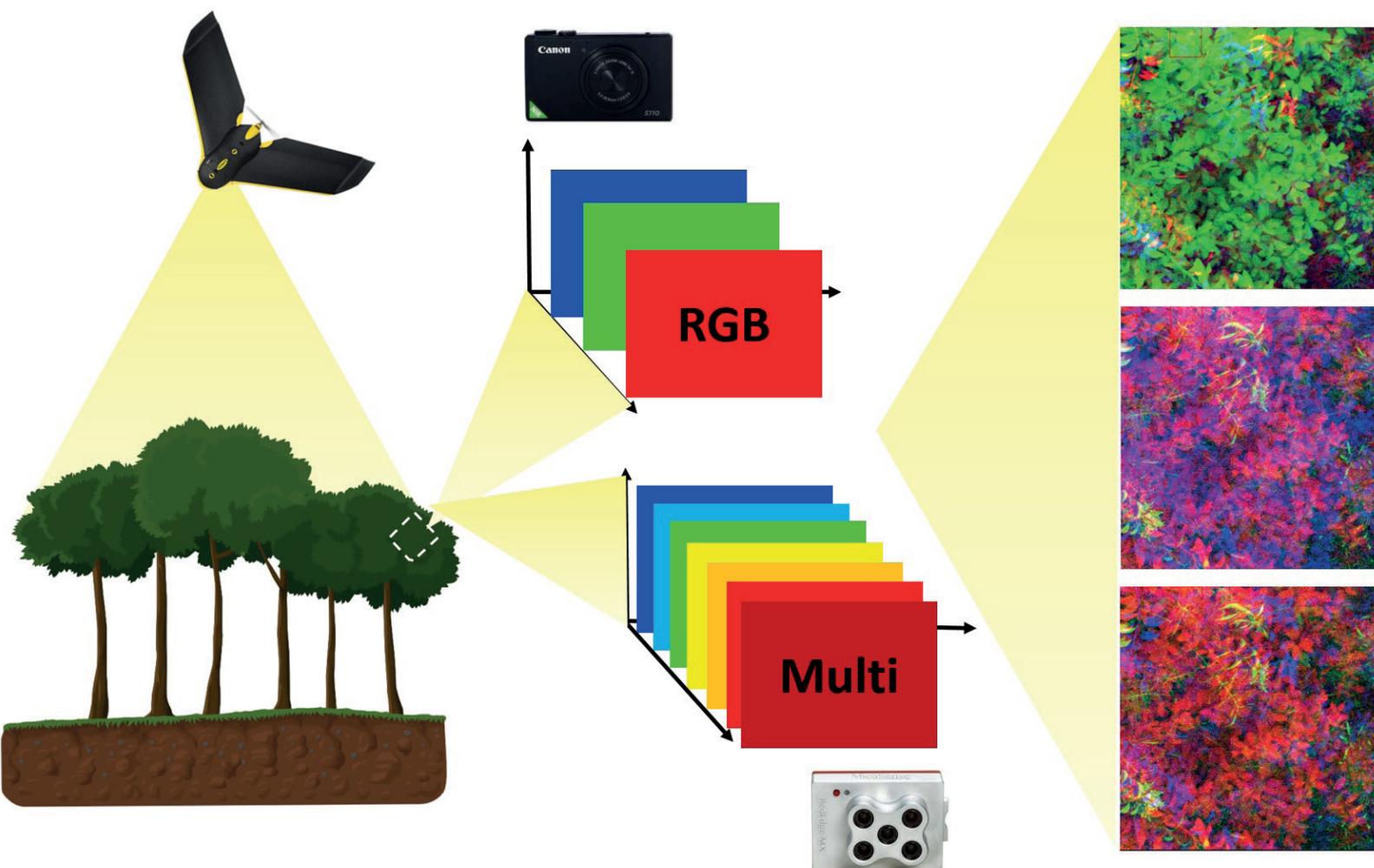


Câmeras modificadas e multiespectrais embarcadas em drones: enfoque para estudos da vegetação



**Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Florestas
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**

DOCUMENTOS 371

Câmeras modificadas e multiespectrais embarcadas em drones: enfoque para estudos da vegetação

*Wilson Anderson Holler
Bruna Nascimento de Vasconcellos
Bruno Holtz Gemignani
Ana Paula Dalla Corte
Adriane Avelhaneda Mallmann*

Embrapa Florestas
Estrada da Ribeira, km 111, Guaraituba,
Caixa Postal 319
83411-000, Colombo, PR, Brasil
Fone: (41) 3675-5600
www.embrapa.br/florestas
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Comitê Local de Publicações da
Embrapa Florestas

Presidente
Patrícia Póvoa de Mattos

Vice-Presidente
José Elidney Pinto Júnior

Secretária-Executiva
Neide Makiko Furukawa

Membros
Annete Bonnet
Cristiane Aparecida Fioravante Reis
Elenice Fritzsos
Krisle da Silva
Marcelo Francia Arco Verde
Marilice Cordeiro Garrastazu
Susete do Rocio Chiarello Penteadó
Valderês Aparecida de Sousa

Supervisão editorial e revisão de texto
José Elidney Pinto Júnior

Normalização bibliográfica
Francisca Rasche

Projeto gráfico da coleção
Carlos Eduardo Felice Barbeiro

Editoração eletrônica
Neide Makiko Furukawa

Foto capa
Ana Paula Dalla Corte

1ª edição
Publicação digital (2022): PDF

Todos os direitos reservados

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte,
constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Embrapa Florestas

Câmeras modificadas e multiespectrais embarcadas em drones: enfoque para estudos da vegetação. [recurso eletrônico] / Wilson Anderson Holler ... [et al.]. - Colombo : Embrapa Florestas, 2022.
PDF (29 p.) - (Documentos / Embrapa Florestas, ISSN 1980-3958 ; 371)

Modo de acesso: World Wide Web:
<<http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/item/221>>

1. Imagem multiespectral. 2. Espectro eletromagnético. 3. Câmeras. 4. Sensores. 5. Cartografia. 6. Sistemas de informação geográfica. I. Holler, Wilson Anderson. II. Vasconcellos, Bruna Nascimento. III. Gemignani, Bruno Holtz. IV. Corte, Ana Paula Dalla. V. Mallmann, Adriane Avelhaneda. VI. Série.

CDD (21. ed.) 621.3678

Autores

Wilson Anderson Holler

Engenheiro cartógrafo, mestre em Desenvolvimento de Tecnologia, analista da Embrapa Florestas, Colombo, PR

Bruna Nascimento de Vasconcellos

Engenheira florestal, doutora em Engenharia Florestal, professora no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Mato Grosso, Campus Cáceres, Cáceres, MT

Bruno Holtz Gemignani

Engenheiro de controle e automação, Chief Executive Officer da 3DGEO, Curitiba, PR

Ana Paula Dalla Corte

Engenheira florestal, doutora em Engenharia Florestal, professora da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR

Adriane Avelhaneda Mallmann

Engenheira florestal, mestre em Engenharia Florestal, bolsista do CNPq, Colombo, PR

Apresentação

Nos últimos dez anos, os drones vêm sendo cada vez mais utilizados para aplicações florestais devido à sua flexibilidade, autonomia e capacidade de obter dados, de maneira remota, por meio de sensores embarcados. Essa ferramenta pode ser usada em substituição de algumas atividades de coleta de dados normalmente trabalhosas, demoradas, sujeitas a erro e de alto custo. Podem contribuindo, dessa maneira, para gerar informações decisivas para a gestão e a tomada de decisão na atividade florestal, com elevada precisão e custos reduzidos. Câmeras multiespectrais embarcadas em drones ampliam a capacidade de análise nos estudos de florestas plantadas e nativas, auxiliando na análise do desenvolvimento e da vitalidade dos plantios ou florestas e identificando fatores prejudiciais relacionados com estresses bióticos e abióticos. Entretanto, apesar dos avanços tecnológicos atingidos até o momento, a captura de dados de qualidade ainda permanece um grande desafio. Nesta publicação são apresentadas diretrizes orientadoras para o desenvolvimento de trabalhos sobre vegetação que envolvem a coleta de imagens por meio de câmeras multiespectrais, e modificadas, embarcadas em drones.

