

Trabalho de Formatura

Curso de Graduação em Engenharia Ambiental

**USO DE VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO (VANT) PARA MONITORAMENTO
SAZONAL DE ÁREAS ÚMIDAS**

Paulo Guilherme

Lucas Moreira Furlan

Rio Claro (SP)

2021

A368u	Alencar, Paulo Guilherme Uso de Veículo Aéreo não Tripulado (VANT) para Monitoramento Sazonal de Áreas Úmidas / Paulo Guilherme Alencar. -- Rio Claro, 2021 46 p. : il., tabs. + 1 CD-ROM Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Ambiental) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro Orientador: Lucas Moreira Furlan Coorientadora: Vania Silvia Rosolen 1. Áreas Úmidas. 2. VANT. 3. Sensoriamento Remoto. 4. Drone. 5. Structure from Motion. I. Título.
-------	--

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Câmpus de Rio Claro

Paulo Guilherme de Alencar

Uso de Veículo Aéreo não Tripulado (VANT) para Monitoramento
Sazonal de Áreas Úmidas

Trabalho de Formatura apresentado ao
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
- Câmpus de Rio Claro, da Universidade
Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho,
para obtenção do grau de Engenheiro
Ambiental.

Rio Claro - SP

2021

PAULO GUILHERME DE ALENCAR

Uso de Veículo Aéreo não Tripulado (VANT) para Monitoramento
Sazonal de Áreas Úmidas

Trabalho de Formatura apresentado ao Instituto de
Geociências e Ciências Exatas - Câmpus de Rio
Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio de
Mesquita Filho, para obtenção do grau de Engenheiro
Ambiental.

Comissão Examinadora

_____ (orientador)

Rio Claro, ____ de _____ de _____.

Agradecimentos

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPQ pelo financiamento desta pesquisa através da bolsa de iniciação científica (processo n. 164767/2019-3).

Agradeço a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP, pelo financiamento do projeto de pesquisa (processo n. 2017/14168-1) que permitiu a aquisição de equipamentos de alta qualidade, assim como as realizações dos campos e análises necessárias.

Agradeço a Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” e ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas pelo apoio acadêmico e técnico para a realização deste trabalho.

Agradeço profundamente aos meus orientadores Lucas Moreira Furlan e Vania Silvia Rosolen por toda a orientação, acompanhamento, conhecimento, sabedoria e amizade. Além disso, agradeço ao Lucas pela incansável disposição de me auxiliar com todos os ajustes, correções e sugestões necessárias para que esse trabalho se desenvolvesse da melhor forma possível. Agradeço à Profa. Vania pela enorme oportunidade e confiança que me foi dada de realizar esta pesquisa, que se iniciou pelo desenvolvimento da minha iniciação científica e que fundamentou o desenvolvimento do meu trabalho de conclusão de curso. Gostaria de destacar que minha graduação se tornou muito mais agregadora, tanto profissionalmente quanto pessoalmente, com a orientação e amizade de vocês.

Agradeço aos meus orientadores de intercâmbio acadêmico Jan Komárek, Jiří Prošek e Petra Šímová e a Czech University of Life Sciences Prague pela oportunidade de aprendizado de técnicas utilizadas neste trabalho.

Agradeço a toda minha família e amigos pelo apoio de sempre. Especialmente, agradeço à minha mãe, Suzana Alencar, e ao meu pai, Paulo Sérgio Vieira de Alencar, por toda a base que me deram e que me permitiu trilhar o meu caminho até a universidade, assim como possibilitou toda a realização da minha graduação.

Dedico este trabalho aos meus pais:

Suzana Alencar

Paulo Sérgio Vieira de Alencar

Resumo

As áreas úmidas podem ser compreendidas como ecossistemas localizados na interface entre ambientes terrestres e aquáticos, permanentemente ou periodicamente inundados, com fauna e flora adaptadas à sua dinâmica hídrica. Embora apresentem tamanha importância, as áreas úmidas têm sido largamente degradadas, principalmente por atividades de irrigação, drenagem e extração de águas subterrâneas. Devido a importância das áreas úmidas e sua contínua degradação ao redor do mundo, o monitoramento desses ambientes se torna essencial. Nesse sentido, o sensoriamento remoto é capaz de prover dados que permitem delinear, explicar e prever mudanças nesses ecossistemas. Com o avanço das tecnologias computacionais e de sensoriamento remoto, a fotogrametria área digital por veículos aéreos não tripulados (VANT) foi desenvolvida e demonstrou ser uma eficiente alternativa às tecnologias de sensoriamento remoto convencionais baseadas em satélites. O sensoriamento remoto a partir de VANT pode fornecer imagens de altíssima resolução ($+ 10 \text{ cm/pixel}$) e é eficiente para classificação, delineamento, mapeamento e monitoramento de áreas úmidas, permitindo a obtenção de dados de grande detalhamento. Esse trabalho utilizou a fotogrametria aérea digital a partir do método structure-from-motion-multi-view-stereo (SfM-MVS) para monitorar, ao longo de doze meses, três áreas úmidas localizadas no Cerrado Brasileiro, na região de Rio Claro (SP). A fotogrametria a partir de VANT foi uma excelente ferramenta de mapeamento e monitoramento sazonal das áreas úmidas do Cerrado e possibilitou a obtenção de ortofotomosaicos e modelos digitais de elevação, que em conjunto com uma análise integrada a dados meteorológicos, proporcionaram maior compreensão da dinâmica hídrica de cada área úmida estudada. No mês mais seco (outubro de 2019), as áreas A, B e C apresentaram áreas inundadas, respectivamente, de 115396 m^2 , 0 e 21470 m^2 e no mês mais úmido (fevereiro de 2020), 130339 m^2 , 21358 m^2 e 1131 m^3 . Esse trabalho contribui para a maior compreensão das aplicações da fotogrametria aérea digital em áreas úmidas geograficamente isoladas, sobretudo do Cerrado Brasileiro.

Palavras-Chave: Áreas Úmidas. Áreas Úmidas Isoladas. Drones. Fotogrametria Aérea Digital. Structure-from-Motion. Wetland.

Abstract

Wetlands can be understood as ecosystems located at the interface between terrestrial and aquatic environments, permanently or periodically flooded, with fauna and flora adapted to their water dynamics. Although they are of such importance, wetlands have been largely degraded, mainly by irrigation, drainage and groundwater extraction activities. Due to the importance of wetlands and their continuous degradation around the world, monitoring of these environments is essential. In this sense, remote sensing is capable of providing data that allow to outline, explain and predict changes in these ecosystems. The advancement of computational and remote sensing technologies, made it possible the development of UAV (Unmanned Aerial Vehicles) digital photogrammetry that demonstrated to be an efficient alternative to conventional remote sensing technologies based on satellites. Remote sensing from UAVs can provide very high resolution images ($+ 10 \text{ cm / pixel}$) and is efficient for classification, delineation, mapping and monitoring of wetlands, allowing the acquisition of detailed data. This work used UAV digital aerial photogrammetry and the structure-from-motion-multi-view-stereo method (SfM-MVS) to monitor, throughout twelve months, three wetlands located in the Brazilian Cerrado, in the municipality of Rio Claro (SP). UAV photogrammetry was an excellent tool for mapping and seasonal monitoring of wetlands in the Cerrado and made it possible to obtain orthophotomosaics and digital elevation models, which together with an integrated analysis of meteorological data, provided a greater understanding of the water dynamics of each studied wetland. In the driest month (October 2019), areas A, B and C had flooded areas, respectively, of 115396 m^2 , 0 and 21470 m^2 and in the wetter month (February 2020), 130339 m^2 , 21358 m^2 and 1131 m^3 . This work contributes to a greater understanding of the applications of digital aerial photogrammetry in geographically isolated wetlands, especially in the Brazilian Cerrado.

Keywords: Digital Aerial Photogrammetry. Drones. Geographically Isolated Wetlands. Structure-from-Motion. Wetland.

Lista de Ilustrações

Figura 1. Localização das áreas de estudo.....	14
Figura 2. Fluxograma das etapas de fotogrametria.....	16
Figura 3. Planos de voo para as áreas A, B e C.....	17
Figura 4. Drone Phantom 4Pro, DJI	17
Figura 5. Dados de sobreposição de imagem e estimativas de erro de posição.....	18
Figura 6. Ilustração do processo de aquisição de imagens para o SfM.....	19
Figura 7. Produtos das principais etapas de processamento.....	21
Figura 8. Estação meteorológica do CEAPLA.....	22
Figura 9. Ilustração do método de estimativa de vegetação arbórea.....	24
Figura 10. Ortomosaicos da área A para o período de estudo.....	25
Figura 11. Modelos Digitais de Superfície da área A para o período de estudo.....	26
Figura 12. Comparação da área A para o mês mais seco e o mês mais úmido.....	27
Figura 13. Bordas da área úmida A para o mês mais seco e o mês mais úmido.....	28
Figura 14. Ortomosaicos da área B para o período de estudo.....	32
Figura 15. Modelos Digitais de Superfície da área B para o período de estudo.....	33
Figura 16. Comparação da área B para o mês mais seco e o mês mais úmido.....	34
Figura 17. Bordas da área úmida B para o mês mais seco e o mês mais úmido.....	35
Figura 18. MDS, MDT e nDSM da área B para agosto a outubro de 2019.....	36
Figura 19. Ortomosaicos da área C para o período de estudo.....	38
Figura 20. Modelos Digitais de Superfície da área C para o período de estudo.....	39
Figura 21. Comparação da área C para o mês mais seco e o mês mais úmido.....	40
Figura 22. Bordas da área úmida C para o mês mais seco e o mês mais úmido.....	41

Lista de Tabelas

Tabela 1. Características físicas das áreas úmidas	15
Tabela 2. Informações extraídas dos resultados da fotogrametria digital.....	22
Tabela 3. Comparação de área inundada da área úmida A para diferentes meses.....	30
Tabela 4. Comparação de área inundada da área úmida B para diferentes meses.....	34
Tabela 5. Comparação de área inundada da área úmida C para diferentes meses.....	40

Lista de Gráficos

Gráfico 1. Taxas de precipitação média mensal para o período de estudo.....	25
Gráfico 2. Taxas de evapotranspiração média mensal para o período de estudo.....	26
Gráfico 3. Temperatura média mensal (C°) para o período de estudo.....	26
Gráfico 4. Balanço hídrico mensal para o período de estudo.....	26

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
1.1. Objetivo.....	11
2. MATERIAIS E MÉTODOS.....	12
2.1. Seleção e descrição das áreas de estudo	12
2.2. Planejamento dos campos, criação do plano de voo e aquisição das imagens.	14
2.3. SfM-MVS	17
2.4. Dados Meteorológicos	20
2.5. Método de estimativa de altura da vegetação arbórea	21
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES	23
3.1. Dados meteorológicos.....	23
3.1.2. Gráfico de balanço hídrico:	25
3.1.3. Gráfico de temperatura:.....	25
3.2. Ortomosaicos, modelos digitais de elevação e análise integrada	25
3.2.1. Área úmida A.....	25
3.2.2. Área Úmida B.....	30
3.3. A importância do mapeamento de alta resolução das áreas úmidas.	40
4. CONCLUSÕES	42
Referências	43

1. INTRODUÇÃO

“O termo "área úmida" não tem um significado único, científico e universal, pois foi aplicado por cientistas de diferentes campos de estudo, agências de recursos com interesses variados, organizações conservacionistas, e outros para descrever terras que são mais úmidas do que terras áridas” (Tiner, 2017). Um dos motivos pela existência das diferentes definições das áreas úmidas ao redor do mundo é que, embora possuam grande similaridade, elas ainda podem apresentar grande variabilidade quanto à localização, tamanho e hidrologia (Boon et al. 1997). Em um contexto geral, as áreas úmidas podem ser compreendidas como ecossistemas localizados na interface entre ambientes terrestres e aquáticos, permanentemente ou periodicamente inundados, com fauna e flora adaptadas à sua dinâmica hídrica (Junk et al, 2015). Assim, três principais aspectos em comum se destacam na descrição das áreas úmidas globalmente: a presença de água, de solo hídrico e de vegetação específica adaptada a esses ambientes (Bourgeau-Chavez et al, 2009).

As áreas úmidas possuem diversos papéis socioambientais e são consideradas áreas de prioridade para a preservação ambiental pelo Código Florestal Brasileiro (Rosolen et al, 2015). Segundo Melton et al. (2013), é estimado que as áreas úmidas ocupam no mínimo 7 milhões de quilômetros quadrados do planeta e cerca de 20% do território brasileiro (Junk et al, 2013). As áreas úmidas promovem a filtração de água, conservação de solos, protegem as linhas costeiras, previnem inundações, desastres naturais e poluição, podem atuar no estoque de água, recarga de aquíferos, estoque de carbono e na regulação do microclima (Junk et al, 2014; Mahdavi et al, 2017). Além disso, as áreas úmidas servem como *habitats* para diversas espécies de plantas e animais, fomentam economias locais que utilizam da pesca e da pastagem e são indicadores de saúde ambiental (Mahdavi et al, 2017).

Embora apresentem tamanha importância, as áreas úmidas têm sido largamente degradadas, principalmente por atividades de irrigação, drenagem e extração de águas subterrâneas (Koch et al. 2012). No passado, as áreas úmidas frequentemente não eram consideradas importantes e foram drenadas e convertidas em áreas de agricultura e de expansão urbana (Mitsch and Gosselink 2000; Ewin et al, 2012; Rosolen et al, 2015). Segundo Davidson (2014), estima-se que entre 54 a 57% das áreas úmidas do mundo foram perdidas ou convertidas, processos que foram acelerados no século 20 e começo do século 21. Outros fatores que impactam as áreas úmidas são as mudanças climáticas, as secas, a salinização, a eutrofização e a poluição (Alvarez-Cobelas et al. 2008).

