Considerando o período de 19/11 a 03/12, a fornagem da área superior (Fornagem 1) correspondeu a um total de 1449,49 m², enquanto na área a direita (Fornagem 2) foi implantado um total de 2807,75 m² de grama (Figura 8). Para a área de fornagem 1 a produtividade diária, considerando 11 dias úteis (2 semanas), foi de 131,77 m² e a semanal foi de 724,75 m², enquanto para a fornagem 02 a produtividade diária foi de 255,25 m² e a semanal foi de 1403,88 m². Para ambas as áreas, uma área total de 4257,24 m² foi gramada no período de 19/11 a 03/12.



Figura 8. Mapa evolutivo da etapa de pavimentação, onde as áreas em verde indicam a área com grama e em branco as áreas sem forragem.

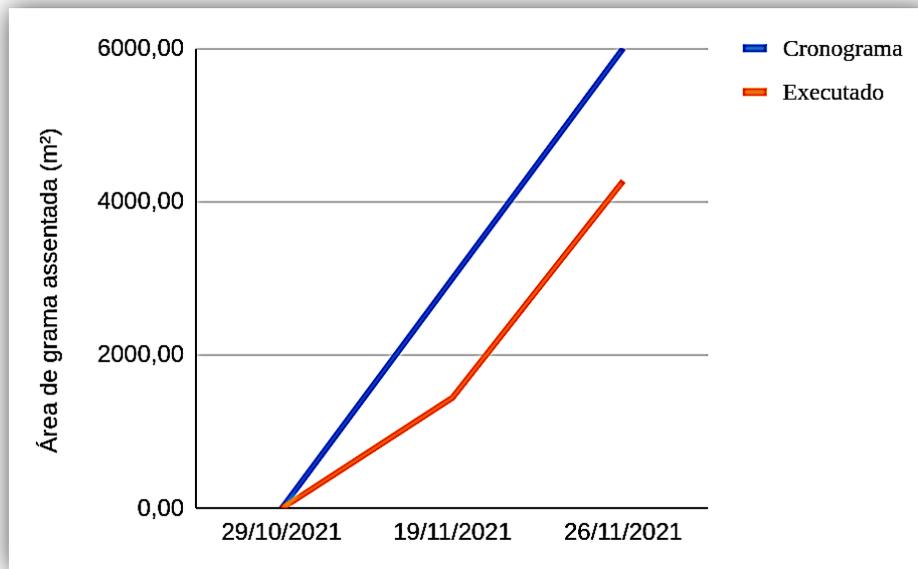


Fonte: Autores (2022)

Ao comparar o cronograma para a realização da forragem e a execução da cobertura vegetal pode-se concluir que o serviço está sendo efetuado com uma produtividade abaixo do previsto no cronograma (Figura 9). O período que compreende os dias 19/11 e 26/11 a produtividade do serviço executado foi de 289,136 m²/dia, enquanto que a prevista, foi de 600 m²/dia. (Figura 9) No período seguinte, entre os dias 26/11 e 03/12, a produtividade real sobe para 565,07 m²/dia. Dessa forma, os valores finais do avanço ficaram 1728,97 m² abaixo do estimado pelo cronograma. Em alguns casos, a produtividade executada depende da liberação de frente de serviço para que a atividade seja executada. Nesse caso, por exemplo, houve um atraso para disponibilizar as áreas para que a equipe de paisagismo pudesse assentar a grama, gerando assim um atraso no cronograma por decorrência do atraso de atividades predecessoras. Assim, para esta situação, recomenda-se readequar o cronograma a nova realidade da obra.