Marcílio José Thomazini

Chefe-Adjunto de Pesquisa e Desenvolvimento da Embrapa Florestas

Sumário

Autores	3
Apresentação	5
Sumário	7
Introdução.....	9
Tipos de sensores	9
Espectro eletromagnético.....	10
Sistemas de captura.....	14
Sensores multiespectrais	15
Câmeras modificadas.....	16
Limitações em câmeras modificadas	18
Câmeras multiespectrais	20
Limitações em câmeras multiespectrais.....	25
Sensor de irradiância (DLS) e painel de reflectância calibrado (CRP).....	26
Pontos de apoio com drones (foto-identificáveis em campo).....	27
Considerações finais	28
Referências	28

Introdução

Os veículos aéreos não tripulados (VANT, do original UAV, *unmanned aerial vehicle*), popularmente conhecidos como drones, são plataformas que têm sido cada vez mais utilizadas para aplicações florestais, tendo em vista algumas vantagens como: flexibilidade, baixo custo, confiabilidade, autonomia e capacidade de fornecimento de dados de alta resolução proporcionada por sensores embarcados. As aplicações florestais mais frequentes utilizam imagens obtidas por sensores passivos, tais como: RGB, multiespectrais e hiperespectrais. Os sensores ativos do tipo *light detection and ranging* (LiDAR) tem sido cada vez mais empregados para a geração de estimativas estruturais das árvores e dos ambientes florestais.

A tecnologia embarcada nos drones e os sensores estão evoluindo rapidamente, sendo possível obter benefícios para o monitoramento de culturas. O planejamento de voo para a coleta das imagens é fundamental para que as imagens coletadas com uso de drones possam ser aplicadas com precisão em análises visuais, mapeamentos e monitoramentos. Uma variedade de sensores pode ser embarcada a um drone para a coleta de dados. Além das imagens obtidas dos sensores RGB, câmeras amplamente utilizadas nos drones, a adoção de sensores multiespectrais, oriundos de alguma modificação ou desenvolvidos para capturar faixas específicas do espectro eletromagnético, como infravermelho próximo (*near infra red* - NIR) ou borda do vermelho (*red-edge*) podem auxiliar na detecção de anomalias e na otimização de recursos em culturas de ciclo longo ou curto.

Devido à ampla gama de sensores disponíveis, é fundamental definir o sensor que será embarcado no drone e escolher o mais apropriado para cada tipo de projeto/aplicação. O uso de sensores embarcados em drones para a geração de estimativas florestais possibilita uma abordagem de baixo custo e não destrutiva, ou seja, sem a necessidade da derrubada da(s) árvore(s). No entanto, a escolha do sensor sem uma investigação adequada pode ocasionar a perda de todo um projeto ou mesmo inviabilizar novas aplicações da tecnologia. Nesse sentido, para obtenção de informações confiáveis e precisas sobre a vegetação, essa etapa não deve ser negligenciada. Além disso, entender as diferenças entre imagens obtidas por câmeras RGB, modificadas e multiespectrais torna as análises mais precisas.

Esta publicação apresenta as principais características dos sensores multiespectrais e câmeras modificadas utilizadas no mercado. O texto também aborda, de forma breve, conceitos sobre o espectro eletromagnético. São apresentadas as principais diferenças entre os sistemas de captura *rolling shutter* e *global shutter*. Para finalizar, são apresentados alguns modelos de câmeras modificadas e multiespectrais, suas limitações e recomendações para ampliar a qualidade das imagens obtidas. Pretende-se que este texto auxilie na escolha e definição de um sensor para imageamento nas bandas RGB, NIR e *red-edge* e permita contribuir com os trabalhos que vêm sendo desenvolvidos no mapeamento e monitoramento da vegetação utilizando drones.

Tipos de sensores

Segundo Jensen (2011), o sensoriamento remoto é a arte e a ciência de se obter informações sobre um objeto sem o contato físico com o objeto. Os sensores podem ser classificados em dois tipos: ativos e passivos. Os sensores ativos são aqueles que produzem energia própria, como exemplo: radares e laser. Os sensores passivos detectam a radiação refletida ou emitida pelos objetos, de-

pendendo de uma fonte de energia externa, tal como o sol. A Figura 1 ilustra a diferença entre um sensor ativo e o passivo.

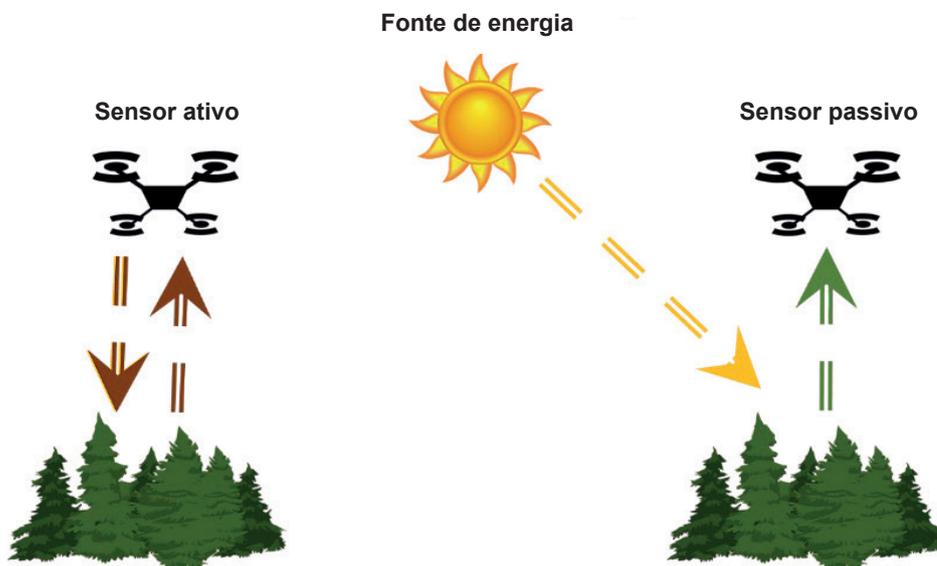


Figura 1. Sensor ativo e passivo.

No sensoriamento remoto é registrada a radiação eletromagnética (REM) refletida ou emitida dos alvos sobre a superfície terrestre, que é uma combinação de um campo elétrico com um campo magnético que se propagam no espaço. Neste documento são abordados os sensores multiespectrais e as câmeras modificadas, portanto, sensores passivos.

Espectro eletromagnético

Denomina-se espectro eletromagnético as regiões espectrais da radiação eletromagnética (REM) conhecidas pelo homem (Jensen, 2011). Um dos intervalos ou faixas de comprimentos de onda mais familiares é a faixa de luz visível da radiação solar, por ser aquela que o olho humano é capaz de detectar. Sabendo que a radiação eletromagnética de cada comprimento de onda interage de forma distinta e com intensidade diferente com os objetos terrestres, um dos parâmetros mais importantes para definir as características de um sensor é o conjunto de comprimentos de onda das imagens que o sensor irá adquirir.

As imagens não são definidas em um comprimento de onda específico, mas abrangendo pequenos intervalos chamados de bandas, canais ou faixas espectrais. Ao detectar comprimentos de onda fora do espectro visível, o sensoriamento remoto permite visualizar padrões que não se poderia ver a olho nu. Na Figura 2 são apresentados segmentos do espectro eletromagnético, onde os valores no eixo horizontal do gráfico variam de comprimentos de onda muito longos (ondas de TV e rádio) a comprimentos de onda muito curtos (raios gama).