Devido a importância das áreas úmidas e sua contínua degradação ao redor do mundo, o monitoramento desses ambientes se torna essencial (Mahdavi et al, 2017). Nesse sentido, o sensoriamento remoto pode ser um importante instrumento, pois é capaz de prover dados que permitem delinear, explicar e prever mudanças nesses ecossistemas (Zweig et al, 2015).

Com o avanço das tecnologias computacionais e de sensoriamento remoto, a fotogrametria área digital por veículos aéreos não tripulados (VANTs) foi desenvolvida e demonstrou ser uma eficiente alternativa às tecnologias de sensoriamento remoto convencionais baseadas em satélites (Shabazi et al, 2014). O sensoriamento remoto a partir de imagens de VANT é eficiente para classificação e delineamento de áreas úmidas, identificação de áreas de saturação e acúmulo de água, mapeamento de vegetação característica, análise da hidrodinâmica superficial e para detecção de pequenas mudanças hidrológicas e geomorfológicas (Boon, 2016), provendo dados de grande detalhamento necessários para avançar no conhecimento de áreas úmidas (Shahbazi et al., 2014).

A fotogrametria aérea digital a partir de imagens de VANT também possui a capacidade de gerar modelos digitais de elevação (MDEs), valiosa ferramenta de investigação e geomorfologia de uma região (Ouedraogo et al, 2014), e também ortofotomosaicos de alta resolução que possibilitam a aquisição de informações ecológicas e fisiológicas detalhadas (Li et al., 2010). Ainda, um avanço importante da fotogrametria a partir de VANT é a capacidade de captar informações em 3D detalhadas de uma superfície, a partir do método structure-from-motion-multi-view-stereo (SfM-MVS) (James and Robson 2012, Westoby et al., 2012, Fonstad et al., 2013) com as vantagens de baixo custo, economia de tempo, trabalho de campo mínimo e com boa precisão (Westoby et al, 2012; Uysal et al, 2015). Nesse sentido, recente estudo de Furlan et al (2021) aplicou a técnica SfM-MVS para o estudo de áreas úmidas do Cerrado e demonstrou resultados satisfatórios, o que reforçou a aplicabilidade do imageamento por VANT para esses ambientes. Dessa forma, esse trabalho utilizou a fotogrametria aérea digital a partir de imagens de VANT e o método SfM-MVS a fim de mapear e monitorar 3 áreas úmidas localizadas no Cerrado Brasileiro.

1.1. Objetivo

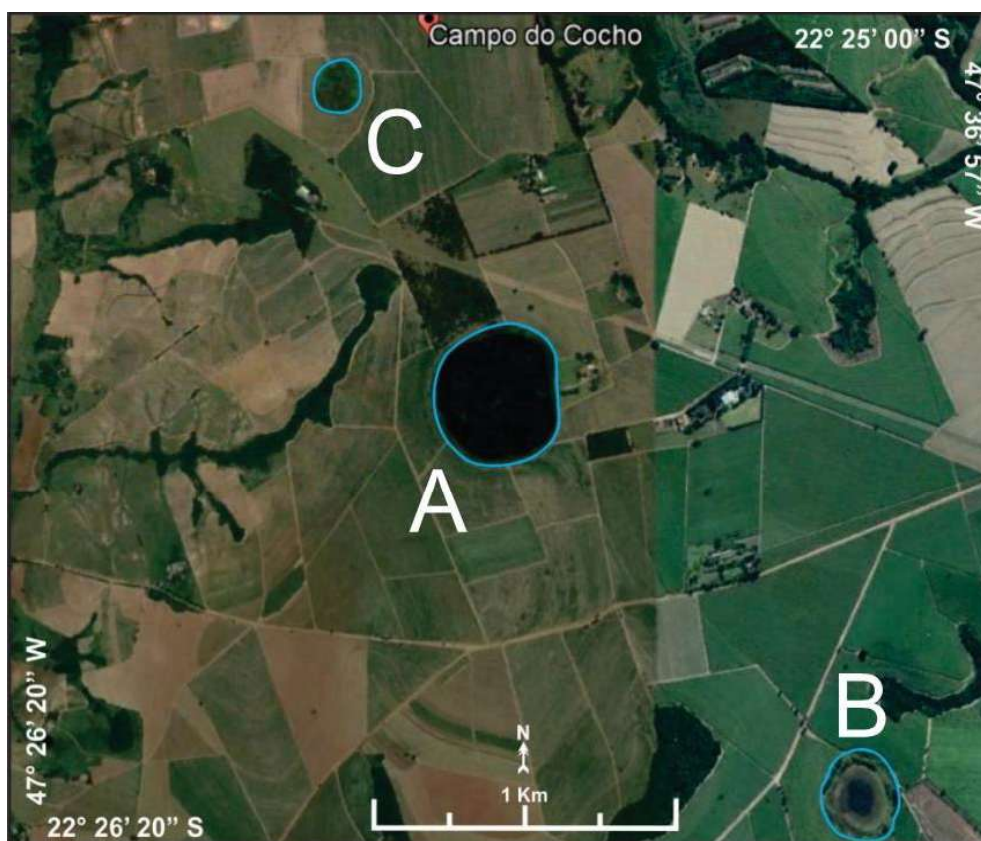
O presente trabalho teve por objetivo realizar o monitoramento, com enfoque na variação hídrica, de três áreas úmidas localizadas no Campo do Cocho, área rural do município de Rio Claro (SP), ao longo de 12 meses, utilizando a fotogrametria aérea digital a partir de imagens de VANT baseada na metodologia SfM-MVS e análise integrada a dados meteorológicos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Seleção e descrição das áreas de estudo

Em primeiro lugar, para identificação e localização das possíveis áreas de estudo, imagens dos satélites Landsat e Copernicus foram utilizadas. A partir dessas imagens, foram buscadas feições com aspectos característicos de áreas úmidas: depressões topográficas com presença de água periódica ou permanente e vegetação interna diferente da vegetação de entorno. Após essa etapa, visitas a campo foram realizadas para melhor caracterização das áreas úmidas e, por fim, três áreas foram selecionadas. A seleção priorizou os seguintes fatores: (1) áreas minimamente preservadas, (2) com diferentes dinâmicas hídricas entre si e (3) circundadas por agricultura. As três áreas úmidas selecionadas estão localizadas em uma região rural conhecida como Campo do Cocho, no município de Rio Claro, estado de São Paulo. As áreas úmidas foram denominadas de A, B e C de acordo com suas dimensões, sendo A a área úmida maior e C a menor. A seguir, a figura 1 mostra a localização das áreas de estudo.

Figura 1 - Localização das áreas de estudo.



Fonte: Google Maxar Technologies, 2020

A tabela 1 apresenta características gerais de cada área e as especificações técnicas de cada voo realizado. Os dados de localização, área e perímetro da tabela foram obtidos a partir de medições e demarcações visuais a partir da ferramenta de polígonos do software Agisoft Metashape. A quantidade de fotografias e a altitude de voo foram configuradas com base na dimensão das áreas.

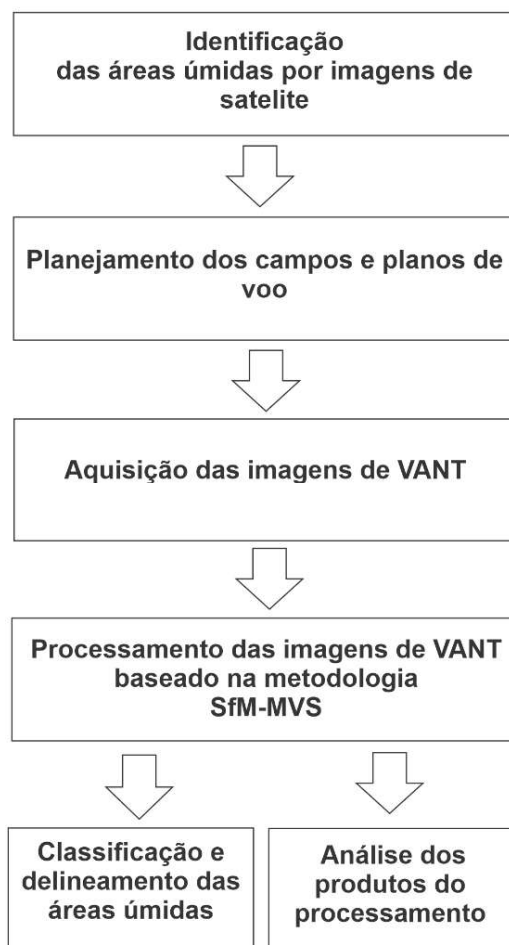
Tabela 1 – Características físicas das áreas úmidas e informações técnicas dos voos de VANT.

Denominação	Localização	Área	Perímetro	Quantidade de fotografias capturadas por mês	Altitude de voo
Área Úmida A	Latitude: 22°25'40.55"S	172.655 m ²	1.485 m	250 fotografias	120 m
	Longitude: 47°37'51.94"O				
	Altitude: 615 m				
Área Úmida B	Latitude: 22°26'23.52"S	65.692 m ²	972 m	140 fotografias	120 m
	Longitude: 47°37'8.19"O				
	Altitude: 605 m				
Área Úmida C	Latitude: 22°25'7.41"S	31.753 m ²	636 m	160 fotografias	60 m
	Longitude: 47°38'10.81"O				
	Altitude: 625 m				

Fonte: Agisoft Metashape

A partir da etapa de identificação e seleção das áreas de estudo, seguem-se as etapas de fotogrametria a partir de VANT. A figura 2 resume as etapas de fotogrametria que serão tratadas adiante.

Figura 2 – Fluxograma das etapas necessárias para a fotogrametria a partir de VANT.

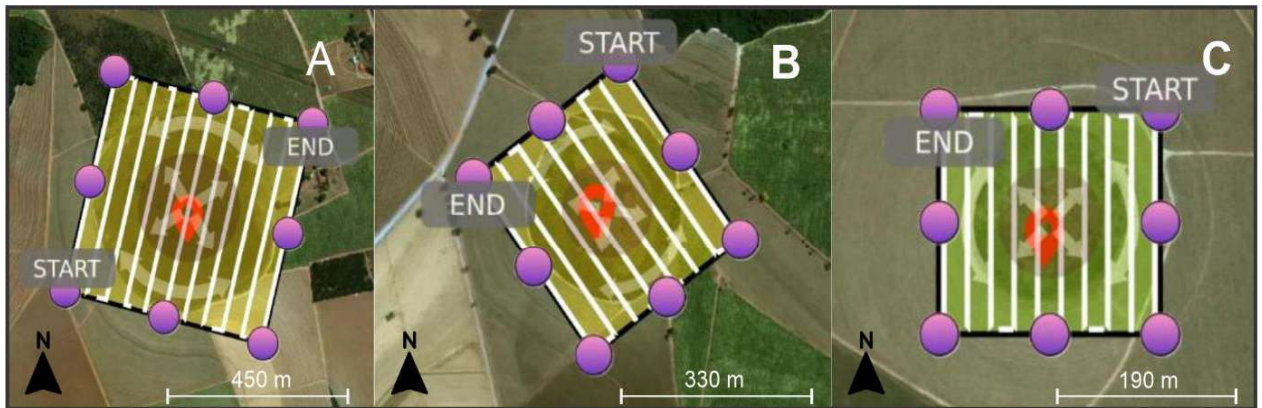


Fonte: Próprio autor.

2.2. Planejamento dos campos, criação do plano de voo e aquisição das imagens.

O planejamento dos campos se iniciou com a elaboração dos planos de voo, criados a partir do software Pix4Dmapper (pix4d.com). O processo de configuração do plano de voo ocorre de forma semi-automática e permite a determinação de diferentes parâmetros, tais como localização do voo, linhas de voo (referentes ao trajeto do VANT), altitude, intervalo de captura de fotografia e sobreposição das imagens. A partir disso, os voos ocorrem no modo *auto piloto* e podem ser monitorados por uma estação em solo (Ground Control Station), composta pelo controle remoto e um smartphone conectado. Para a aquisição das imagens foi utilizado o VANT de modelo Phantom 4 Pro da empresa DJI (dji.com). O VANT possui receptor duplo GPS/GLONASS e sensor DJI 1'' CMOS Effective, com 20 megapixels. O GPS embarcado é sincronizado com a câmera e permite que os voos ocorram de forma autônoma, de acordo com plano de voo elaborado. Os planos de voo realizados podem ser visualizados na figura 3 e o modelo do VANT pode ser visualizado na figura 4.

Figura 3 - Planos de voo para as áreas A, B e C.