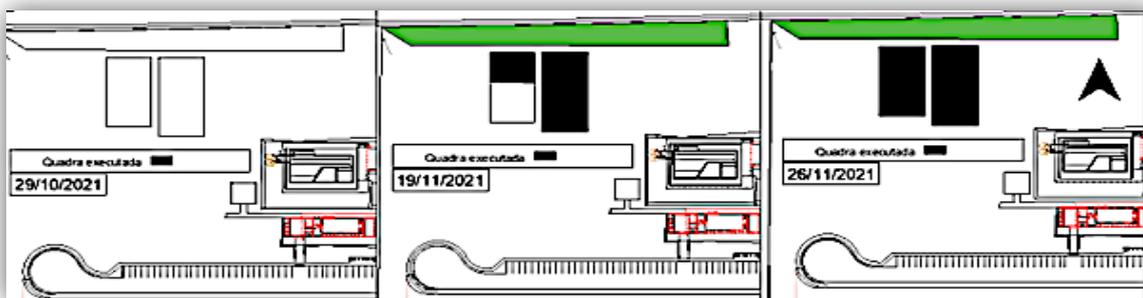
Figura 9. Progresso da etapa de paisagismo considerando o previsto no cronograma da obra e o executado.



Fonte: Autores (2022)

Com relação a execução das quadras, na Figura 10 é possível ver a evolução do serviço de execução do seu piso. O avanço detectado pela análise visual corresponde a 246,35 m² da quadra menor e 672,16 m² para a maior no dia 19/11. Para o dia 26/11, tem-se apenas o progresso da quadra menor de 330,70 m². Logo, o progresso total para as duas quadras no dia 26/11 foi de 1249,21 m². Até o dia 03/12 este total aumentou para 1251,28, ou seja, um aumento de apenas 2,07 m² em 4 dias.

Figura 10. Mapa evolutivo da etapa de paisagismo, onde as áreas em preto indicam a área da construção das quadras.

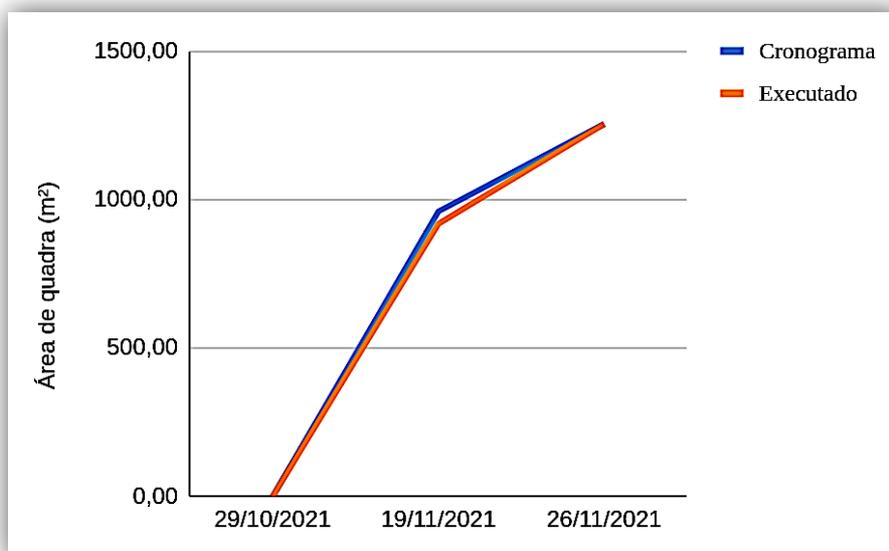


Fonte: Autores (2022)

Analisando o avanço executado e fazendo o comparativo com o cronograma da obra, o qual foi baseado na produtividade estimada pela equipe de execução do serviço, nota-se que o piso das quadras foi concretizado abaixo da programação prevista (320 m²/semana) até o dia 19/11, fechando com um valor de 918,35 m², ou seja, 41,65 m² abaixo do cronograma (Figura 11). Na semana seguinte, com um aumento de produtividade de 29,97 m², a área construída foi de 1254,44 m², atingindo a atividade prevista dentro do período estipulado no cronograma.



Figura 11. Progresso da construção das quadras, considerando o previsto no cronograma da obra e o executado.