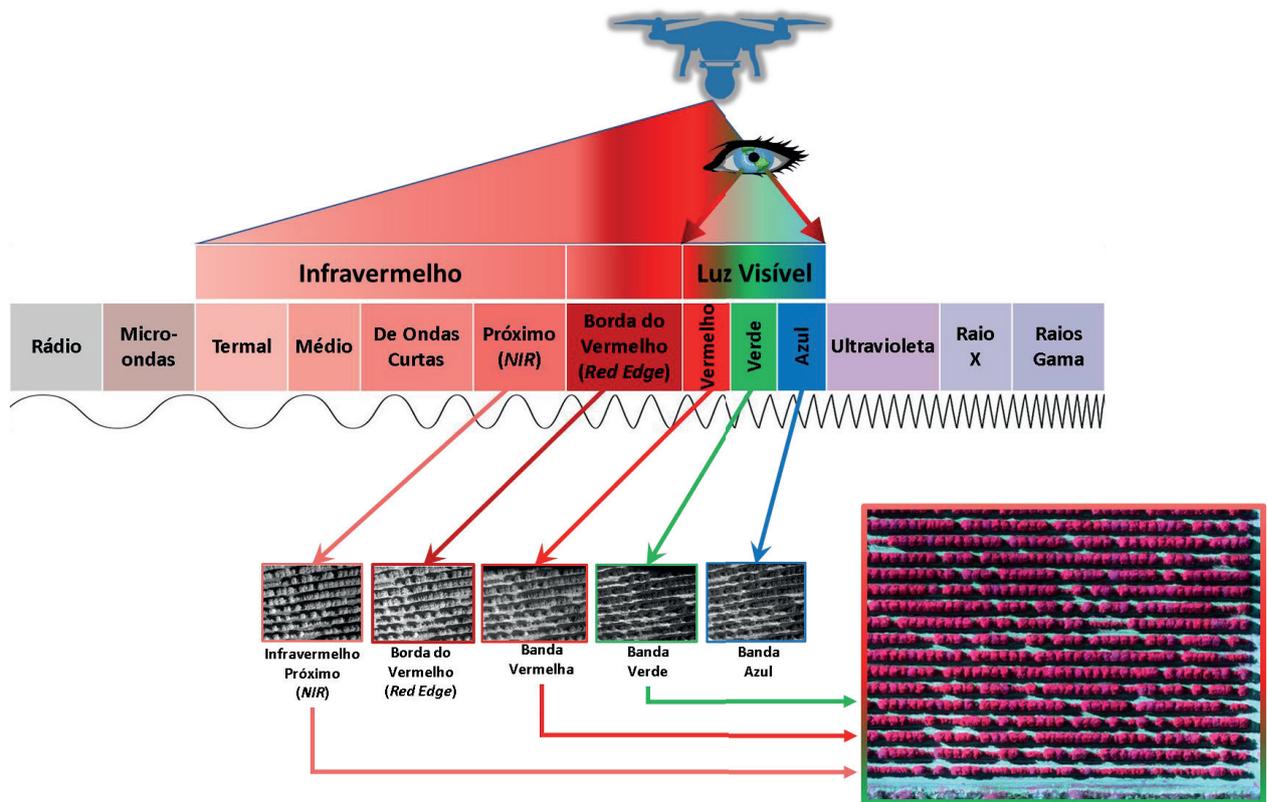


Figura 2. Espectro eletromagnético. Composição falsa cor Red Edge, G e B.

Diferentes formações vegetais apresentam comportamento distinto em termos de resposta espectral. Ademais, características de seu estado nutricional e fitossanitário também podem ser identificadas por suas respostas espectrais, uma vez que os pigmentos foliares, a estrutura celular e o teor de água afetam diretamente a reflectância espectral da vegetação. Por exemplo, as árvores conhecidas como folhosas (angiospermas) têm uma maior reflectância no infravermelho próximo em comparação com as coníferas (gimnospermas).

Na Figura 3, nas bandas visíveis, a reflectância é relativamente baixa, pois a maior parte da luz é absorvida pelos pigmentos das folhas. A clorofila absorve fortemente a energia nos comprimentos de onda azul e vermelho e reflete mais comprimentos de onda verdes. É por isso que a vegetação saudável aparece verde. A reflectância nos comprimentos de onda infravermelhos de ondas curtas está relacionada ao conteúdo de água da vegetação e sua estrutura. A água possui fortes bandas de absorção, em torno de $1,45 \mu\text{m}$, $1,95 \mu\text{m}$ e $2,50 \mu\text{m}$ (Figura 3). A reflectância das folhas, geralmente, aumenta na região do infravermelho de ondas curtas quando o conteúdo de água na folha diminui.

Ponzoni (2002) definiu os principais aspectos relacionados ao comportamento espectral em cada uma das regiões da folha (Figura 3) conforme descrito a seguir:

- **Visível (400 nm a 700 nm):** nesta região os pigmentos existentes nas folhas dominam a reflectância. São eles, portanto, que definem a curva dos fatores de reflectância nessa região espectral. Estes pigmentos, geralmente encontrados nos cloroplastos, são: clorofila (65%), carotenos (6%) e xantofilas (29%). Os valores percentuais desses pigmentos existentes nas folhas podem variar intensamente de espécie para espécie. A energia radiante interage com a estrutura foliar por absorção e espalhamento. A energia é absorvida seletivamente pela clorofila e é convertida em calor ou fluorescência, sendo também convertida fotoquimicamente em energia armazenada na forma de componentes orgânicos, por meio da fotossíntese.

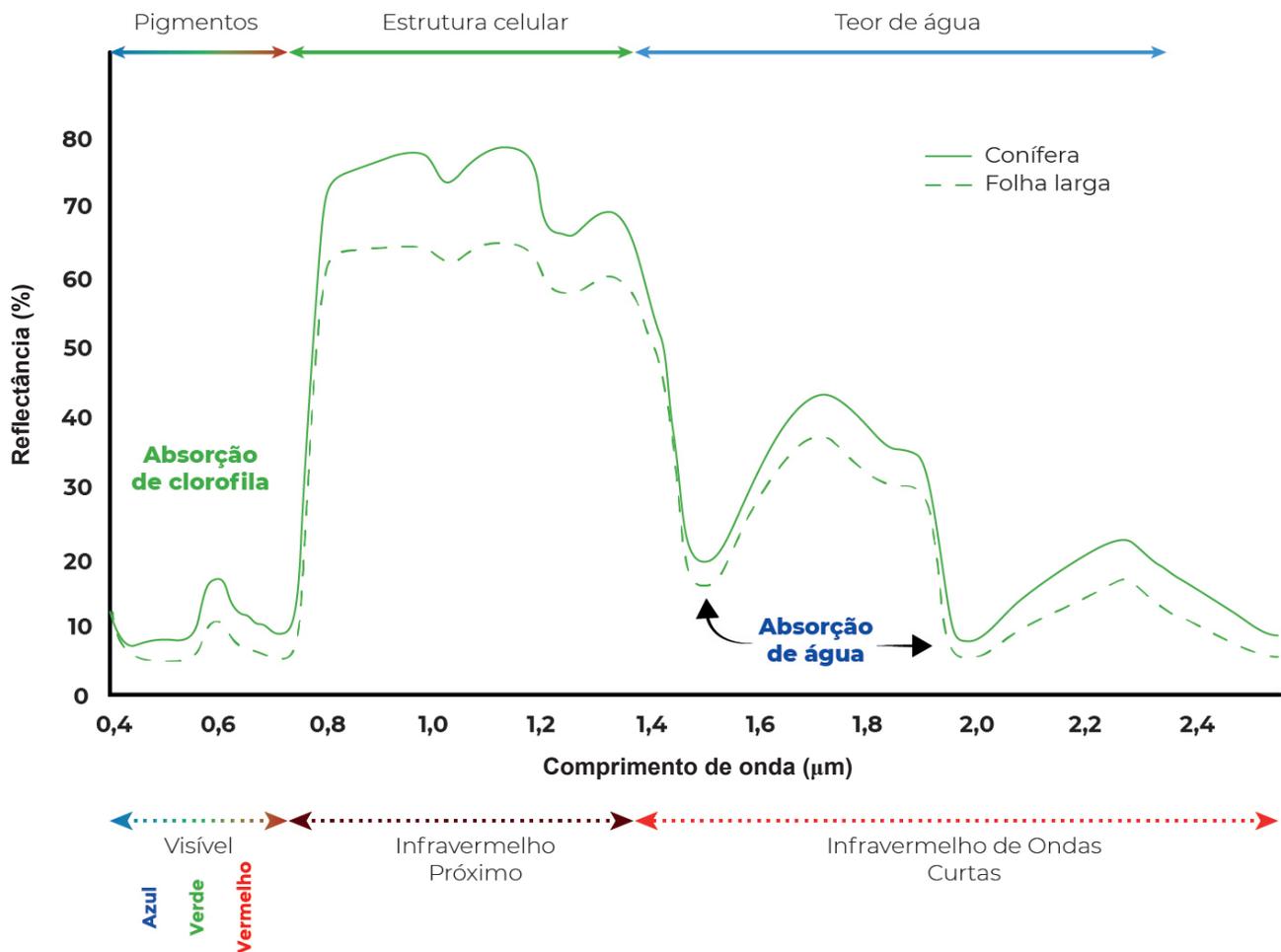


Figura 3. Assinaturas de reflectância espectral de espécies de folhas de coníferas e decíduas.