Fonte: Pix4Dmapper

Figura 4 - Drone Phantom 4Pro, DJI

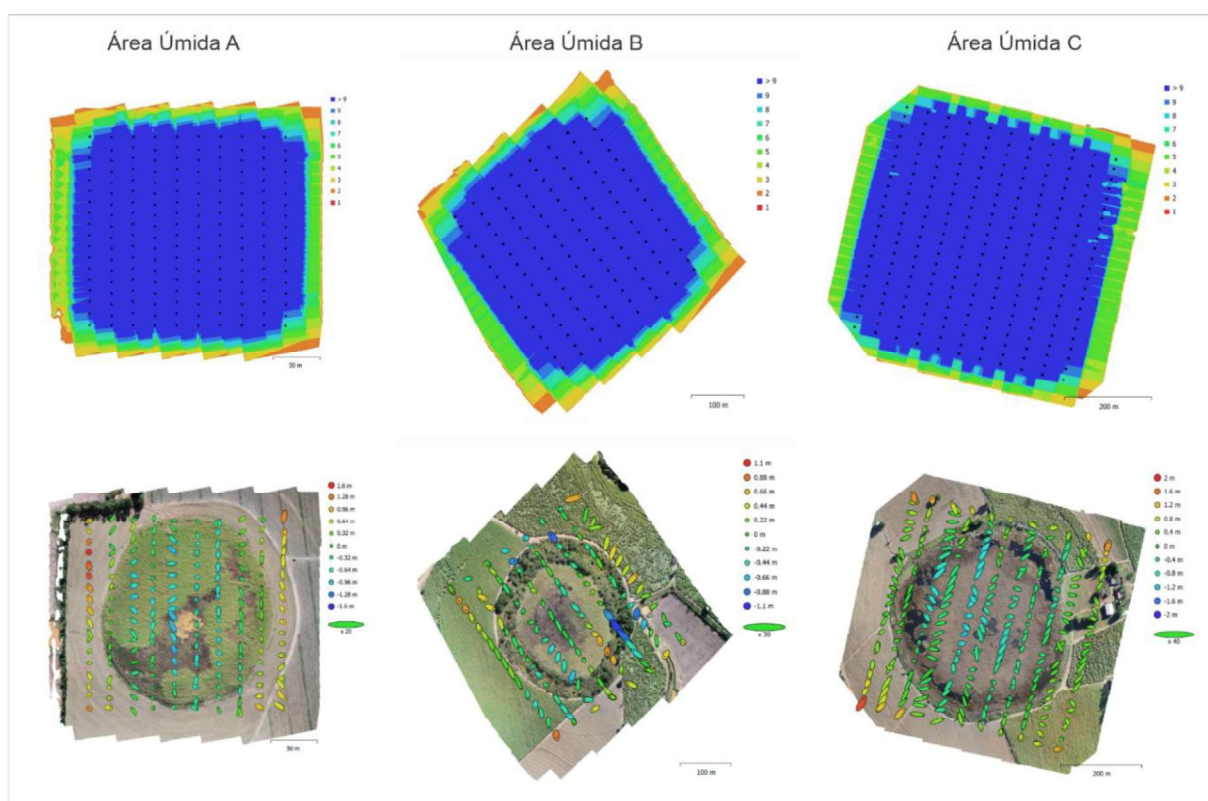


Fonte: Modificado de DJI (2018).

O método fotogramétrico Structure from Motion-Multi View Stereo (SfM-MVS), depende de pontos em comum entre diferentes imagens (*keypoints*) para a obtenção de uma cobertura confiável da paisagem. Portanto, é necessária atenção ao processo de aquisição das imagens, que deve levar em consideração a maximização das sobreposições entre elas (lateral e longitudinal). A sobreposição das imagens possui importância destacada, pois a eficiência do método SfM-MVS, que embasa esse estudo e que será abordado mais adiante, está diretamente relacionada a maiores taxas de sobreposição de imagem (>60%) (Dandois et al, 2015). Maiores sobreposições podem ser obtidas ao se utilizar distâncias menores entre as linhas de voo durante a definição do plano de voo. Assim, os planos de voo para as 3 áreas estudadas foram configurados para que fosse obtido um valor mínimo de 80% de sobreposição lateral e longitudinal das imagens, e para que no centro do imageamento fossem obtidas no mínimo 9

imagens sobrepostas. Na figura 5, são exemplificados os dados de sobreposição de imagens e as estimativas de erro da localização da câmera.

Figura 5 – Dados de sobreposição de imagem (acima) e dados de posição da câmera e estimativa de erro (abaixo) para cada área úmida. A tonalidade em azul nas imagens acima demonstram a quantidade de 9 imagens sobrepostas ou mais. Os indicadores das imagens abaixo representam menores erros quando apresentam cores mais frias e maiores erros quando apresentam cores mais quentes.



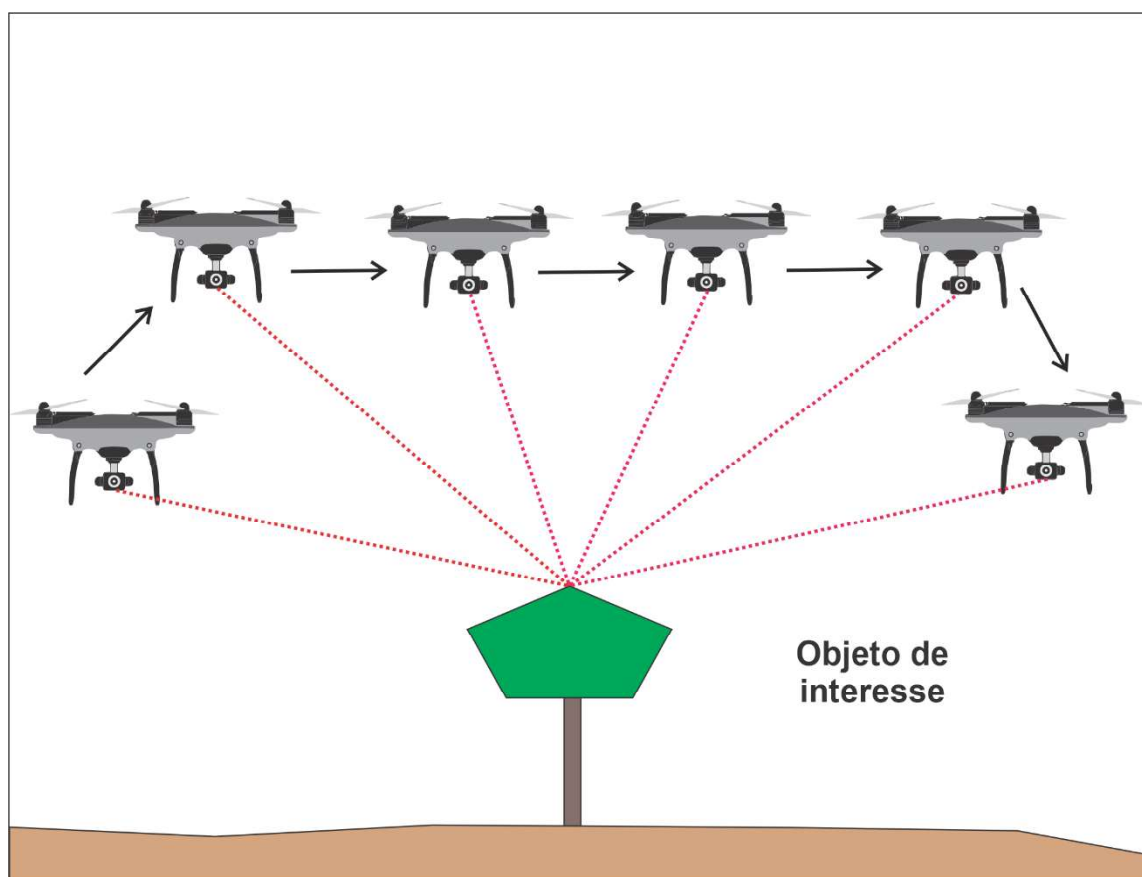
Fonte: Relatórios gerados pelo software Agisoft Metashape.

A quantidade de fotos necessária para uma reconstrução bem-sucedida da área de estudo varia muito devido a fatores como iluminação, complexidade e especificidades de cada área (Westoby et al, 2012). Desse modo, não é possível determinar para todos os contextos o número mínimo necessário de fotos. No entanto, é recomendado obter o maior número de imagens possível para o método SfM-MVS, buscando a otimização do número máximo de correspondências de keypoints, diretamente relacionada à precisão dos produtos do processamento (Westoby et al, 2012).

2.3. *SfM-MVS*

O método fotogramétrico utilizado para esse estudo foi o Structure from Motion-Multi View Stereo (SfM-MVS). Este método consiste na reconstrução de uma área a partir da geração de uma nuvem de pontos 3D sem escala e referência, com base em uma série de imagens 2D sobrepostas obtidas pelo VANT (SfM) e a criação de uma malha 3D a partir de vértices e polígonos (MVS) (Gomez et al, 2015). A vantagem deste método frente a outros métodos fotogramétricos tradicionais é a de reconstruir a geometria 3D de uma área, apenas utilizando as informações de posição e orientação da câmera, sem haver a necessidade de especificar uma rede de alvos com posições conhecidas prioritariamente (Westoby et al, 2012). A figura 6 ilustra o processo de aquisição de imagens para o SfM.

Figura 6 - Ilustração do processo de aquisição de imagens para aplicação do método SfM.



Fonte: Próprio autor.

Dessa forma, na etapa de SfM, a partir de pontos em comum entre diferentes imagens da cena, são extraídos dados de orientação e posição da câmera e a partir deles, uma nuvem de pontos em 3D é reconstruída, porém, em um sistema de coordenadas relativa e sem escala, que deve ser posteriormente alinhado ao mundo real com escala e coordenadas absolutas (Westoby,

2012). Para este alinhamento, é possível utilizar Pontos de Controle em Solo (GCPs), que são pontos escolhidos ou demarcados na área de estudo com coordenadas já conhecidas ou obtidas por GPS em solo ou podem ser utilizados dados de posição de GPS vinculados à câmera. A vantagem em utilizar dados de GPS vinculados à câmera é a maior velocidade de processamento e facilidade dos procedimentos em campo, entretanto, para se obter adequada precisão, são necessários dados de GPS de alta qualidade, principalmente ao se trabalhar com áreas de pequenas dimensões (Gomez, 2015). Nesse sentido, para as áreas úmidas de estudo, foram obtidas resoluções de aproximadamente 1,5 a 4 cm/pix de resolução de solo e de 6 a 14 cm/pix de resolução para os modelos digitais de elevação, apenas utilizando-se os dados de GPS vinculados a câmera, que foram considerados de adequada qualidade para as análises do estudo.

Na etapa seguinte, de MVS, ocorre a construção de uma malha 3D de vértices e polígonos, baseada na nuvem de pontos construída na etapa anterior, de forma que uma maior quantidade de pontos da área é calculada. (Gomez, 2015). A malha resultante pode passar pelo processo de criação de textura que melhora a visualização do modelo 3D. Por fim, podem ser gerados os modelos digitais de elevação e ortofotomosaicos, ferramentas importantes para as análises hidrológicas e de vegetação de uma área úmida (Li et al, 2010; Ouédraogo et al, 2014). Para o presente estudo, o software utilizado para o processamento das imagens foi o Agisoft Metashape (agisoft.com) que se baseia na metodologia SfM-MVS. No software, as etapas básicas de processamento são as seguintes:

- (1) calibração automática e alinhamento de fotos
- (2) criação de uma nuvem de pontos densa
- (3) criação de uma malha de vértices e polígonos e do modelo 3D texturizado
- (4) geração dos modelos digitais de elevação e geração do ortomosaico.

As etapas 1 e 2 referem-se a processo de SfM, a etapa 3 ao MVS e a etapa 4 aos produtos que podem ser gerados e extraídos do processamento. O processamento total para cada área úmida/mês variou entre 2 a 6 horas. Esta variação ocorre pois o tempo de processamento depende da quantidade de imagens utilizadas, que foram diferentes entre cada área úmida e além disso, ao longo de período de estudo, os procedimentos foram realizados em computadores com diferentes capacidades de processamento. Nesse sentido, todo o procedimento de geração dos produtos de fotogrametria utilizados neste trabalho necessita de computadores com elevada capacidade de processamento para que possa ocorrer de forma adequada e eficiente, sendo que a qualidade desejada é diretamente proporcional a capacidade de processamento e ao tempo requeridos.

A figura 7 exemplifica os produtos das principais etapas de processamento e a tabela 2 demonstra as informações extraídas das áreas de estudo a partir da fotogrametria e dos produtos gerados. Os dados representados na tabela 2 referentes à área, perímetro, área inundada no período de seca e cheia e área de vegetação foram obtidos a partir de medições e demarcações visuais a partir da ferramenta de polígonos do software Agisoft Metashape. Os dados de sobreposição das câmeras, resolução de imagens e estimativas de localização e erro da câmera foram obtidos a partir do relatório gerado no final do processamento das imagens de cada área.

Figura 7 - Produtos das principais etapas de processamento: a) alinhamento de fotos (nuvem de pontos esparsa; b) criação da nuvem de pontos densa; c) modelo 3d texturizado; d) ortomosaico; e) modelo digital de elevação.

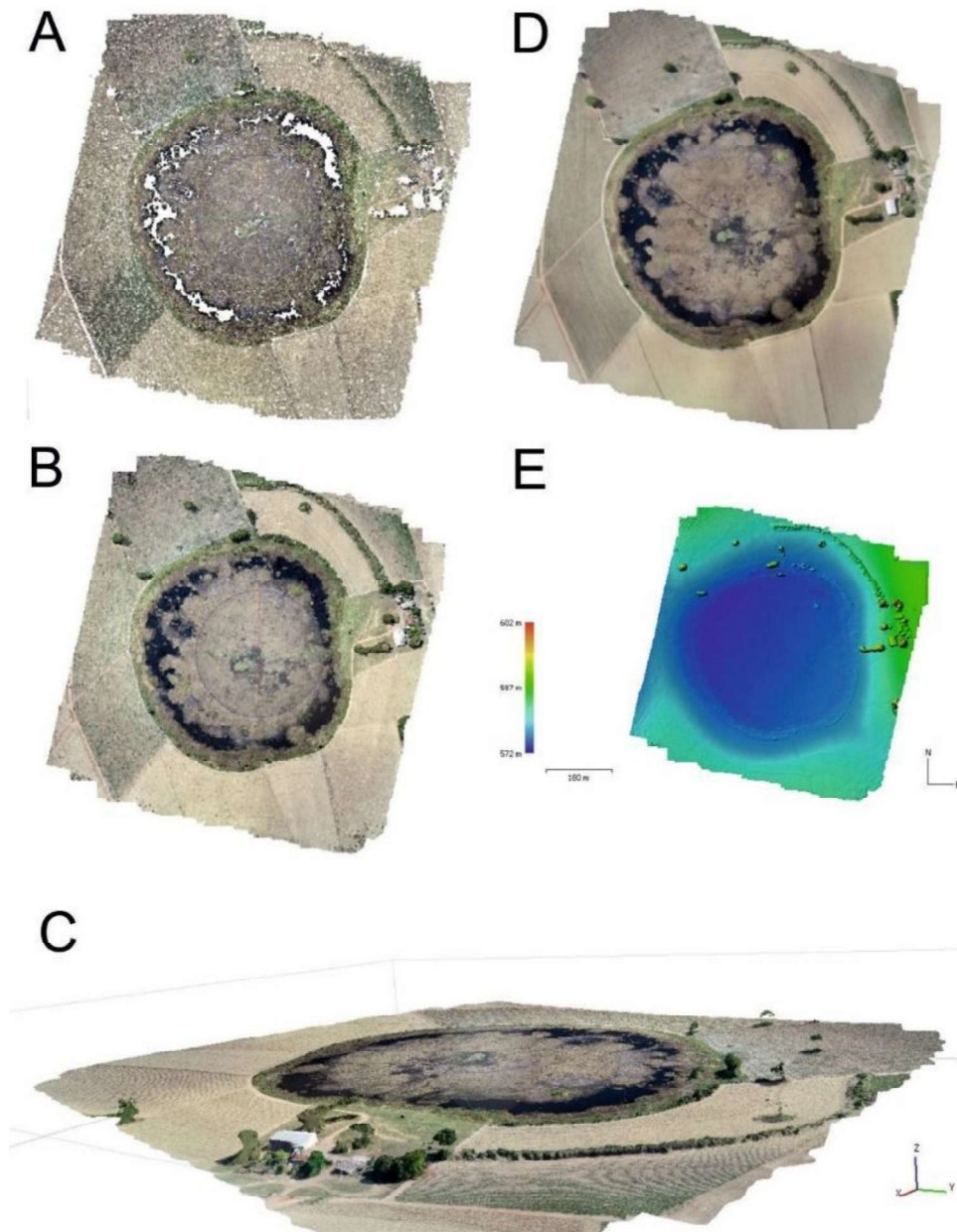


Tabela 2 – Informações extraídas a partir da fotogrametria digital aplicada a cada área úmida.