Fonte: Autores (2022)

3.2. DETECÇÃO AUTOMÁTICA DE MUDANÇAS

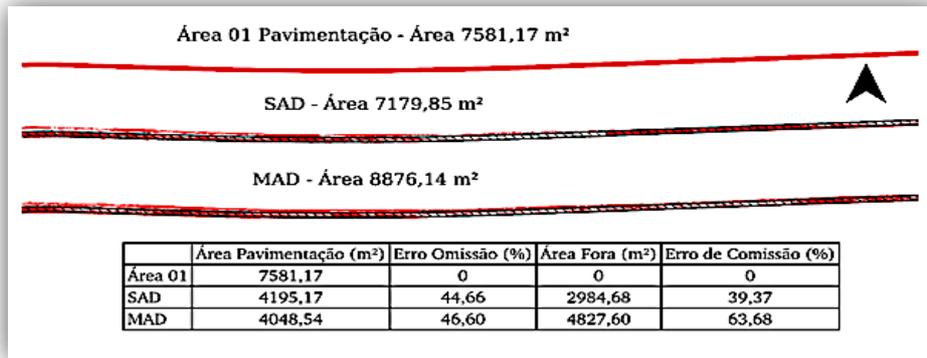
Com o objetivo de avaliar o potencial dos algoritmos de detecção automática de mudanças para indicar o avanço da obra foi estimado a área de mudança, considerando os algoritmos SAD e MAD, os quais foram comparados com a área original, obtido pela interpretação visual dos ortomosaicos. A Figura 12 expressa os resultados da análise feita utilizando o Método de Detecção Automática de Mudanças e os algoritmos *Spectral Angle Difference* e *Multivariate Alteration Detection*. A Área 1, correspondente a etapa de pavimentação, teve um valor total de área pavimentada de 7581,17 m² durante o período de 29/10 a 03/12 de 2021.

O algoritmo SAD detectou uma área total de mudança entre o período de 29/10 e 03/12 de 7179,85 m², sendo que deste valor, apenas 4195,17 m² correspondem à área de pavimentação, resultando em um Erro de Omissão de 44,66%. A área fora do escopo de pavimentação, detectada pelo algoritmo SAD foi de 2984,68 m², implicando em um Erro de Comissão de 39,37%.

De forma análoga, o algoritmo MAD detectou uma área de 8876,14 m², em que apenas 4048,54 m² coincide com a área de pavimentação, gerando um Erro de Omissão de 46,60%. Além disso, 4827,60 m² a mais foram detectados fora da área de pavimentação, resultando em um Erro de Comissão de 63,68%. Percebe-se com isso que ambos os algoritmos tiveram erros de omissão semelhantes de ~45%, mas o erro de comissão do MAD foi 24% maior do que o do SAD, portanto, o SAD apresentou melhor desempenho por detectar de forma automática a área de interesse para a análise automática do progresso da obra de pavimentação. De qualquer forma, mesmo o SAD apresentando melhor desempenho, um erro de omissão de 45% é bastante alto, portanto, o uso desses algoritmos não é recomendado para a extração de informações relevantes ao gerenciamento de uma obra.



Figura 12. Resultado da detecção automática de mudanças para a disciplina de pavimentação.

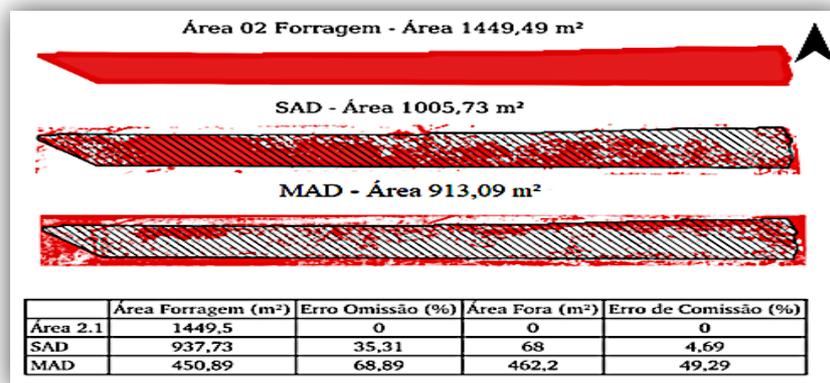


Fonte: Autores (2022)