- **Infravermelho próximo (700 nm a 1.300 nm):** Nesta região existe uma absorção pequena da REM e considerável espalhamento interno na folha. A absorção da água é geralmente baixa nessa região, enquanto a reflectância espectral é quase constante. A reflectância espectral de folhas nessa região do espectro eletromagnético é o resultado da interação da energia incidente com a estrutura do mesófilo (Gates et al., 1965) (Figura 4). Fatores externos à folha, como disponibilidade de água, por exemplo, podem causar alterações na relação água-ar no mesófilo, podendo alterar a reflectância de uma folha nesta região. De maneira geral, quanto maior for a espessura do parênquima lacunoso no interior da folha, maior será o espalhamento interno da radiação incidente e, conseqüentemente, maior será também a reflectância.
- **Infravermelho médio (1.300 nm a 2.600 nm):** A absorção devido à água líquida predomina na reflectância espectral das folhas. Na região em torno de 2.000 nm, a água líquida apresenta uma reflectância geralmente pequena, sendo menor do que 10% para um ângulo de incidência de 65° e menor do que 5% para um ângulo de incidência de 20°; a água absorve consideravelmente a REM incidente na região espectral compreendida entre 1.300 nm a 2.000 nm.

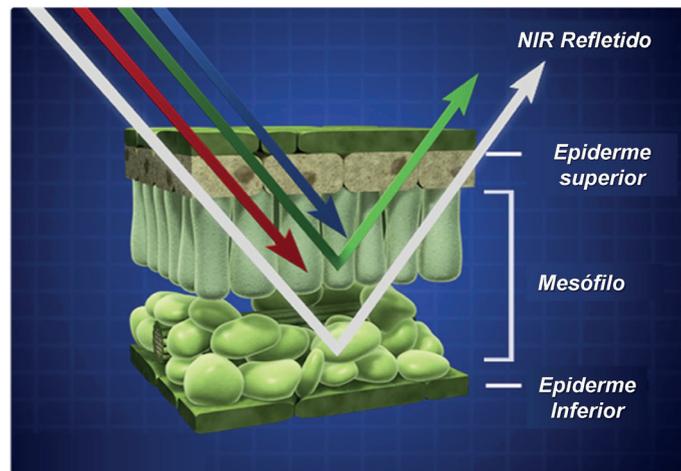


Figura 4. Folha saudável.

Fonte: Nasa (2010).

A vegetação saudável absorve a energia da luz azul e vermelha para executar a fotossíntese e criar clorofila. Uma planta com mais clorofila refletirá mais energia no infravermelho próximo do que uma planta não saudável. Analisar o comportamento espectral de plantas em relação à absorvância (quantidade absorvida) e reflectância (quantidade refletida) nos comprimentos de onda visíveis e no infravermelho pode fornecer informações sobre a sanidade e a produtividade das plantas. Para uma vegetação saudável, a reflectância é muito maior na região do infravermelho próximo (NIR) do que na região visível, devido à estrutura celular das folhas, especificamente o parênquima lacunoso (Figura 4). Portanto, a vegetação saudável pode ser facilmente identificada pela alta reflectância do NIR e geralmente baixa reflectância no espectro visível.

A Figura 5 apresenta as bandas, ou faixas, do espectro eletromagnético presentes na câmera multiespectral Altum da fabricante Micasense. Essa câmera possui três bandas no visível, uma na faixa da borda do vermelho, uma no infravermelho próximo (NIR) e uma no infravermelho termal.

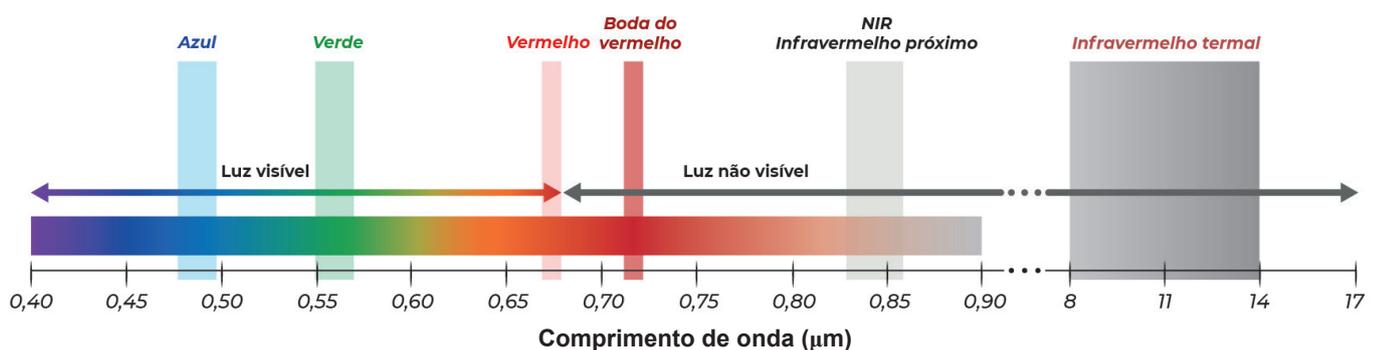


Figura 5. Exemplo de Bandas de câmera multiespectral.

Além das câmeras RGB e multiespectrais, as câmeras térmicas também podem ser embarcadas em drones para o monitoramento da vegetação. Tais câmeras detectam radiação na região do infravermelho de comprimento de onda maior (8.000 nm a 14.000 nm). Quanto maior a temperatura de um objeto, maior a radiação térmica emitida.

Quando as plantas estão sob estresse hídrico, a evapotranspiração é reduzida, o que resulta em um leve aumento na temperatura do dossel (Thompson et al., 2017). Por esse motivo, as câmeras térmicas podem ser utilizadas para detectar o estresse da planta - principalmente o estresse hídrico.

As condições ambientais, como velocidade do vento, radiação solar e temperatura do ar durante o voo do drone, podem interferir nas leituras térmicas e precisam ser consideradas.

Sistemas de captura

Para entender prováveis erros no resultado do processamento de imagens obtidas por drones, é necessário compreender algumas possíveis fontes de erros inerentes aos sistemas de captura das imagens. Câmeras de pequeno formato, amplamente utilizadas em drones, empregam um obturador global (*global shutter*) ou um obturador de rolamento (*rolling shutter*).

O *global shutter* expõe toda a matriz do sensor à luz por um período de tempo, determinado pela velocidade do obturador. No *rolling shutter*, cada fileira de pixels no sensor é exposta por vez. O tempo total entre a primeira e a última fileira de um sensor a ser exposto vai depender do modelo da câmera, onde, em alguns modelos, pode ser de aproximadamente 1/30 de segundo. Esse tempo pode ter impacto sobre a precisão fotogramétrica, já que o drone pode percorrer uma certa distância durante esse período: viajando a uma velocidade de 50 km/h ele pode se deslocar até 0,5 m. Isso significa que não há uma única posição para a exposição do sensor e acaba introduzindo distorções na imagem que reduzem a confiabilidade da correspondência entre várias imagens. Algumas plataformas permitem que esse erro seja modelado e minimizado. A Figura 6 ilustra as diferenças no resultado obtido pelos sistemas *global shutter* (A) e *rolling shutter* (B).