Área	Área total	Perímetro	Altitude	Área inundada no período de menor nível hídrico (outubro)	Área inundada no período de maior nível hídrico (fevereiro)	Área de vegetação arbórea	Dados de sobreposição	Resolução de imagens	Estimativas de localização e erro da câmera
A	X	X	X	X	X		X	X	X
B	X	X	X	X	X	X	X	X	X
C	X	X	X	X	X		X	X	X

Fonte: Agisoft Metashape.

2.4. *Dados Meteorológicos*

Para o mesmo período de aquisição das imagens, de agosto de 2019 a julho de 2020, foram também adquiridos dados de precipitação (P) e evapotranspiração (ET) da estação meteorológica do Centro de Análise e Planejamento Ambiental (CEAPLA) da Universidade Estadual Paulista (Unesp), campus de Rio Claro, que consiste na estação meteorológica disponível mais próxima das áreas de estudo, com a seguinte localização: latitude: 22° 23' S, longitude: 47° 32' W, altitude: 626,5 m. A partir dos dados meteorológicos obtidos, um gráfico de balanço hídrico foi gerado, baseado na subtração mensal entre as taxas de precipitação (valores considerados positivos) e de evapotranspiração (valores considerados negativos). Dessa forma, com a análise integrada do gráfico e os resultados do processamento, foi possível identificar os meses de maior seca e maior cheia, além de entender a real influência da precipitação e da evapotranspiração na paisagem. A figura 8, a seguir, mostra a estação meteorológica de Rio Claro a partir da qual os dados foram obtidos.

Figura 8 - Estação meteorológica do CEAPLA na UNESP, campus Rio Claro.



Fonte - Composição com imagens obtidas do site do IGCE, Unesp.

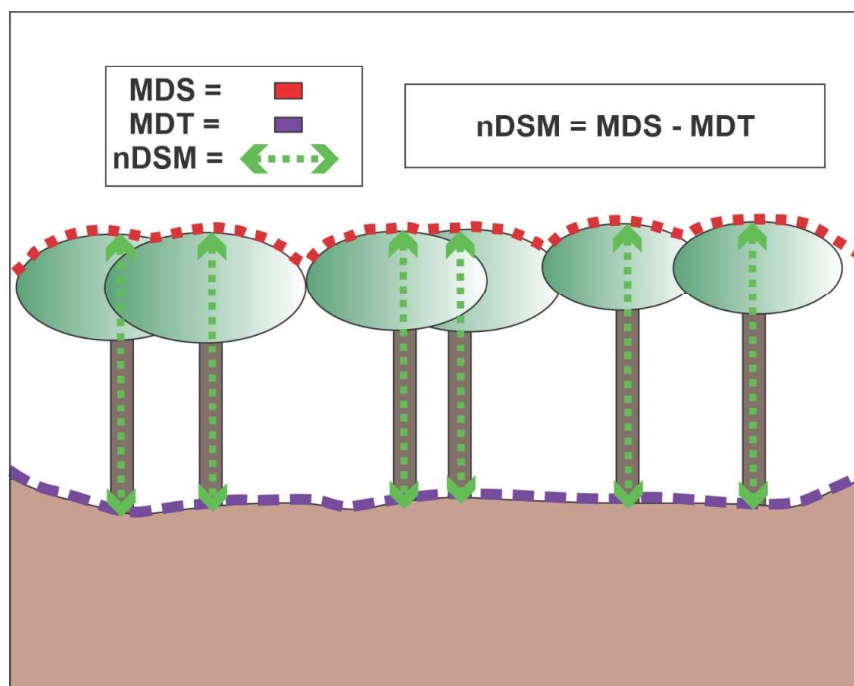
(<https://igce.rc.unesp.br/#!/unidade-auxiliar/ceapla/estacao-metereologica>)

2.5. Método de estimativa de altura da vegetação arbórea

Um método de estimativa de altura de vegetação arbórea também foi aplicado de modo básico para maior exploração das potencialidades da fotogrametria por VANT. Este método foi utilizado para os processamentos da área úmida B que possui a presença de vegetação arbórea circundante, uma característica específica importante dessa área. Esta técnica foi estudada e aplicada em um período de intercâmbio acadêmico do autor na Czech University of Life Science Prague, na República Tcheca, com base nos resultados de processamento dos meses de agosto, setembro e outubro de 2019. A estimativa de altura da vegetação do método estudado também conhecido como Modelo de Altura de Dossel (ou Canopy Height Model) se baseia na geração do Modelo Digital de Superfície Normalizado (nDSM), obtido a partir da subtração de dois tipos de modelos digitais de elevação, o Modelo Digital de Superfície (MDS) e o Modelo Digital de Terreno (MDT).

Nos modelos nDSM gerados para cada mês, os valores dos pixels representam a diferença de altura entre os pontos de solo (MDT) e do que está acima de superfície (MDS), sendo que quanto maior o “brilho” ou “presença de branco” dos pixels, maior é o valor sendo representado. Considerando que os objetos acima da superfície da área analisada são quase em sua totalidade a vegetação arbórea da área, os valores de cada pixel do nDSM podem ser aproximados para alturas das árvores da área úmida. O procedimento de geração dos nDSM foi realizado pelo software ArcGIS (esri.com) em conjunto com o software Metashape. Os produtos gerados e os resultados obtidos são demonstrados na seção de resultados e discussões. A ilustração da metodologia utilizada pode ser visualizada na figura 9.

Figura 9 – Ilustração do método de estimativa de vegetação arbórea a partir da geração do nDSM.



Fonte: Próprio autor.

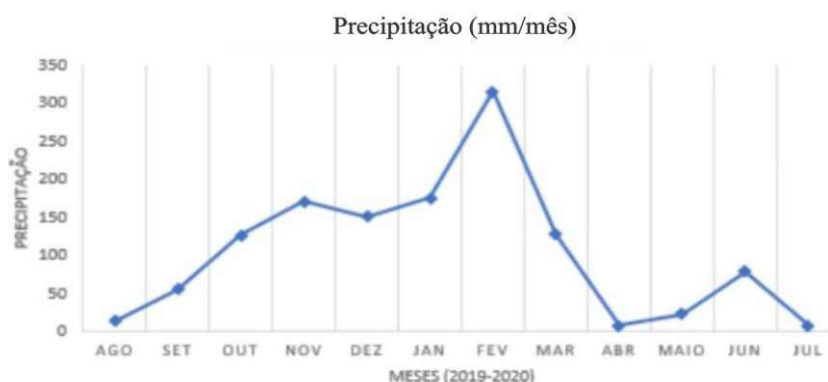
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seção de resultados e discussões se inicia com as informações geradas a partir dos dados meteorológicos, onde gráficos de balanço hídrico, precipitação, evapotranspiração e temperatura são apresentados. A partir dos gráficos, foi realizada uma análise preliminar sobre os padrões obtidos ao longo do período estudado. Os resultados e discussões são divididos por cada área úmida, onde são apresentados os ortomosaicos e modelos digitais de elevação de cada área/mês. A seguir, os resultados dos meses de maior inundação e de maior seca são comparados. Para cada área úmida foi realizada uma análise preliminar integrando os dados meteorológicos com os produtos da fotogrametria de VANT. Por fim, é introduzida uma seção de discussão sobre a importância da utilização da fotogrametria de VANT e imagens de alta resolução para o estudo de áreas úmidas.

3.1. Dados meteorológicos

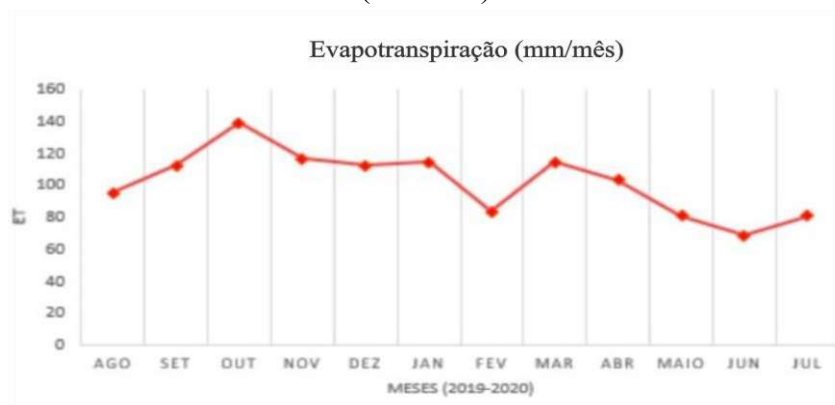
Os dados de precipitação (P), evapotranspiração (ET), temperatura (T) e balanço hídrico (BH) são inseridos a seguir, nos gráficos 1,2,3 e 4, respectivamente. O gráfico de balanço hídrico representa a diferença entre as taxas de P (valores positivos, entrada de água para dentro do sistema da área úmida) e ET (valores negativos, saída de água do sistema da área úmida) para o período, em mm/mês. Assim, o gráfico funciona como embasamento para uma análise prévia da dinâmica hídrica das áreas, porém sem a inclusão de parâmetros físicos tais como infiltração e permeabilidade do solo. Desse modo, para fins teóricos, se assumiu a ausência de influência de outras possíveis contribuições ou saídas de água para a dinâmica hídrica das áreas úmidas que não sejam P ou ET.

Gráfico 1 - Taxas de precipitação média mensal para agosto de 2019 a julho de 2020 (mm/mês).



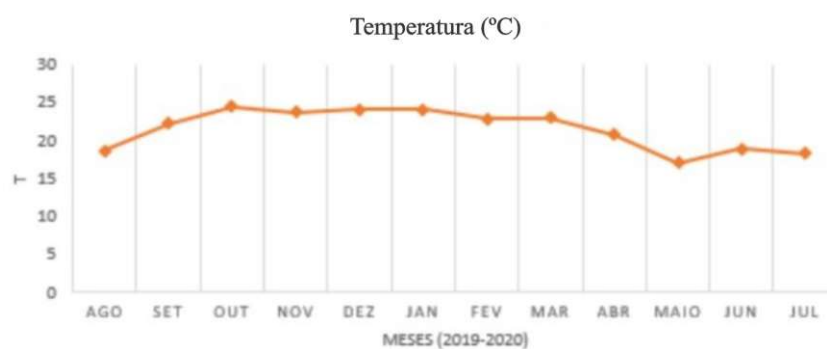
Fonte: CEAPLA (2019-2020).

Gráfico 2 - Taxas de evapotranspiração média mensal para agosto de 2019 a julho de 2020 (mm/mês).



Fonte: CEAPLA (2019-2020)

Gráfico 3 - Temperatura média mensal (C°) para agosto de 2019 a julho de 2020 (mm/mês).



Fonte: CEAPLA (2019-2020)

Gráfico 4 - Balanço hídrico mensal (diferença entre taxas de precipitação e evapotranspiração) para agosto de 2019 a julho de 2020 (mm/mês).



Fonte: CEAPLA (2019-2020)

Considerando que a inundação ou seca na área úmida depende tanto das taxas de precipitação como de evapotranspiração, serão analisadas nesta etapa a dinâmica do gráfico de EH, que engloba os dois outros parâmetros (P e ET) e o gráfico de temperatura.

3.1.2. Gráfico de balanço hídrico:

Para fins de análise, os períodos do gráfico foram separados em 2 tendências climáticas:

Tendência Climática A – Ocorre nos períodos de agosto de 2019 a outubro de 2019 e março de 2019 a julho de 2020. É caracterizada por valores negativos do gráfico e/ou decrescimento dos valores, em que há uma tendência de as taxas de ET serem maiores que as de P, ou seja, tendência da área a secar.

Tendência Climática B – Ocorre no período de novembro de 2019 a fevereiro de 2020. É caracterizada por valores positivos do gráfico e/ou crescimento dos valores, em que há uma tendência de as taxas de P serem maiores que as de ET, ou seja, tendência de aumento dos níveis hídricos na área.

3.1.3. Gráfico de temperatura:

Apresenta o valor máximo do período estudado em outubro de 2019 de 24,5 °C e valor mínimo de 17,1 °C em maio de 2020, apresentando uma variação máxima de 7,4 °C.