Com relação a etapa de paisagismo, a Figura 13 e 14 mostraram uma área total gramada de 1449,49 m² para a área de forragem 01 e 2807,75 m² para a área de forragem 02. Para a forragem 01, o algoritmo SAD detectou uma área de mudança de 1005,00 m², dos quais apenas 937,73 m² são de assentamento de cobertura vegetal, resultando em um Erro de Omissão de 35,31%, e 68 m² fora do escopo de paisagismo, ocasionando um Erro de Comissão de 4,69%. Com relação ao algoritmo MAD, a área detectada foi de 913,09 m², onde 450,89 m² correspondem a região de interesse, apresentando um Erro de Omissão de 68,89%, sendo que 462,2 m² de área foi detectado fora da área de interesse, gerando um Erro de Comissão de 49,29%.

Já para área Forragem 2, o algoritmo SAD detectou 2964,91 m² de mudanças, porém deste total apenas 2041,65 m² corresponderam a área de forragem 02, acarretando em um Erro de Omissão de 27,29%, enquanto 925,38 m² estava fora da região de interesse, decorrendo em um Erro de Comissão de 32,96%. O algoritmo MAD reconheceu 3083,46 m², onde apenas 1501,55 m² eram de assentamento de grama, apresentando um Erro de Omissão de 42,58%, e 1581,9 m² fora do escopo de paisagismo, produzindo um Erro de Comissão de 77,48%. Percebe-se aqui também que o SAD apresentou melhor desempenho, com erros de omissão variando de 27% a 35% e de comissão de 4% a 33%. Ainda assim, estes erros são bastante significativos, ou seja, os algoritmos não apresentaram um bom desempenho na detecção de mudanças em locais de interesse.

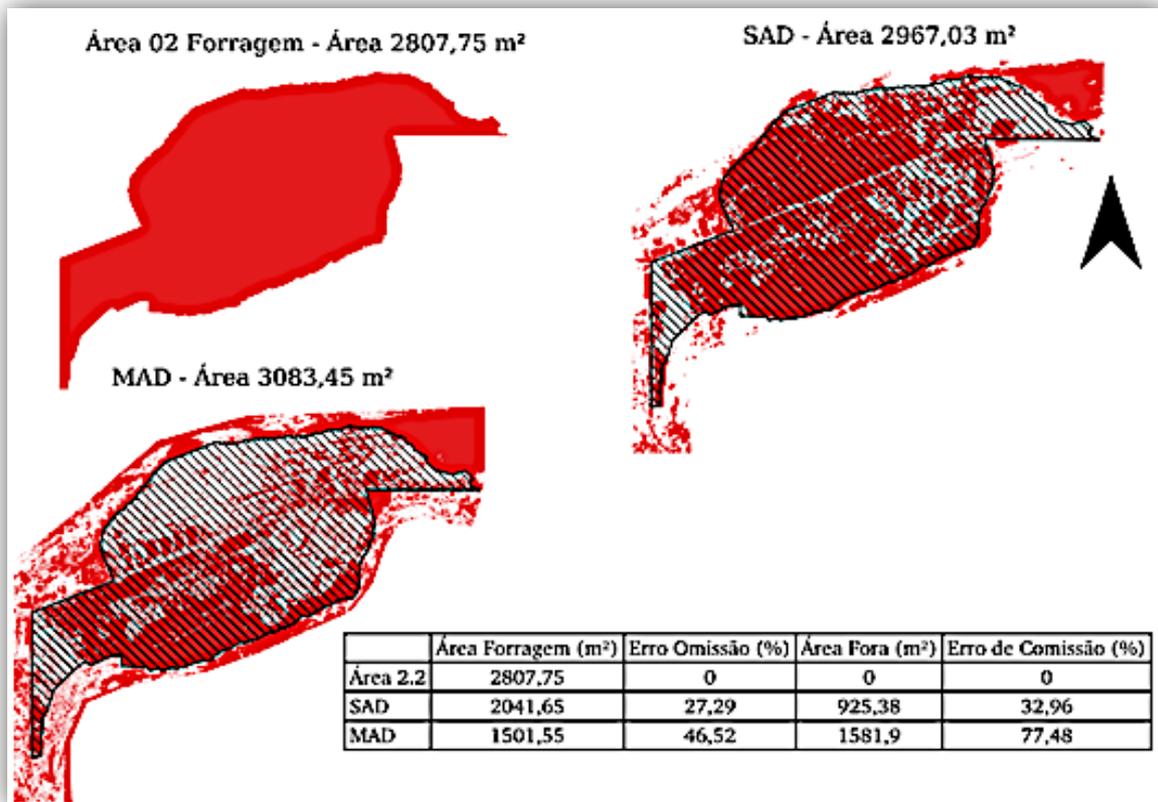
Figura 13. Resultado da detecção automática de mudanças para a disciplina de paisagismo na Forragem 1.