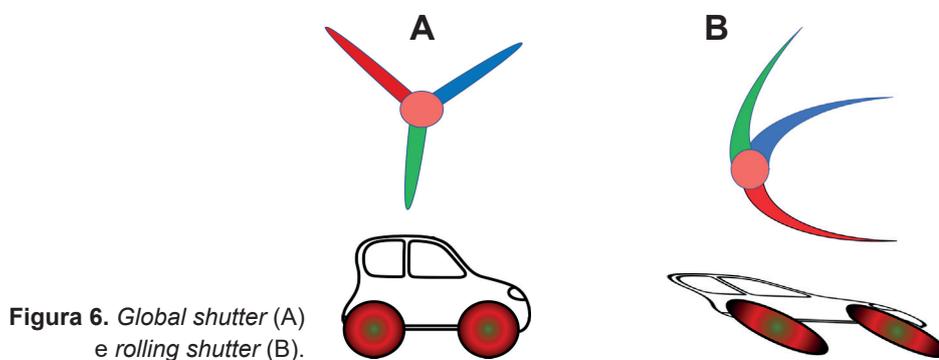


Figura 6. *Global shutter* (A) e *rolling shutter* (B).

A utilização de pontos de apoio em campo irá contribuir na modelagem para a correção das distorções causadas pelo sistema de captura *rolling shutter*. Uma forma de reduzir esse erro é diminuir a velocidade de voo. A vibração dos drones também pode influenciar na qualidade da imagem. Sistemas inerciais mais precisos contribuem para diminuir essa distorção.

Vautherin et al. (2016) realizaram um estudo sobre a influência das distorções causadas pelo efeito *rolling shutter*, comparando os sensores embarcados nos modelos Phantom 2 e Inspire 1, ambos da fabricante DJI e o Ebee da fabricante Sensefly. O Phantom 2 e o Inspire 1 possuíam sensores *rolling shutter*, enquanto o Ebee sensor *global shutter*.

Um dos resultados de Vautherin et al. (2016) está apresentado na Figura 7; nela está a representação gráfica dos erros nos componentes X e Y, onde o círculo mostra o GSD (*ground sample distance* ou resolução espacial) médio de 2,85 cm. Os pontos de apoio, utilizados para o processo de georreferenciamento, são representados por cruzes vermelhas. Os erros encontrados para os pontos de verificação estão ilustrados, tanto para a reconstrução sem (A) quanto com (B) a modelagem do efeito *rolling shutter*. As setas estão centralizadas nos pontos de verificação e seus comprimentos e direções mostram o erro em X e Y. O círculo centralizado em cada ponto de verificação mostra o GSD na mesma escala que as setas. Na imagem (A), o retângulo mostra os contornos da trajetória de voo. Os pontos de verificação localizados no centro da grade são mais precisos que os próximos à borda, o que pode ser explicado pelo fato de haver um ponto de apoio próximo a eles e por sua posição central os tornar visíveis em mais imagens.

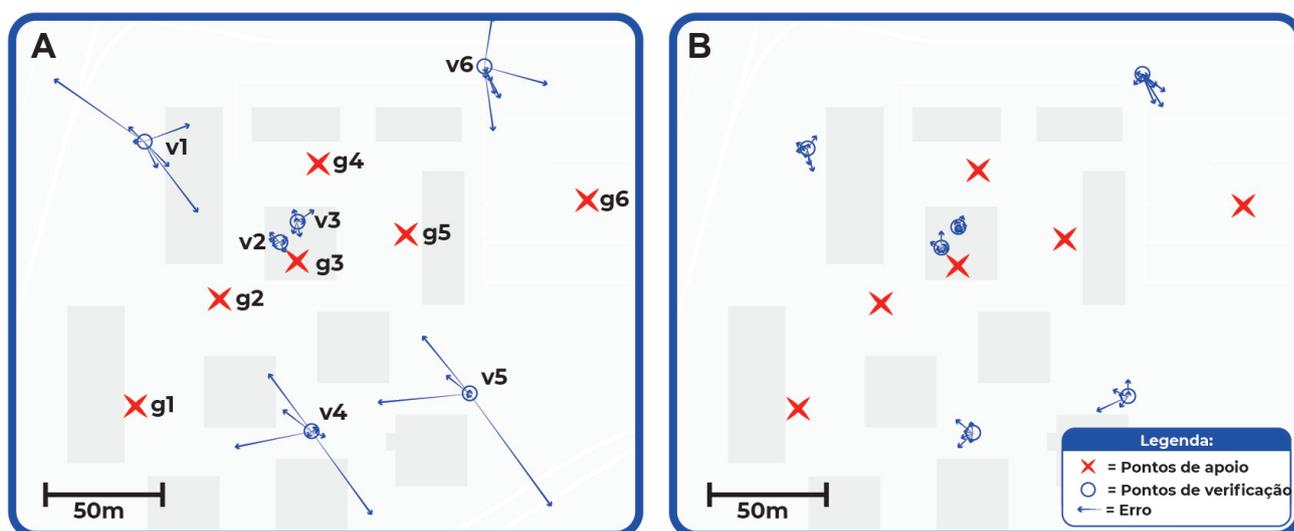


Figura 7. Erros provenientes de um sensor *rolling shutter* (A) e modelados pela plataforma de processamento (B).

Sensores multiespectrais

Normalmente, os sensores encontrados em câmeras fotográficas de pequeno porte estão equipados com três canais para detecção de cores. Os canais geralmente são alinhados para otimizar a fotografia da faixa espectral visível, sendo: vermelho, verde e azul (R: *red*, G: *green* e B: *blue*).

As câmeras RGB têm uma faixa dinâmica limitada e adquirem imagens usando configuração de controle de exposição automatizado (Nijland et al., 2014). Os mesmos sensores são capazes de detectar luz na faixa NIR, mas essa faixa é bloqueada usando um filtro óptico. Caso contrário, a influência da região do NIR afetaria a qualidade das fotos, fazendo com que parecessem “desbotadas”.

A curva de resposta de um sensor com os três canais RGB e o intervalo NIR que é tipicamente bloqueado estão apresentados na Figura 8. Todos os três canais (RGB) têm sensibilidade na região NIR, acima de 700 nm.

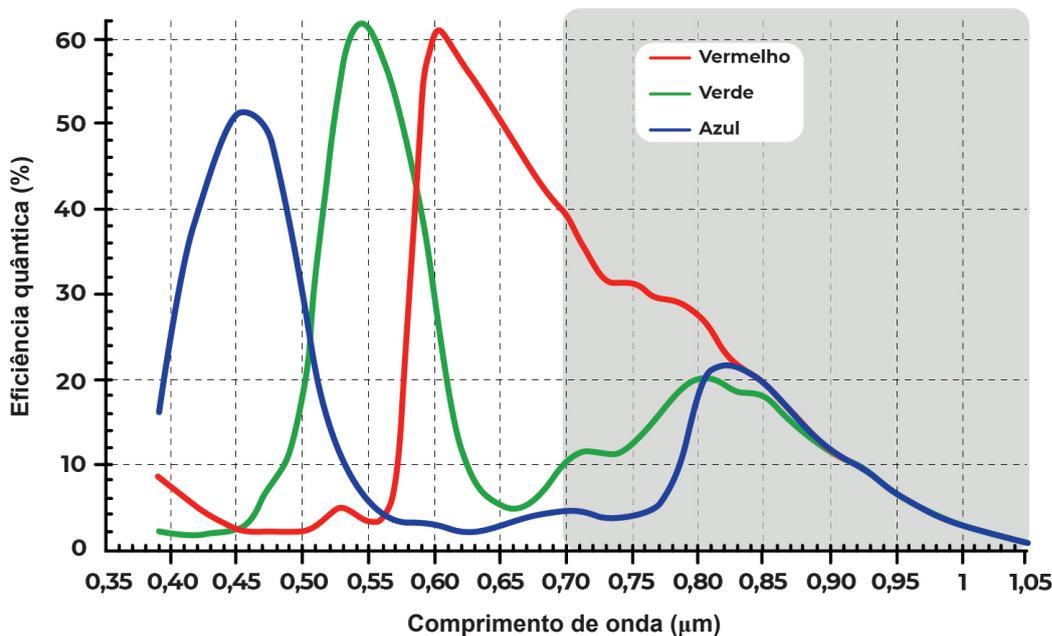


Figura 8. Espectroeletrômagnético com detalhe para a região do NIR (em amarelo) que é bloqueada nos canais do RGB.