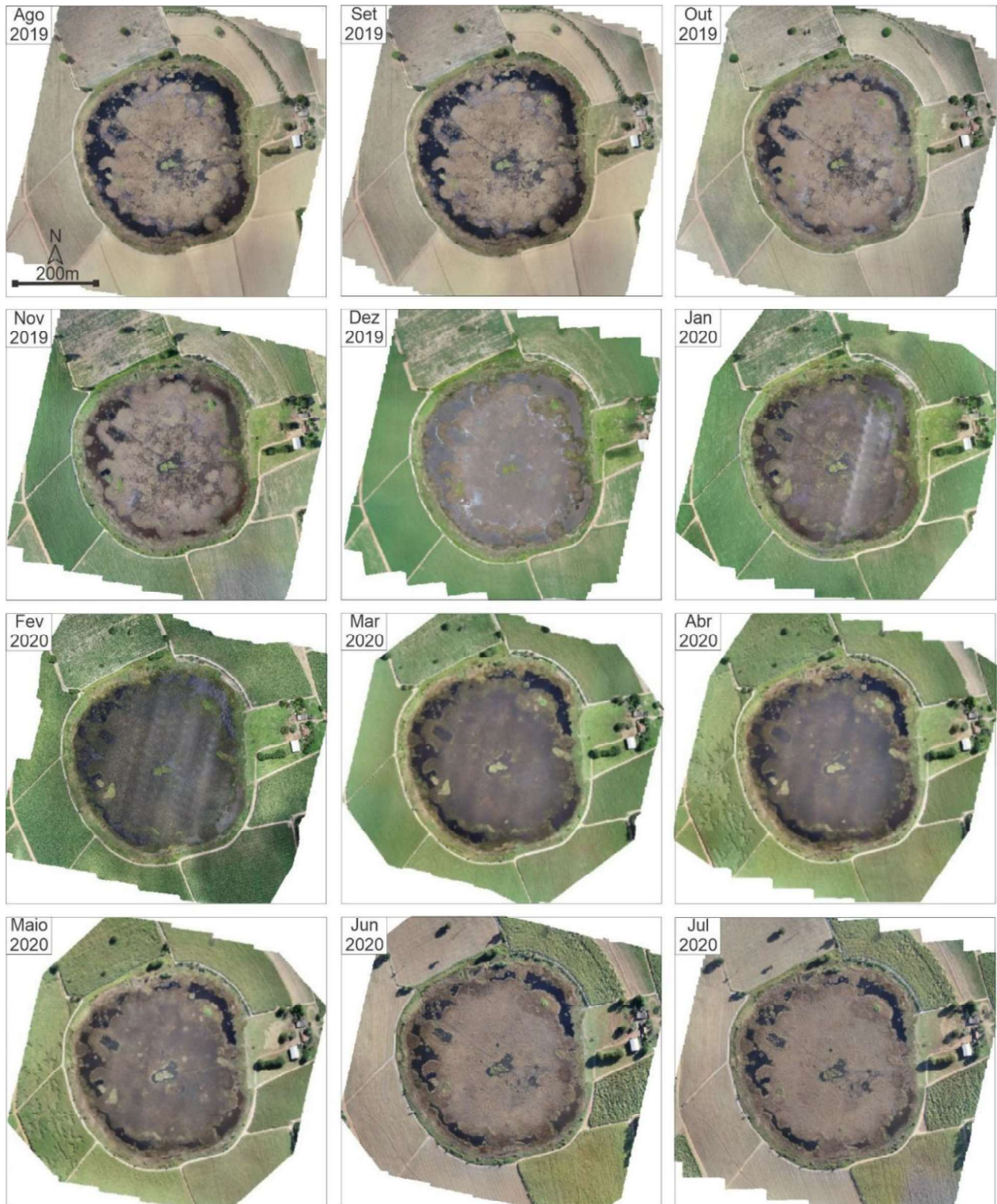
3.2. Ortomosaicos, modelos digitais de elevação e análise integrada

Nessa etapa, cada área úmida é tratada separadamente. Os ortomosaicos e modelos digitais de elevação são demonstrados para o período estudado, posteriormente são definidos os meses de maior e menor inundação com base na visualização dos ortomosaicos e por fim realizada uma análise preliminar integrada com os dados meteorológicos.

3.2.1. Área úmida A

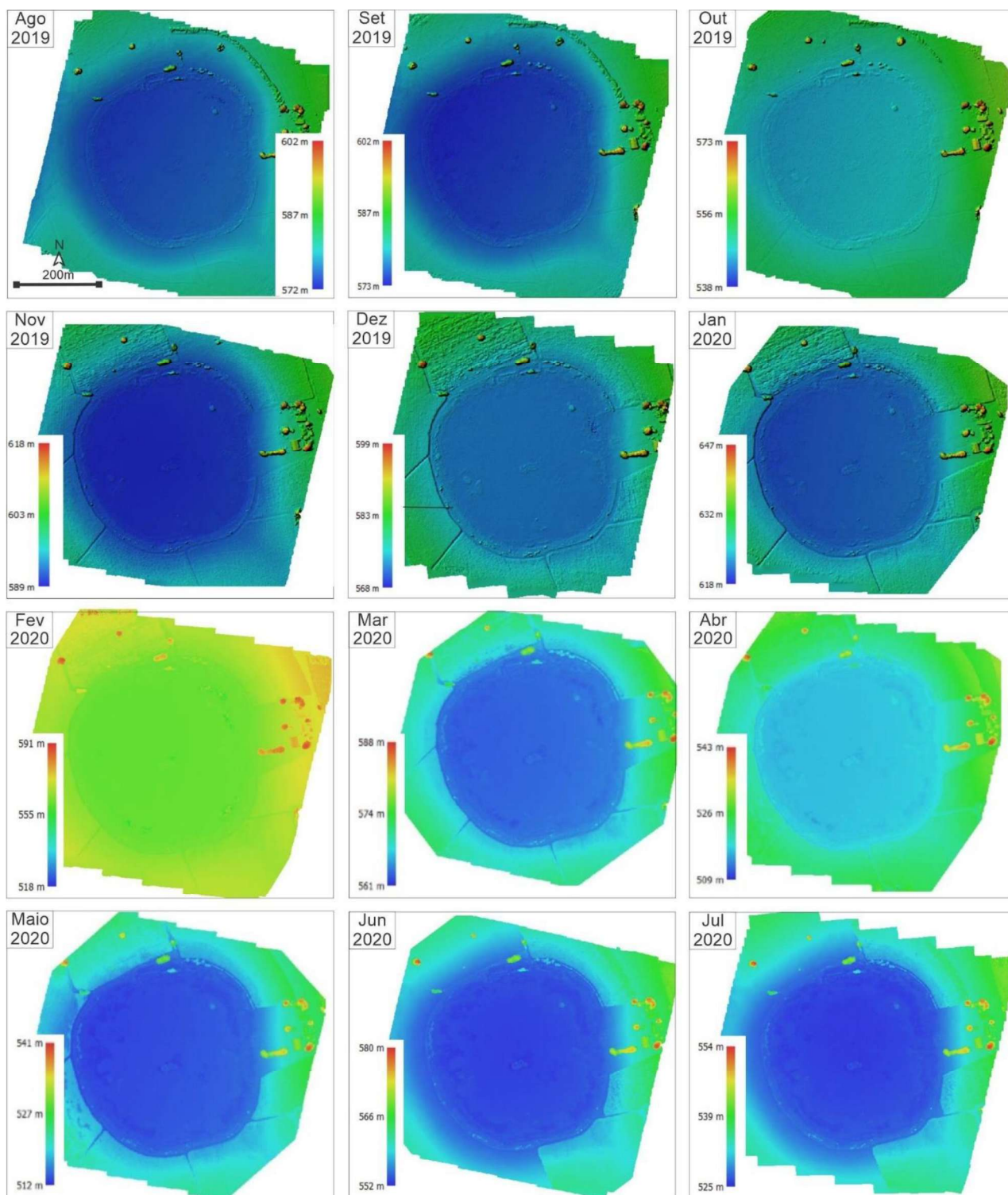
A seguir, a figura 10 retrata os doze ortomosaicos e a figura 11 os modelos digitais de elevação da área úmida A, produzidos mensalmente pelo software Agisoft Metashape. Em terceiro, a figura 12 destaca os ortomosaicos dos meses de menor e maior inundação no período de agosto de 2019 a julho de 2020. Por fim, a tabela 3 mostra a área ocupada por água na área úmida A para os meses de outubro de 2019 (maior seca) e fevereiro de 2020 (maior alagamento).

Figura 10 - Ortomosaicos da área A para o período de agosto de 2019 a julho de 2020.



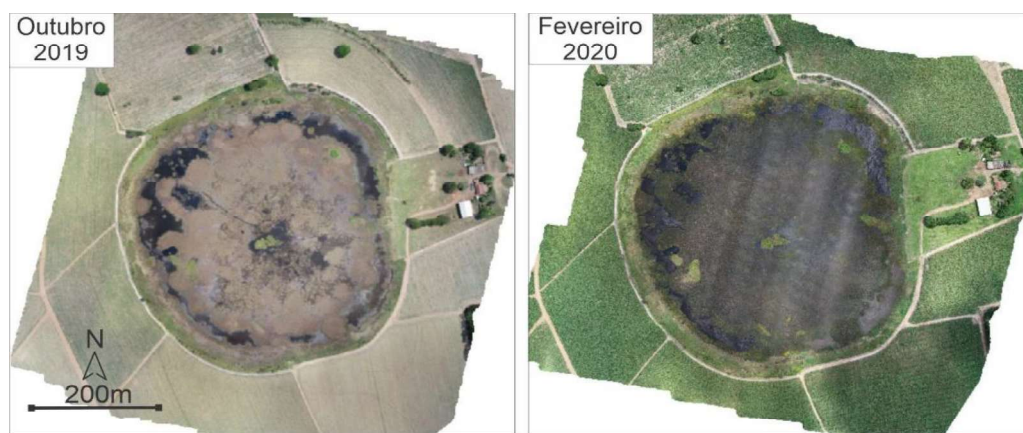
Fonte: Agisoft Metashape.

Figura 11 - Modelos Digitais de Superfície (MDS) da área A para o período de agosto de 2019 a julho de 2020.



Fonte: Agisoft Metashape.

Figura 12 - Comparação da área A para os meses de outubro de 2019 (seca) e fevereiro de 2020 (cheia).



Fonte: Agisoft Metashape.

Tabela 3 - Comparação entre a área ocupada por água na área úmida A para os meses de outubro de 2019 (seca) e fevereiro de 2020 (cheia).

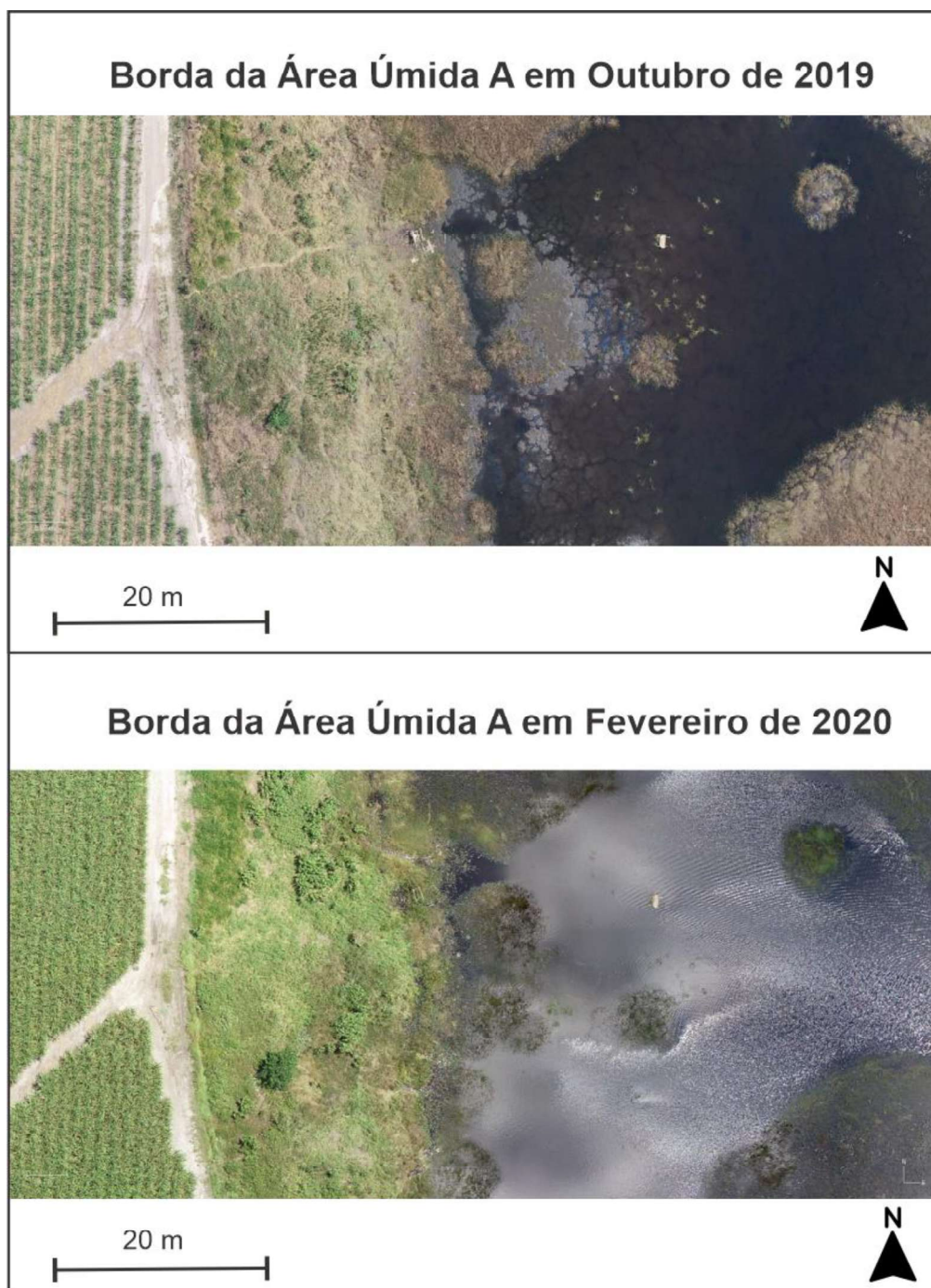
Parâmetro	Outubro de 2019	Fevereiro de 2020	Diferença entre os meses
Área ocupada por água	115.396 m ²	130.339 m ²	14943 m ²

Fonte: Agisoft Metashape.