Fonte: Autores (2022)



Figura 14. Resultado da Detecção Automática de Mudanças para a disciplina de paisagismo na Forragem 02.



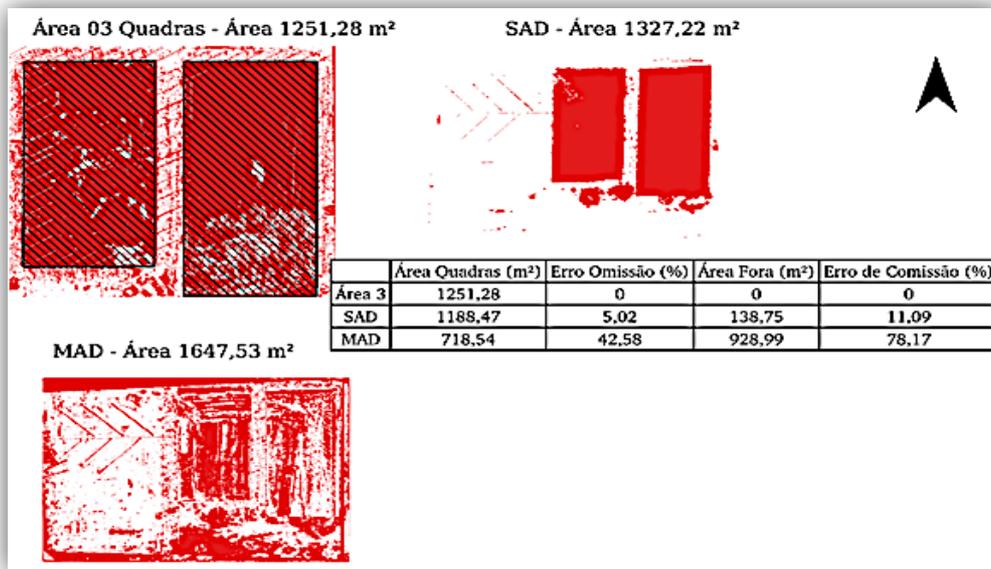
Fonte: Autores (2022)

Seguindo o mesmo raciocínio para a etapa da construção das quadras, tem-se a Área 03 e a Área 04, as quais correspondem as construções das duas quadras uma no período de 19/11 a 26/11 e outra do dia 19/11 ao dia 03/12 (~4 dias após o primeiro intervalo) (Figuras 15 e 16). É importante lembrar que o avanço total das áreas 03 e 04 foi de apenas 2,07 m², portanto adotou-se o valor final na construção para o dia 03/12, que foi de 1251,28 m². É importante destacar que houveram duas mudanças significativas na mesma área durante o período analisado (29/10 a 03/12), onde a primeira corresponde à camada de pó de pedra e a segunda ao pedrisco com asfalto.

Logo, a primeira análise, conforme a Figura 15 detectando a camada superior de pedrisco com asfalto, o algoritmo SAD detectou uma área de mudança de 1327,22 m², da qual 1188,47 m² correspondem ao serviço executado na quadra, apresentando portanto um Erro de Omissão de 5,02% e um Erro de Comissão de 11,09% (138,75 m² fora do escopo das quadras). Com relação ao algoritmo MAD, sua detecção foi de 1647,53 m², onde apenas 718,54 m² correspondiam a área das quadras, com Erro de Omissão de 42,58% e um erro de Comissão bem alto de 78,17 %, ou seja, detectou uma área de mudança de 928,99 m² fora da área das quadras.