Câmeras modificadas

Embora a maioria das câmeras comerciais não esteja configurada inicialmente para medir a região do infravermelho próximo (NIR), elas podem ser adaptadas removendo ou substituindo o filtro óptico (Figura 9A), que está bloqueando a porção NIR do espectro. Na verdade, esse é o método mais comum para criar uma câmera que pode ser usada para fornecer índices de vegetação (Nelson, 2017). Por exemplo, o filtro óptico NIR pode ser substituído por um filtro de passagem longa (Figura 9B) que permite a passagem apenas de emissões vermelhas e NIR, para a geração de índices de vegetação, como o índice NDVI (índice de vegetação por diferença normalizada) proposto por Rouse et al. (1974).

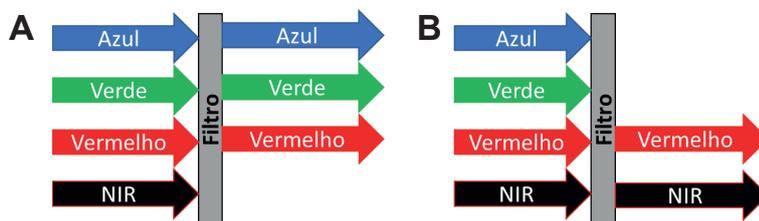


Figura 9. Exemplo de filtros ópticos. (A) Adaptação para remover ou substituir o filtro óptico; (B) Filtro de passagem longa que permite a passagem de emissões vermelhas e NIR.

Se o sensor mostrado na Figura 8 estivesse com o filtro da Figura 9B, a curva de resposta resultante ficaria semelhante ao mostrado na Figura 10. Nesta Figura, todas as emissões abaixo de 575 nm foram bloqueadas pelo filtro de passagem longa e todas as emissões acima de 575 nm podem passar.

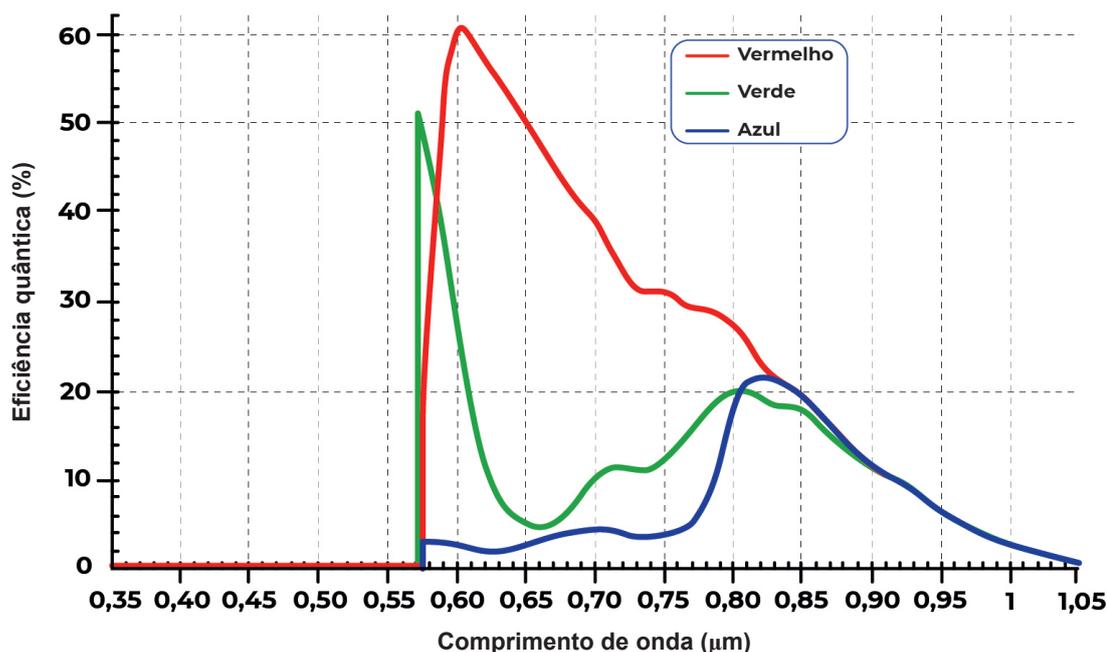


Figura 10. Curva de resposta do filtro de passagem longa bloqueando até o comprimento de onda 550 nm.

Como toda a luz azul entre 400 nm e 500 nm está sendo bloqueada, a maior parte do que a banda azul está detectando é, na verdade, a luz NIR. Neste caso, a banda azul é mais sensível entre 800 nm e 900 nm. Portanto, a banda azul pode ser usada como uma aproximação razoável para o conteúdo NIR da superfície que está sendo registrada. A banda vermelha, por outro lado, é sensível nas regiões vermelha e NIR.

Segundo Nelson (2017), para aproximar o conteúdo vermelho da foto, é comum simplesmente subtrair a banda azul da banda vermelha. A área realçada em rosa na Figura 11 representa a porção da banda vermelha que permaneceria após a subtração da banda azul.

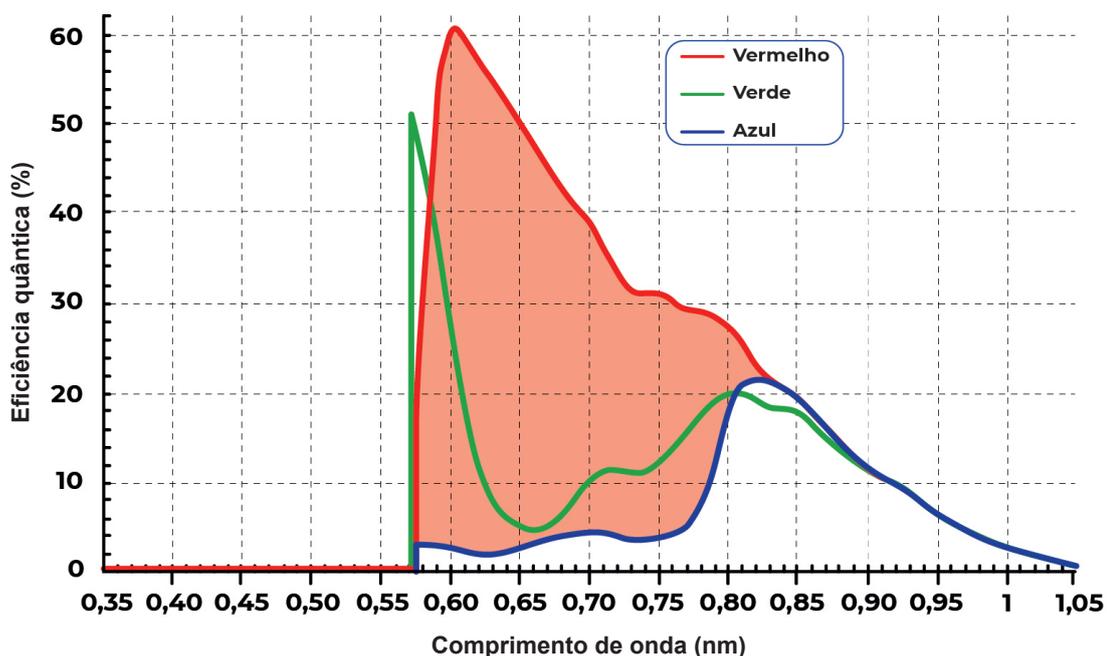


Figura 11. Subtração da banda azul da banda vermelha, com destaque para o resultado da subtração da azul em relação a banda vermelha, remanesecendo a região em rosa que seria a porção da região do vermelho resultante.