Análise preliminar da área úmida A

A área úmida A se caracteriza por apresentar inundação perene e apresentou grande correspondência com os padrões do gráfico. Para o período de agosto de 2019 a outubro de 2019 e março de 2019 a julho de 2020, caracterizado pela tendência climática A, período de prevalência de valores negativos de EH, as bordas da área úmida A que podem ser visualizadas nos ortomosaicos apresentam menor presença de água, efeito esperado pelos dados meteorológicos. O mês que visualmente apresenta menor inundação é outubro de 2019, que no gráfico de EH é um mês posterior à uma sequência de valores negativos, correspondendo também ao que seria esperado. Para o período de novembro de 2019 a fevereiro de 2020, representado por valores preponderantemente positivos de EH, os ortomosaicos também demonstram grande correspondência e a área úmida como um todo apresenta maior quantidade de água. Outro fator que indica indiretamente a maior presença de água é o maior reflexo da luz solar aparente no ortomosaico de fevereiro de 2020, mês de maior inundação para o período estudado. A figura 13 apresenta as bordas da área úmida A para o mês de outubro de 2019 (mais seco) e fevereiro de 2020 (mais úmido).

Figura 13 – Borda Oeste da área úmida A para os períodos de outubro de 2019 e fevereiro de 2020.

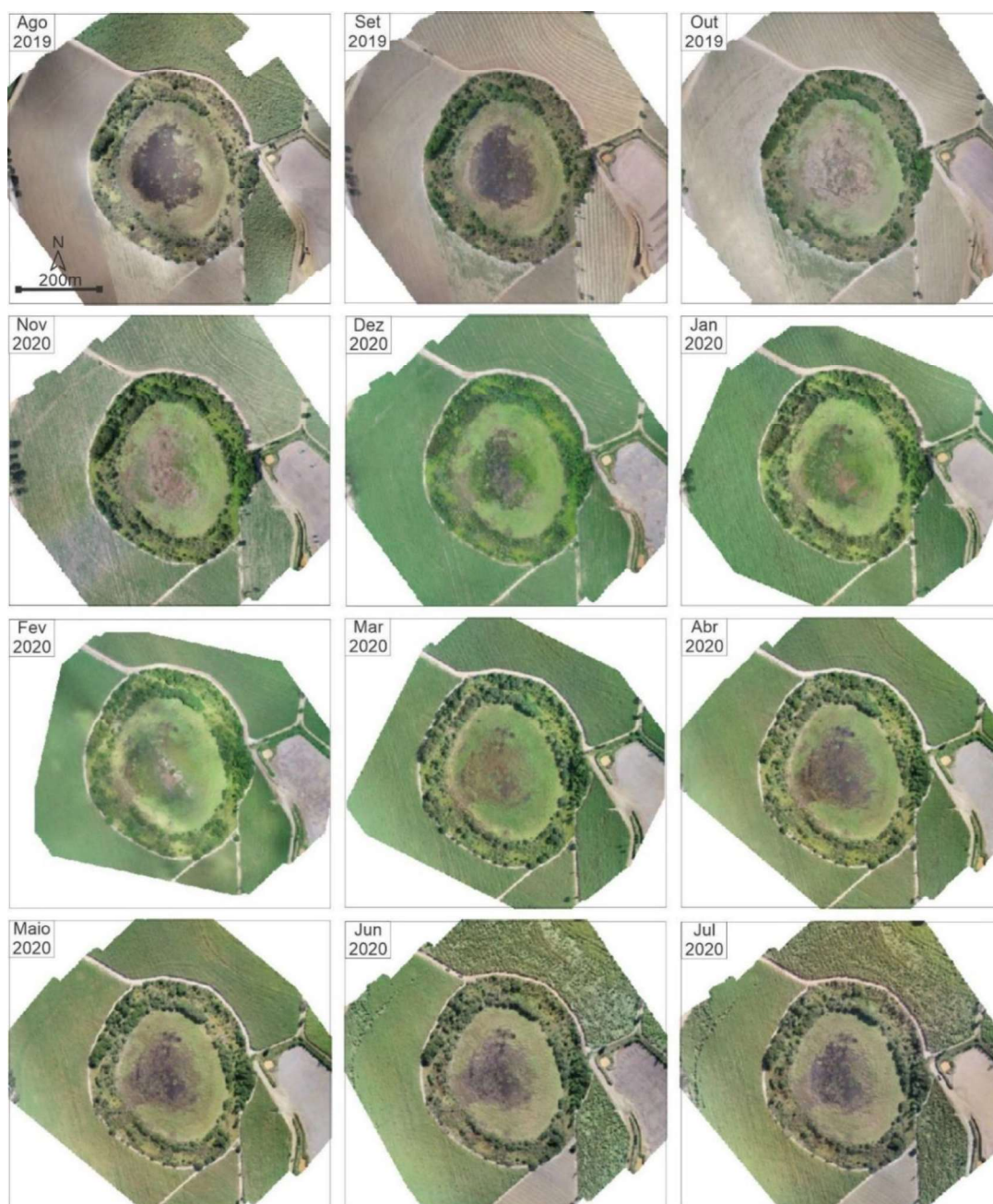


Fonte: Modificado a partir dos ortomosaicos produzidos no Agisoft Metashape.

3.2.2. *Área Úmida B*

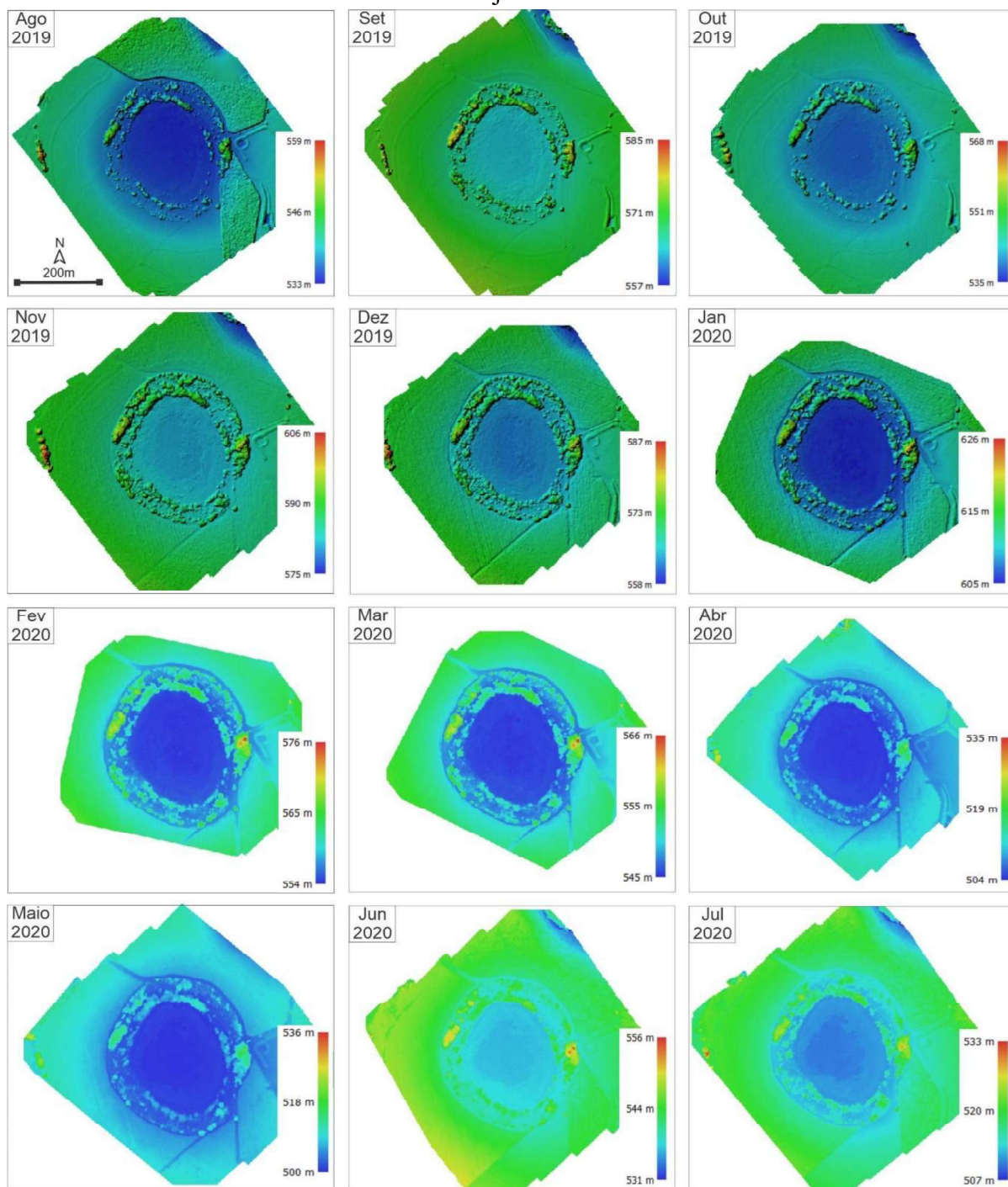
A seguir, a figura 14 retrata os doze ortomosaicos e a figura 15 os modelos digitais de elevação da área úmida B, produzidos mensalmente pelo software Agisoft Metashape. A figura 16 destaca os ortomosaicos dos meses de menor e maior inundação no período de agosto de 2019 a julho de 2020. E por fim, a tabela 4 mostra a área ocupada por água na área úmida B para os meses de outubro de 2019 (maior seca) e fevereiro de 2020 (maior cheia).

Figura 14 - Ortomosaicos da área B para o período de agosto de 2019 a julho de 2020



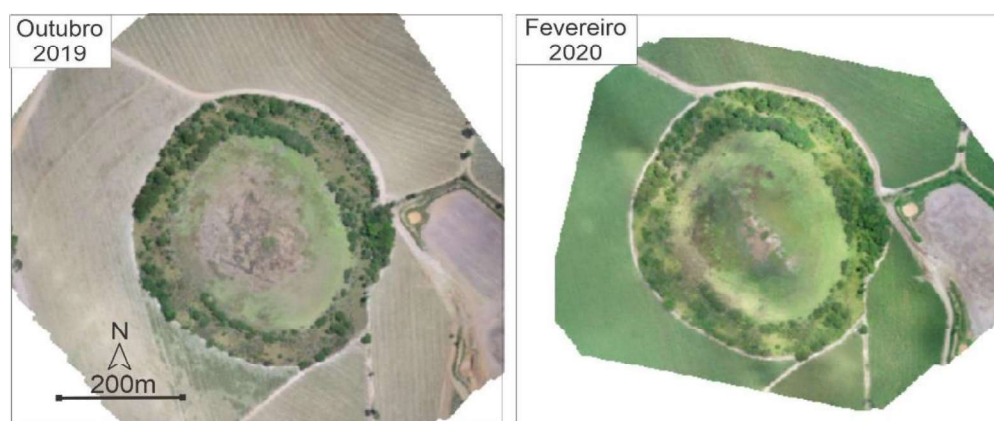
Fonte: Agisoft Metashape.

Figura 15 - Modelos Digitais de Superfície (MDS) da área B para o período de agosto de 2019 a julho de 2020.



Fonte: Agisoft Metashape.

Figura 16 - Comparação da área B para os meses de outubro de 2019 (seca) e fevereiro de 2020 (cheia).



Fonte: Agisoft Metashape.

Tabela 4 - Comparação entre a área ocupada por água na área úmida B para os meses de outubro de 2019 (seca) e fevereiro de 2020 (cheia).

Parâmetro	Mês de outubro de 2019	Mês de fevereiro de 2020	Diferença entre os meses
Área ocupada por água	0 (Seca total)	21358 m ²	21358 m ²

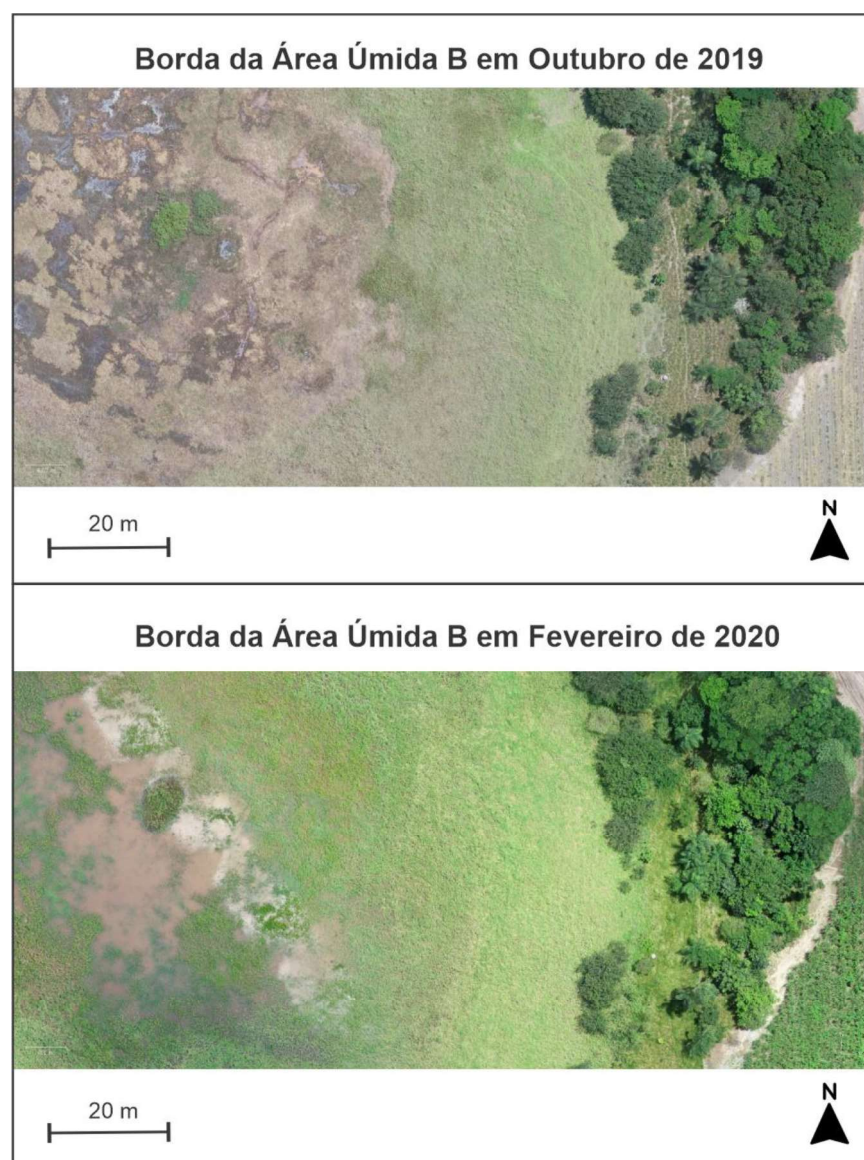
Fonte: Agisoft Metashape.