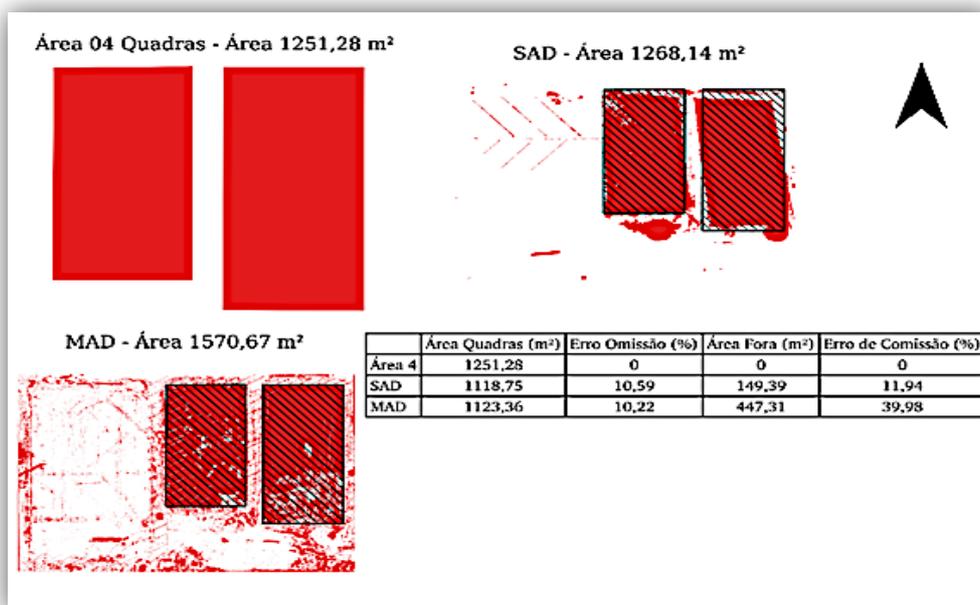
Figura 15. Resultado da detecção automática de mudanças para a disciplina de quadras na Área 03.



Fonte: Autores (2022)

Por fim, tem-se a segunda análise das quadras, correspondente a execução da camada de pó de pedra, conforme a Figura 16. O algoritmo SAD captou 1268,14 m², deste total 1118,75 m² indicavam mudanças relativas a camada de pó de pedra, gerando um Erro de Omissão de 10,59%, enquanto 149,39 m² foi detectado fora das quadras, apresentando um Erro de Comissão de 11,94%. O algoritmo MAD teve um resultado de 1570,67 m², porém apenas 1123,36 m² corresponderam a área da quadra, com Erro de Omissão de 10,22%, e 447,31 m² foi detectado fora da área das quadras, equivalente a um Erro de Comissão de 39,98%.

Figura 16. Resultado da detecção automática de mudanças para a disciplina de quadras na Área 4



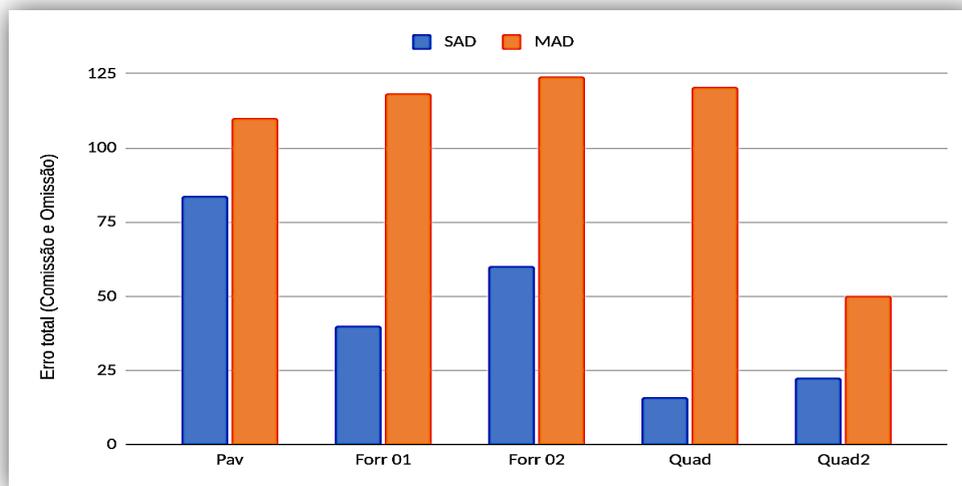
Fonte: Autores (2022)