Nijland et al. (2014) consideram que as câmeras modificadas são reconhecidas como um método econômico de aplicação em estudos de fitossanidade da vegetação. A capacidade de utilizar essas câmeras para produzir informações de séries temporais contribui para um melhor entendimento das relações entre as condições ambientais, a sanidade da vegetação e a produtividade. Os autores consideram que as câmeras modificadas aplicam transformações não lineares aos dados da imagem, de modo que necessitam da correção do usuário. Porém, nem sempre é possível corrigir efetivamente as mudanças na iluminação e exposição (Wüller et al., 2007). Nijland et al. (2014) apontam as câmeras modificadas como sendo ferramentas simples e acessíveis para o monitoramento da sanidade e fenologia das plantas, que podem ser ajustadas, apesar de suas limitações, para registrar a radiação infravermelha próxima.

Limitações em câmeras modificadas

Ao se calcular o índice NDVI, deve-se garantir que o conteúdo de luz seja o mais preciso possível. Observando-se a Figura 11, percebe-se que nem toda a área rosa é realmente composta de luz “vermelha”. A região vermelha do espectro, geralmente, varia de aproximadamente 600 nm a 700 nm. No gráfico da Figura 12, uma porção considerável da área em vermelho está acima de 700 nm e, portanto, não é verdadeiramente vermelha, mas sim NIR. Isso reduzirá a precisão da medição do NDVI.

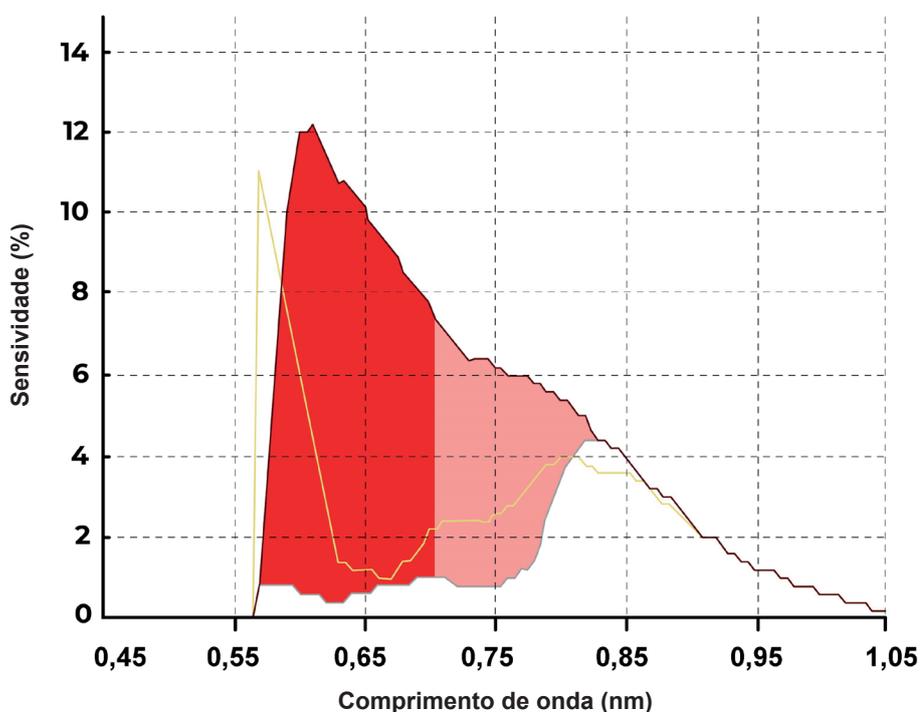


Figura 12. Curva de resposta da banda vermelha nas regiões do vermelho e NIR. Em vermelho destaque para a região que está dentro da faixa espectral do “vermelho”. Em rosa destaque para a região que está sendo falsamente assumida como vermelha.

A Figura 12 mostra a mesma curva de resposta da câmera da Figura 11, porém destaca-se, em vermelho, a região que está dentro da faixa espectral do “vermelho” e, em rosa, a região que está

sendo falsamente assumida como vermelha. Inicialmente, isso não parece muito significativo. De acordo com Nelson (2017), a região rosa compreende aproximadamente um terço da área total combinada das duas bandas (vermelha + NIR). A banda vermelha é composta, principalmente, de conteúdo verdadeiramente vermelho e, portanto, uma aproximação razoável do vermelho. No entanto, a vegetação responde muito melhor na região NIR, começando acima de 700 nm, do que na região vermelha. Em outras palavras, quando a luz reflete a vegetação típica, mais luz NIR vazará para a banda vermelha do sensor, corrompendo a medição.

A Figura 13 apresenta a curva de resposta após a correção da reflectância da vegetação. A área rosa na figura mostra como o vazamento de canal vermelho pode comprometer os valores de NDVI para aplicações que envolvam estudos da vegetação, tais como florestas nativas, plantios florestais e monitoramento de culturas agrícolas.

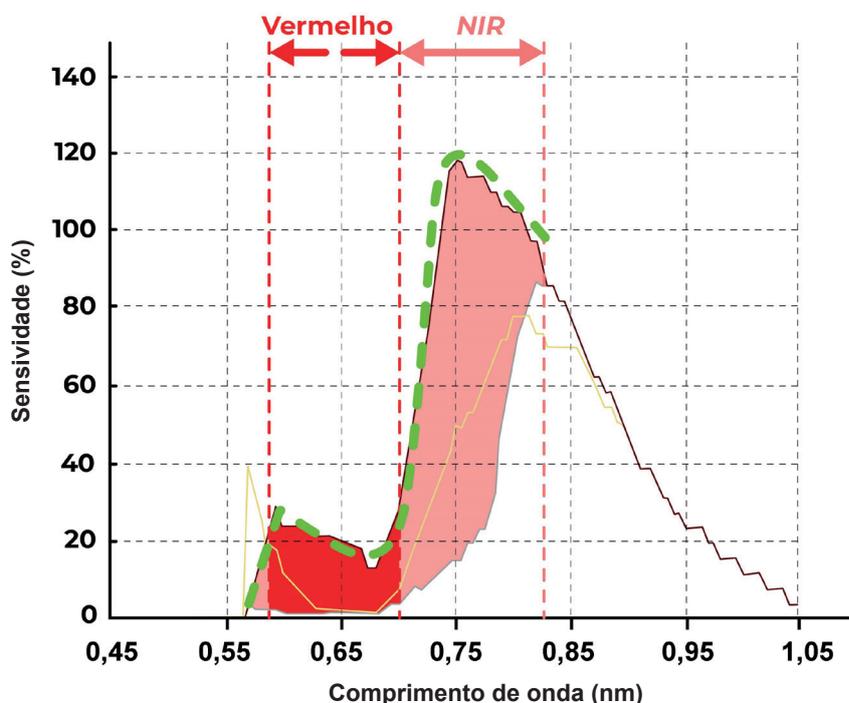


Figura 13. Curva de resposta após a correção da reflectância da vegetação.

Ao tomar fotos da vegetação com câmeras modificadas, o cálculo para estimar o vermelho resultará na maioria do conteúdo vermelho sendo também composto de luz NIR, ou seja, cerca de 75% do conteúdo vermelho vêm de fontes que não estão dentro do espectro vermelho. Essa quantidade de mistura dos dados, provenientes da faixa do espectro eletromagnético correspondente ao vermelho, afetará negativamente a precisão e confiabilidade das análises baseadas em NDVI.

As câmeras modificadas podem custar de USD\$ 400,00 a USD\$ 700,00. A Figura 14 apresenta dois dos modelos comercializados de câmeras modificadas.