Análise preliminar da área úmida B

A área úmida B possui uma dinâmica de inundações periódicas, assim diferente da área úmida A, existem períodos em que há a seca total da água superficial. Para o período entre agosto de 2019 a outubro de 2019, os níveis hidrológicos correspondem ao que é esperado de acordo com a tendência climática A do gráfico de balanço hídrico. Para o período de novembro de 2019 a fevereiro de 2020, caracterizado pela tendência climática B, também houve um aumento do nível hidrológico correspondente. Entretanto entre dezembro de 2019 a fevereiro de 2020, a oscilação foi pequena quando comparada ao acentuado aumento de EH no período. O período que mais se diferencia dos demais em relação a correspondência com os padrões de EH é o de março a julho de 2020, pois enquanto se espera uma tendência de diminuição dos níveis hídricos de acordo com os dados de precipitação, os ortomosaicos demonstram estabilidade.

Uma hipótese possível para a diferente dinâmica da área B para área A é a de que a precipitação mais acentuada no período da tendência climática B não apenas incidiu no aumento das águas superficiais, mas em grande parte infiltrou nas porções superficiais do solo, atuando como um aquífero não-confinado, suportado por camadas de solo impermeáveis. Dessa forma, no período em que água tenderia a secar, o acúmulo de água em subsuperfície rasa e superfície estabilizou o nível de água na área úmida. Mesmo com uma dinâmica diferente da área úmida A, o mês de outubro de 2019 continuou sendo o mês de maior seca e fevereiro de 2020 o de maior inundação. A figura 17 apresenta as bordas da área úmida B para os períodos citados.

Figura 17 – Borda Leste da área úmida B para os períodos de outubro de 2019 e fevereiro de 2020

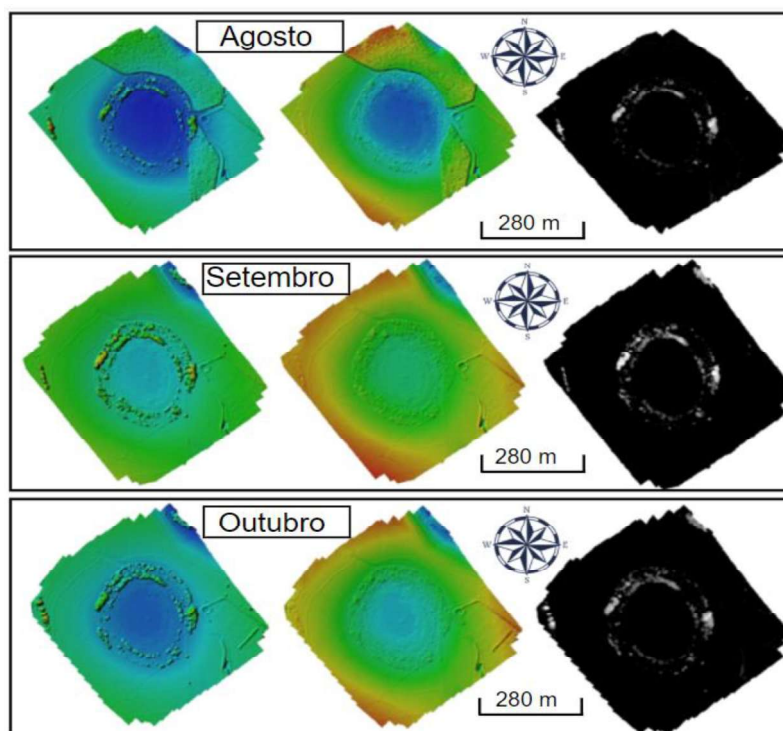


Fonte: Modificado a partir dos ortomosaicos produzidos no Agisoft Metashape.

Estimativa da altura de vegetação arbórea da área úmida B

Essa seção foi adicionada com o intuito de introduzir outro potencial de aplicação da fotogrametria do VANT, que consiste na estimativa de altura de vegetação arbórea. A presença de vegetação arbórea circundante da área úmida B é uma característica importante em relação ao seu aspecto ambiental, já que pode atuar como mata ciliar, auxiliando na proteção ecológica, controle do escoamento superficial direto e redução do transporte de possíveis contaminantes para dentro da área. Os resultados obtidos pela aplicação da metodologia de estimativa de vegetação arbórea são mostrados na figura 18.

Figura 18 - MDS, MDT e nDSM da área B, respectivamente, para os meses de agosto, setembro e outubro de 2019.



Fonte: Produzidos a partir dos produtos de processamento do Agisoft Metashape.

A análise dos resultados apresentados é baseada em demarcações visuais, sem aprofundamento a análises quantitativas. Assim, a partir da visualização dos nDSMs dos três meses estudados, podem ser constatadas variações dos valores dos pixels, representados pelo “branco” em locais específicos dos nDSMs, sendo que maior a altura da vegetação representada, maior o valor dos pixels (maior a presença do “branco” nos modelos). Desse modo, pode ser observado que entre agosto e setembro de 2020, os valores dos pixels em locais específicos (borda leste e oeste) da área B aumentam, o que indica o aumento de vegetação

arbórea verticalmente nesses locais. Já entre setembro e outubro de 2020, ocorre o oposto, havendo a diminuição dos valores dos pixels e, portanto, a altura média da vegetação em outubro de 2020 é menor do que o mês anterior. Vale salientar que a partir dos modelos gerados também é possível observar que a alteração da vegetação ocorre apenas na altura das árvores, porém sem haver alteração significativa em termos de área horizontal, de modo que a faixa de vegetação arbórea que compõe a mata ciliar da área B se mantém constante ao longo do ano, ocupando 34.134 m².

Área Úmida C

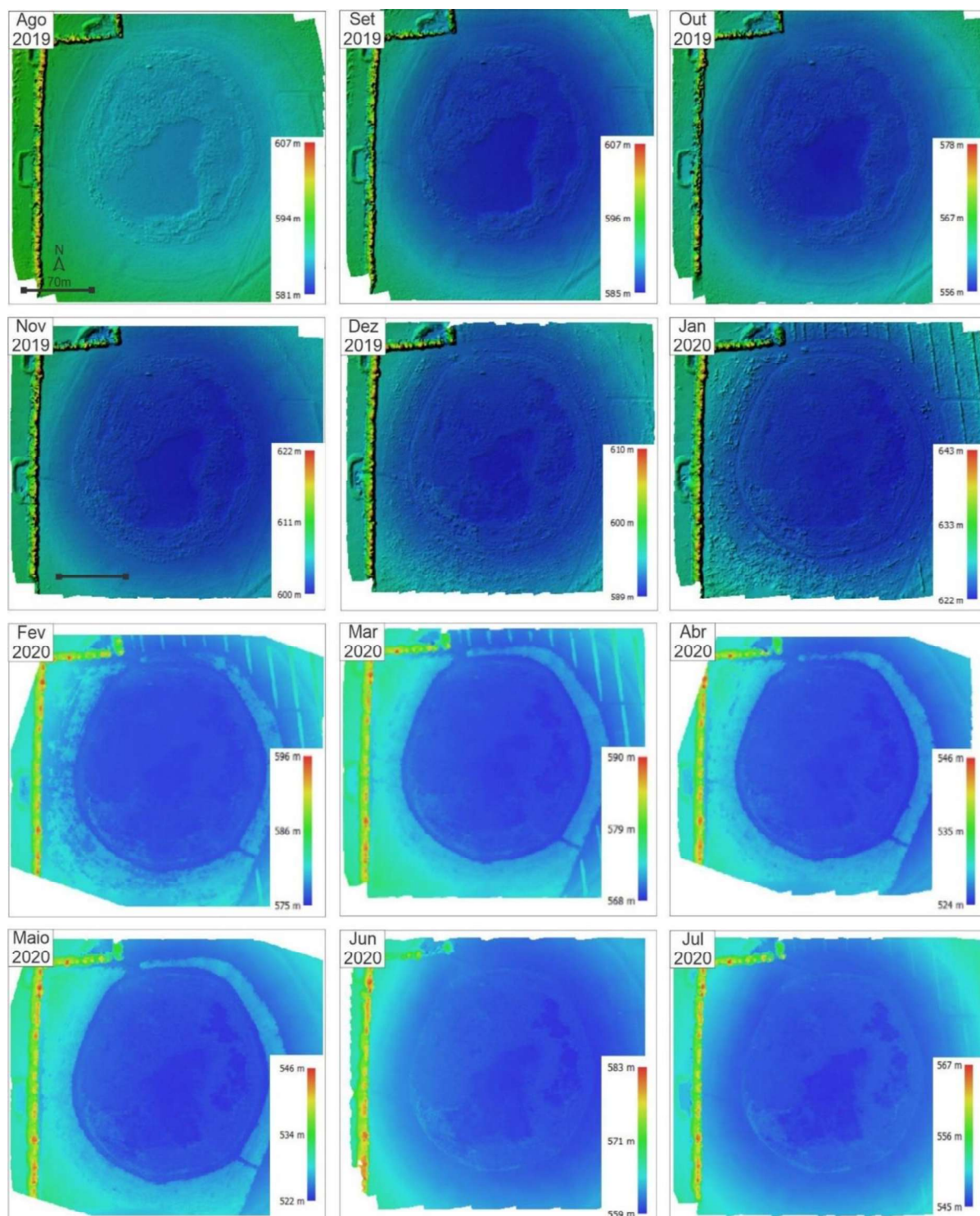
A seguir, a figura 19 retrata os doze ortomosaicos e a figura 20 os modelos digitais de elevação para a área C, produzidos mensalmente pelo software Agisoft Metashape. A figura 21 destaca os ortomosaicos dos meses de menor e maior inundação no período de agosto de 2019 a julho de 2020. Por fim, a tabela 5 mostra a área ocupada por água na área úmida C para os meses de outubro de 2019 (maior seca) e fevereiro de 2020 (maior cheia).

Figura 19 - Ortomosaicos da área C para o período de agosto de 2019 a julho de 2020.



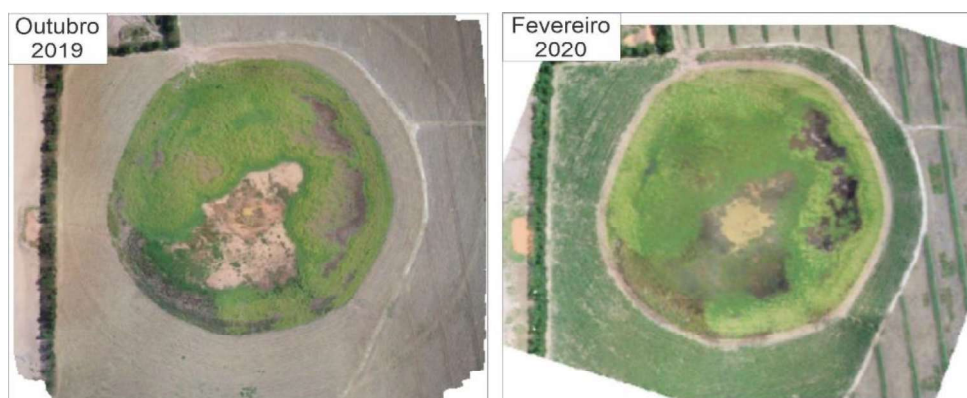
Fonte: Agisoft Metashape.

Figura 20 - Modelos Digitais de Superfície (MDS) da área B para o período de agosto de 2019 a julho de 2020.



Fonte: Agisoft Metashape.

Figura 21 - Comparação da área C para os meses de outubro de 2019 (seca) e fevereiro de 2020 (cheia).



Fonte: Agisoft Metashape.

Tabela 5 - Comparação entre a área ocupada por água na área úmida C para os meses de outubro de 2019 (seca) e fevereiro de 2020 (cheia).

Parâmetro	Mês de outubro de 2019	Mês de fevereiro de 2020	Diferença entre os meses
Área ocupada por água	1331.3 m ²	21470.9 m ²	20139.6 m ²

Fonte: Agisoft Metashape.

Análise preliminar da área úmida C

A área úmida C possui uma dinâmica de inundações periódicas e assim como as outras áreas, no período de agosto a outubro de 2019 (tendência climática A), apresenta níveis de água menores e no período entre novembro de 2019 a fevereiro de 2020 (tendência climática B) apresenta aumento dos níveis hídricos. Entretanto, uma dinâmica diferente da sugerida pelos valores do gráfico de EH ocorre no período de março a julho de 2020, considerando que os ortomosaicos de meses demonstraram constância dos níveis hídricos na área, mesmo com tendência de seca do gráfico do EH. Uma possível explicação para este fato é que ecossistemas menores possuem uma influência substancialmente maior a eventos de fluxo rápido (Evenson et al. 2015), como picos de precipitação. Novamente, assim como nas outras duas áreas, outubro de 2019 foi o mês de maior seca e fevereiro de 2020 o de maior quantidade de água. A figura 22 apresenta as bordas da área úmida C para os meses citados.