Ao analisar as imagens utilizadas para o estudo de detecção automática de mudanças, observa-se que a variação de sombreado, iluminação e até a disposição da obra interferiram nos resultados. Mesmo com a tentativa de se ter um padrão na execução do aerolevante, como fazer os voos no mesmo horário, tiveram locais com regiões de sombra que diferiram de uma imagem para outra, gerando detecções indesejadas. Além disso, se tratando de obras de infraestrutura, as variações nos locais analisados como movimento de terra e até mesmo mudanças provocadas por atividades fora do escopo considerado provocaram ruídos significativos nos resultados.

Em geral, o algoritmo SAD apresentou em média 60% menos erros de omissão e comissão do que o MAD, sendo que a diferença entre os algoritmos foi menor para a área de Pavimentação e maior para a área 03 da Quadra. Ambos os algoritmos apresentaram um erro médio superior a 40% na detecção das mudanças entre os tempos inicial e final, tornando o uso deste método inviável para a detecção de mudanças em imagens de alta resolução espacial, como no caso dos ortomosaicos obtidos com o Mavic 02 pro. Percebe-se também pelas Figuras 12 a 16 que os erros de comissão são maiores que o de omissão, ou seja, há uma maior detecção de ruídos e mudanças fora da área de interesse do que a omissão de mudanças dentro da área de interesse. Uma solução para minimizar este problema seria remover as sombras e normalizar o brilho dos ortomosaicos, evitando assim a detecção de ruídos indesejados.

Figura 17. Erro total de Comissão e Omissão para os algoritmos SAD e MAD.



Fonte: Autores (2022)

Dessa forma, verifica-se que o Método de Detecção de Mudanças proposto depende bastante da qualidade dos produtos fotogramétricos obtidos no aerolevante. Ainda, constata-se que a análise para aferição de áreas de avanço do serviço utilizando os algoritmos SAD e MAD apresentem erros consideráveis em superfícies com alto fluxo de trabalho, contudo é possível se ter uma ordem de grandeza das mudanças ocorridas. Além disso, considerando os serviços de forma conjunta, tem-se uma vantagem na utilização do Método de Detecção Automático proposto em obras de grande extensão, pois seus resultados permitem visualizar todas as zonas de mudanças significativas e assim fazer uma análise de área mais precisa de forma mais rápida, sem que haja a necessidade de inspecionar todas as áreas, eliminando assim uma das fases mais demoradas, que é a interpretação visual dos ortomosaicos.



CONCLUSÕES

Considerando a qualidade do posicionamento dos ortomosaicos, os erros planimétricos dos quatro voos (29/10, 19/11, 26/11 e 03/12) variaram de 66 a 69 cm e os altimétricos de 25 cm a 49 cm. A partir do cálculo das tolerâncias e erros da PEC, todos os quatro ortomosaicos podem ser classificados como um produto cartográfico de Classe A. Mesmo estando na Classe A, erros decimétricos no posicionamento impossibilita o uso destes ortomosaicos para fins da estimativa de materiais na obra e para o seu uso concomitante ao levantamento topográfico, visando o levantamento de pontos e a materialização de pontos no terreno, podendo ser utilizado apenas para fins de acompanhamento da obra. Para que estes ortomosaicos possam ser utilizados para outras finalidades é fundamental que haja uma maior quantidade de pontos de controle e de verificação e que estes estejam bem distribuídos ao longo de todo o ortomosaico.