Figura 22 – Borda Leste da área úmida C para os períodos de outubro de 2019 e fevereiro de 2020



Fonte: Modificado a partir dos ortomosaicos produzidos no Agisoft Metashape.

3.3. A importância do mapeamento de alta resolução das áreas úmidas.

As áreas úmidas são ambientes em constante transformação e apresentam geralmente paisagens e composições complexas, com grandes detalhes. Dessa forma, para que as áreas úmidas sejam adequadamente mapeadas e monitoradas, são necessárias imagens de alta resolução espacial, assim como alta resolução temporal. O sensoriamento remoto baseado em imagens de satélite já tem sido amplamente utilizado para o estudo de áreas úmidas (Guo et al, 2017), entretanto, geralmente os satélites não possuem a resolução espacial para estudar áreas úmidas com a devida meticulosidade necessária (Li et al, 2010) ou quando possuem, não apresentam uma grande resolução temporal. Além disso, os satélites que possuem as melhores resoluções espaciais são administrados por empresas privadas com custo de aquisição de dados elevadíssimo, o que inviabiliza muitos trabalhos de acompanhamento sazonal de área pequenas. Outro fator importante a considerar é a cobertura de nuvens, que pode inviabilizar a obtenção de imagens de qualidade no período necessário para os estudos.

Nesse sentido, a tecnologia de VANT é uma alternativa valiosa ao sensoriamento remoto tradicional por imagens de satélite (Shabazi et al., 2014). A fotogrametria de VANT é capaz de obter imagens de alta resolução espaço-temporal, relativo baixo custo, trabalho de campo mínimo e flexibilidade de planejamento de campo (Uysal et al, 2015) e além disso, em razão dos voos ocorrerem mais próximos ao solo, a cobertura de nuvens não se torna um fator limitante. Os VANTs podem fornecer imagens de altíssima resolução (+ 10 cm/resolução de pixel), que contribuem para o estudo dos ecossistemas na região do Cerrado, que muitas vezes são subjugados pela legislação brasileira, por serem menores. Hoje é reconhecido que mesmo as áreas úmidas menores são extremamente relevantes na manutenção hidrológica local e regional (Fletcher et al. 2011; Cunha et al. 2015).

As imagens de alta resolução obtidas por VANT também permitem melhor delineação e classificação de uma área úmida, a análise da hidrodinâmica superficial, obtenção de perfis topográficos precisos e a identificação de áreas de saturação e acúmulo de água, permitindo também o monitoramento de erosões (Boon et al, 2016). Os VANTs também são capazes de gerar modelos digitais de elevação de alta resolução, que são ferramentas de análise importantes (Ouédraogo et al, 2014) e que tradicionalmente são geradas por outras tecnologias (como o LIDAR), que embora possuam grande eficiência, demandam razoável trabalho e possuem alto custo (Uysal et al, 2015).

Nas últimas décadas, a tecnologia dos VANTs vem passando por acelerada evolução e considerável parte disso ocorre em razão da popularização comercial dessa tecnologia para outros propósitos não relacionados a pesquisa, tais como engenharia civil, setor de mineração,

militar ou recreativo (Jeziorska, 2019). Esta popularização leva ao contínuo desenvolvimento de sensores, câmeras e plataformas mais avançadas, aumentando cada vez mais a qualidade da fotogrametria de VANT, a precisão dos resultados, capacidade e duração de voo, além de aumentar a disponibilidade de tecnologias com preços mais acessíveis (Jeziorska, 2019). Dessa forma, as aplicações da fotogrametria de VANT são progressivamente ampliadas e beneficiam o setor de monitoramento ambiental.

Os avanços tecnológicos permitiram o surgimento da metodologia SfM, também conhecida como Structure-from-Motion-Multi-View-Stereo (SfM-MVS) (James & Robson, 2012). Esta metodologia é capaz de construir uma área em 3D e produzir ortomosaicos e modelos digitais de elevação com grande facilidade, apenas com a posição e orientação da câmera, sem necessidade de prévia identificação manual de controle de imagem, constituindo grande vantagem em relação a métodos tradicionais de fotogrametria digital (Westoby et al, 2012). Dessa forma, dados topográficos e medições que antes seriam realizadas em campo e que demandariam grande quantidade de tempo e recursos, podem ser rapidamente obtidos, inclusive em regiões de difícil acesso ou inacessíveis (Westoby, 2012). Assim, a fotogrametria de VANT e a metodologia SfM apresentam enorme aplicabilidade no estudo de áreas úmidas.

Vale salientar que, embora possua grande aplicabilidade, existem algumas deficiências da metodologia SfM como a dificuldade de reconstruir cenas muito homogêneas, que não apresentam textura ou superfícies em movimento, já que os algoritmos utilizados pela metodologia dependem de pontos em comum entre diferentes fotos (Westoby, 2012). Outra limitação da fotogrametria aérea digital por VANT, especificamente quando utilizado o sensor óptico, é a incapacidade de penetrar a vegetação, de modo que o mapeamento de áreas úmidas com vegetações muito densas pode ser prejudicado, necessitando de outras tecnologias capazes disso, como o LIDAR (Jeziorska, 2019). Outro fator que pode ser restritivo é o tamanho da área a ser estudada, já que voos longos muitas vezes são impossibilitados pela capacidade limitada da bateria, sendo necessárias múltiplas missões de voo. Entretanto, tais fatores abordados também podem ser superados no futuro com o desenvolvimento das tecnologias de VANTs.

4. CONCLUSÕES

A fotogrametria a partir de VANT foi uma excelente ferramenta de mapeamento e monitoramento sazonal das áreas úmidas, possibilitando a obtenção de imagens de alta resolução necessárias para um estudo detalhado das áreas de estudo. A partir dos produtos de processamento das imagens obtidas por VANT, análises de variação hidrológica foram realizadas e comparadas com os dados meteorológicos obtidos, que proporcionaram melhor compreensão da dinâmica hídrica de cada área úmida.

As áreas A, B e C apresentaram comumente o mês de outubro de 2019 como o de maior seca e o mês de fevereiro de 2020 como o de maior cheia. Em outubro de 2019, os valores de área inundada para as áreas A, B e C foram respectivamente de 115396 m², 0 (seca total) e 21470 m². Em fevereiro de 2020, os valores de área inundada para as áreas A, B e C foram respectivamente de 130339 m², 21358 m² e 1131m³.

Os resultados obtidos ao longo dos 12 meses de estudo demonstraram que cada área úmida estudada possui uma dinâmica hídrica diferente que depende de outros fatores não abrangidos no presente estudo. Assim, há a necessidade de estudos pedológicos e geológicos aliados a estudos hidrológicos para o entendimento mais completo das variáveis que influenciam a dinâmica de cada área.

O banco de dados gerado por este projeto está disponível na UNESP campus de Rio Claro, no departamento de Geologia e pode ser utilizado para pesquisas futuras sobre a região de estudo, sobretudo relacionadas com análises hidrológicas, geofísicas e correlações com dados de infiltração e pedogênese. O projeto de doutorado de Lucas Moreira Furlan, intitulado "Hidrodinâmica superficial e subsuperficial de áreas úmidas sobre topos planos da Depressão Periférica Paulista" também utiliza o banco de dados gerado durante este estudo para realizar a compreensão sazonal destas áreas úmidas, sobretudo acerca do comportamento hidrológico superficial e hidrogeológico subsuperficial, sob orientação da Prof^a. Dra Vânia Silvia Rosolen e do Prof. Dr Cesar Augusto Moreira.

Esse trabalho contribui para a maior compreensão das aplicações e limitações da fotogrametria aérea digital em áreas úmidas geograficamente isoladas, sobretudo do Cerrado Brasileiro.

Referências

- ALVAREZ-COBELAS, Miguel et al. Long-term changes in spatial patterns of emergent vegetation in a Mediterranean floodplain: natural versus anthropogenic constraints. **Plant Ecology**, v. 194, n. 2, p. 257-271, 2008.
- BOON, Paul I.; MITCHELL, Alison; LEE, Kerrie. Effects of wetting and drying on methane emissions from ephemeral floodplain wetlands in south-eastern Australia. **Hydrobiologia**, v. 357, n. 1, p. 73-87, 1997.
- BOON, Marinus Axel; GREENFIELD, R.; TESFAMICHAEL, S. Wetland assessment using unmanned aerial vehicle (UAV) photogrammetry. 2016.
- BOURGEAU-CHAVEZ, Laura L. et al. Improving wetland characterization with multi-sensor, multi-temporal SAR and optical/infrared data fusion. In: **Advances in geoscience and remote sensing**. IntechOpen, 2009.
- DA CUNHA, Catia Nunes; PIEDADE, Maria Teresa Fernandez; JUNK, Wolfgang J. (Ed.). Classificação e delineamento das áreas úmidas brasileiras e de seus macrohabitats. **EdUFMT**, 2014.
- DANDOIS, Jonathan P.; OLANO, Marc; ELLIS, Erle C. Optimal altitude, overlap, and weather conditions for computer vision UAV estimates of forest structure. **Remote Sensing**, v. 7, n. 10, p. 13895-13920, 2015.
- DAVIDSON, Nick C. How much wetland has the world lost? Long-term and recent trends in global wetland area. **Marine and Freshwater Research**, v. 65, n. 10, p. 934-941, 2014.
- EVENSON, Grey R., et al. Geographically isolated wetlands and watershed hydrology: A modified model analysis. *Journal of Hydrology*, 2015, 529: 240-256. EVENSON, Grey R., et al. Geographically isolated wetlands and watershed hydrology: A modified model analysis. **Journal of Hydrology**, 2015, 529: 240-256.
- EWING, J. M. et al. Changes in wetland soil morphological and chemical properties after 15, 20, and 30 years of agricultural production. **Geoderma**, v. 179, p. 73-80, 2012.
- FLETCHER, Stephen; KAWABE, Midori; REWHORN, Sonja. Wetland conservation and sustainable coastal governance in Japan and England. **Marine pollution bulletin**, v. 62, n. 5, p. 956-962, 2011.
- FONSTAD, Mark A. et al. Topographic structure from motion: a new development in photogrammetric measurement. **Earth surface processes and Landforms**, v. 38, n. 4, p. 421-430, 2013.
- FURLAN, Lucas Moreira et al. The interactive pedological-hydrological processes and environmental sensitivity of a tropical isolated wetland in the Brazilian Cerrado. *SN Applied Sciences*, v. 3, n. 2, p. 1-15, 2021.
- GUO, Meng et al. A review of wetland remote sensing. *Sensors*, v. 17, n. 4, p. 777, 2017.
- JAMES, Mike R.; ROBSON, Stuart. Straightforward reconstruction of 3D surfaces and topography with a camera: Accuracy and geoscience application. **Journal of Geophysical Research: Earth Surface**, v. 117, n. F3, 2012.
- JEZIORSKA, Justyna. UAS for wetland mapping and hydrological modeling. **Remote Sensing**, v. 11, n. 17, p. 1997, 2019.
- JUNK, Wolfgang J. et al. Brazilian wetlands: their definition, delineation, and classification for research, sustainable management, and protection. **Aquatic Conservation: marine and freshwater ecosystems**, v. 24, n. 1, p. 5-22, 2014.
- JUNK, Wolfgang Johannes; PIEDADE, Maria Tereza Fernandez. Áreas Úmidas (AUs) brasileiras: avanços e conquistas recentes. **Boletim da Associação Brasileira de Limnologia**, v. 41, n. 2, p. 20-24, 2015.
- KOCH, Magaly et al. Evaluating full polarimetric C-and L-band data for mapping wetland conditions in a semi-arid environment in Central Spain. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 5, n. 3, p. 1033-1044, 2012.

LI, Na et al. Application of unmanned airship image system and processing techniques for identifying of fresh water wetlands at a community scale. In: **2010 18th International Conference on Geoinformatics**. IEEE, 2010. p. 1-5.

MAHDAVI, Sahel et al. Remote sensing for wetland classification: A comprehensive review. **GIScience & Remote Sensing**, v. 55, n. 5, p. 623-658, 2018.

MELTON, Joe R. et al. Present state of global wetland extent and wetland methane modelling: conclusions from a model inter-comparison project (WETCHIMP). **Biogeosciences**, v. 10, n. 2, p. 753-788, 2013.

MITSCH, William J.; GOSSELINK, James G. The value of wetlands: importance of scale and landscape setting. **Ecological economics**, v. 35, n. 1, p. 25-33, 2000.

OUÉDRAOGO, Mohamar Moussa et al. The evaluation of unmanned aerial system-based photogrammetry and terrestrial laser scanning to generate DEMs of agricultural watersheds. **Geomorphology**, v. 214, p. 339-355, 2014.

ROSOLEN, Vania et al. Contamination of wetland soils and floodplain sediments from agricultural activities in the Cerrado Biome (State of Minas Gerais, Brazil). **Catena**, v. 128, p. 203-210, 2015.

SHAHBAZI, Mozhdeh; THÉAU, Jérôme; MÉNARD, Patrick. Recent applications of unmanned aerial imagery in natural resource management. **GIScience & Remote Sensing**, v. 51, n. 4, p. 339-365, 2014.

TINER, Ralph W. Wetland indicators: A guide to wetland formation, identification, delineation, classification, and mapping. **CRC press**, 2016. p. 1.

UYSAL, Murat; TOPRAK, Ahmet S.; POLAT, Nizar. DEM generation with UAV Photogrammetry and accuracy analysis in Sahitler hill. **Measurement**, v. 73, p. 539-543, 2015.

WESTOBY, Matthew J. et al. 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. **Geomorphology**, v. 179, p. 300-314, 2012.

ZWEIG, Christa L. et al. Use of unmanned aircraft systems to delineate fine-scale wetland vegetation communities. **Wetlands**, v. 35, n. 2, p. 303-309, 2015.