Considerando isso, avaliou-se o avanço total no período de 29/10 a 03/12 das etapas de pavimentação, forragem vegetal e construção das quadras para um loteamento no município de Eusébio-CE. Para a etapa de pavimentação, a quantidade executada estava acima do previsto no cronograma até do dia 26/11, sendo que após esta data houve uma redução da produtividade ficando abaixo do proposto. Com isso houve um atraso para disponibilizar as áreas para que a equipe de paisagismo pudesse assentar a grama, gerando assim uma delonga no cronograma por decorrência das atividades predecessoras. Assim, para esta situação, recomenda-se readequar o cronograma a nova realidade da obra. Devido ao atraso na pavimentação e da forragem, a construção do piso das quadras ficou abaixo da programação prevista (320 m²/semana) até o dia 19/11, sendo que com isso houve uma pressão para acelerar a construção das quadras, o que aumentou a produtividade, e com isso, foi possível finalizar a atividade dentro do período estipulado no cronograma.

Já avaliando o potencial do uso de algoritmos de detecção de mudança de forma automática para auxiliar no acompanhamento da obra, percebeu-se que ambos os algoritmos utilizados o SAD e o MAD apresentaram erros superiores a 40%, inviabilizando o uso destes algoritmos sem que haja um pré-processamento dos ortomosaicos para a correção da iluminação e remoção de sombras. Da mesma forma, a complexidade de uma imagem de alta resolução dificulta o uso de algoritmos de transformação espectral para a detecção de mudança, sendo recomendado o uso de algoritmos de classificação e a avaliação posterior das imagens classificadas.

REFERÊNCIAS

- Ellenberg, A., Branco, L., Krick, A., Bartoli, I., & Kotsos, A. (2014) Use of unmanned aerial vehicle for quantitative infrastructure evaluation. *Journal of Infrastructure Systems*, 21(3). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IS.1943-555X.0000246](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000246)
- Espartel, L. (2019). Curso de Topografia. 9 ed. Rio de Janeiro, Globo, 1987.
- Greenwood, W. W., Jerome, P. L., & Dimitrios, Z. (2019). Applications of UAVs in Civil Infrastructure. *Journal of Infrastructure Systems*, 25(2). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IS.1943-555X.0000464](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000464)
- Irizarry, J. & Costa, D. B. (2016). Exploratory Study of potential Applications of Unmanned Aerial Systems for Construction Management Tasks. *Journal of Management in Engineering*, 32(3). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000422](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000422)
- Kruse, F. A., Lefkoff, A. B., & Boradman, J. W. (1993). The Spectral Image Processing System



(SIPS) - Interactive Visualization and Analysis of Imaging Spectrometer Data. *Remote Sensing of Environment*, 44, 145-163. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(93\)90013-N](https://doi.org/10.1016/0034-4257(93)90013-N)

Lin, Z., Stamnes, S., Jin, Z., Laszlo, I., Tsay, S., Wiscombi, W., & Stamnes, K. (2015). Improved discrete ordinate solutions in the presence of an anisotropically reflecting lower boundary: Upgrades of the DISORT computational tool. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 157, 119-134. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2015.02.014>

Maply. Site oficial Maply. Recuperado de <https://www.maply.io/>

Nielsen, A. A., Conradsen, K., & Simpson, J. J. (1998). Multivariate Alteration Detection (MAD) and MAF Postprocessing in Multispectral, Bitemporal Image Data: New Approaches to Change Detection Studies. *Remote Sensing of Environment*, 64, 1-19. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(97\)00162-4](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(97)00162-4)

Ruy, R. S., Tommaselli, A. M. G., & Reis, T. T. (2007). Sistema aerotransportado leve de aquisição de imagens digitais – SAAPI. In: Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Brasil, 21-26 abril 2007, INPE, 1329-1335.

Siebert, S., & Teizer, J. (2014). Mobile 3D mapping for surveying earthwork projects using an unmanned aerial vehicle (UAV) system. *Automation in Construction*, 41, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.01.004>

Zhou, S., & Gheisari, M. (2018). Unmanned aerial system applications in construction: a systematic review. *Construction Innovation*, 18(4), 453-468. <https://doi.org/10.1108/CI-02-2018-0010>