Figura 14. Exemplo de câmeras modificadas. Modelo Canon S110 (A); Mapir Survey 3 (B).

Quando se trabalha com o processamento das imagens de câmeras modificadas, pode-se utilizar alguns artifícios para melhorar os resultados. As configurações das câmeras modificadas normalmente podem ser acessadas nas plataformas de processamento; essas informações estão relacionadas aos metadados, e ao peso fornecido ou valor atribuído para cada banda (faixa espectral). Quando não estão incorporados os pesos de cada banda, sugerem-se os seguintes valores:

- Para câmeras (NIR, R, G): NIR = 0,7152; *red* = 0,0722; e *green* = 0,2126.
- Para câmeras (NIR, G, B): NIR = 0,7152; *green* = 0,2126; e *blue* = 0,0722.

Esses valores podem ser alterados. Recomenda-se dar maior peso às bandas com maior contraste verificado no histograma. Definir o peso correto da banda da câmera pode consumir muito tempo, exigindo uma abordagem de tentativa e erro. Examinando o histograma de níveis de banda de uma imagem, pode-se determinar qual banda tem mais contraste. Os histogramas amplos representam uma cena com contraste significativo (Figura 15B), enquanto os histogramas estreitos (Figura 15A) representam menos contraste. Em geral, a seleção dos pesos é algo para se experimentar, pois é difícil dizer quais são os valores corretos nas câmeras modificadas. A soma dos pesos das bandas deve ser sempre igual a 1,0.

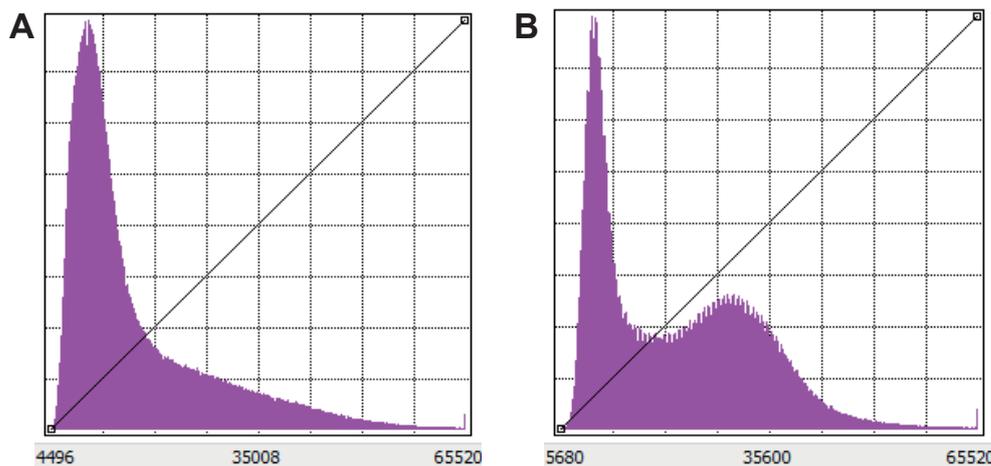


Figura 15. Histogramas com baixo contraste (A) e alto contraste (B).

Câmeras multiespectrais

As câmeras multiespectrais trazem uma banda específica para a região do NIR ou mais bandas como a *red-edge*, que amplia a capacidade de análise e geração de índices espectrais. Essa característica reduz a contaminação do intervalo entre o vermelho e o NIR e torna a obtenção de valores para índices de vegetação, solo e água mais precisos e confiáveis.

A Tabela 1 apresenta as características técnicas de algumas câmeras multiespectrais disponíveis no mercado. O objetivo desta tabela é auxiliar na escolha da melhor câmera multiespectral. Ela facilita a comparação em termos de custo e qualidade esperada da imagem. Alguns sensores captam dados de forma mais precisa que outros. Se um sensor capta uma região muito ampla do espectro de luz, como as câmeras modificadas, qualquer variação sutil na vegetação será perdida. Parâmetros como o centro da banda e sua largura são fundamentais para determinar a precisão de um sensor multiespectral.

Tabela 1. Características técnicas de algumas câmeras multiespectrais utilizadas no mercado.

Especificação	Sequoia+				Red Edge - M				Altum			
	Nome	Centro do comprimento de onda (nm)	Bandwidth (nm)	Intervalo	Nome	Centro do comprimento de onda (nm)	Bandwidth (nm)	Intervalo	Nome	Centro do comprimento de onda (nm)	Bandwidth (nm)	Intervalo
Bandas					Blue	475	20	465-485	Blue	475	20	465-485
	Green	550	40	530-570	Green	560	20	550-570	Green	560	20	550-570
	Red	660	40	640-680	Red	668	10	663-673	Red	668	10	663-673
	Red Edge	735	10	730-740	Red Edge	717	10	712-722	Red Edge	717	10	712-722
	Near IR	790	40	770-810	Near IR	840	40	820-860	Near IR	840	40	820-860
	-				-				Termal	11000	6000	8000-14000
Sistema de captura	MS: Global Shutter, RGB: Rolling Shutter				MS: Global Shutter, RGB: Global Shutter				MS: Global Shutter, RGB: Global Shutter			
bits	8 (Tiff) ou 10 (RAW)				12 (DNG) ou 16 (Tiff)				12 (RAW)			
bits Termal	-				-				14			
GSD (120 m)	13 (cm)				8,2 (cm)				5,2 (cm)			
GSD (120 m) Termal	-				-				81 (cm)			
Preço (\$)	3.500,00				4.900,00				9.950,00			



Continua...

Tabela 1. Continuação...

Especificação	Sentra Quad Sensor				P4 multispectral				Xm5			
	Nome	Centro do comprimento de onda (nm)	Bandwidth (nm)	Intervalo	Nome	Centro do comprimento de onda (nm)	Bandwidth (nm)	Intervalo	Nome	Centro do comprimento de onda (nm)	Bandwidth (nm)	Intervalo
Bandas					Blue	450	16	442-458	Blue	445	20	435-455
					Green	560	16	552-568	Green	550	20	540-560
	Red	655	40	635-675	Red	650	16	642-658	Red	670	20	660-680
	Red Edge	725	25	712,5-737	Red Edge	730	16	722-738	Red Edge	715	40	695-735
	Near IR	800	25	787,5-812	Near IR	840	26	827-853	Near IR	835	50	810-860
	-				-				-			
Sistema de captura	MS: Global Shutter, RGB: Global Shutter				MS: Global Shutter, RGB, Rolling Shutter				Global Shutter			
bits	12 (RAW)				16 (Tiff)				16 (Tiff)			
bits Termal	-				-				-			
GSD (120 m)	9,1 (cm)				3,2 (cm)				4,7 (cm)			
GSD (120 m) Termal	-				-				-			
Preço (\$)	4.599,00				6.499,00				*Não comercializada fora dos sistemas da Xrobots			



Os sensores de banda larga, ou faixas espectrais com maior amplitude, como câmeras modificadas, medem larguras muito grandes do espectro eletromagnético, tomando a reflectância média de uma região grande para produzir um único valor, além de ocorrer sobreposição entre as bandas. Por outro lado, os sensores com faixas espectrais mais estreitas, como ocorre nas câmeras multiespectrais, capturam a reflectância de uma área muito específica do espectro. Isso permite que dados mais precisos sobre pequenas alterações sejam captados e nuances sejam percebidas.

A Tabela 1 apresenta todas as bandas com as respectivas larguras de faixa (*bandwidth*) do espectro eletromagnético, onde é possível perceber que a Sentera Quad Sensor tem a menor largura da banda no NIR, enquanto a RedEdge e Altum possuem menor largura na banda de borda do vermelho (*red-edge*).

A banda *red-edge* está localizada entre as bandas do vermelho e do NIR e possui um desempenho diferenciado na determinação do conteúdo de clorofila nas plantas. Se uma planta está passando por estresse, essa variação será melhor captada nessa banda, como observado na Figura 16. Ao comparar as bandas do vermelho, da borda do vermelho e NIR, a maior amplitude de alteração aparece na *red-edge*.

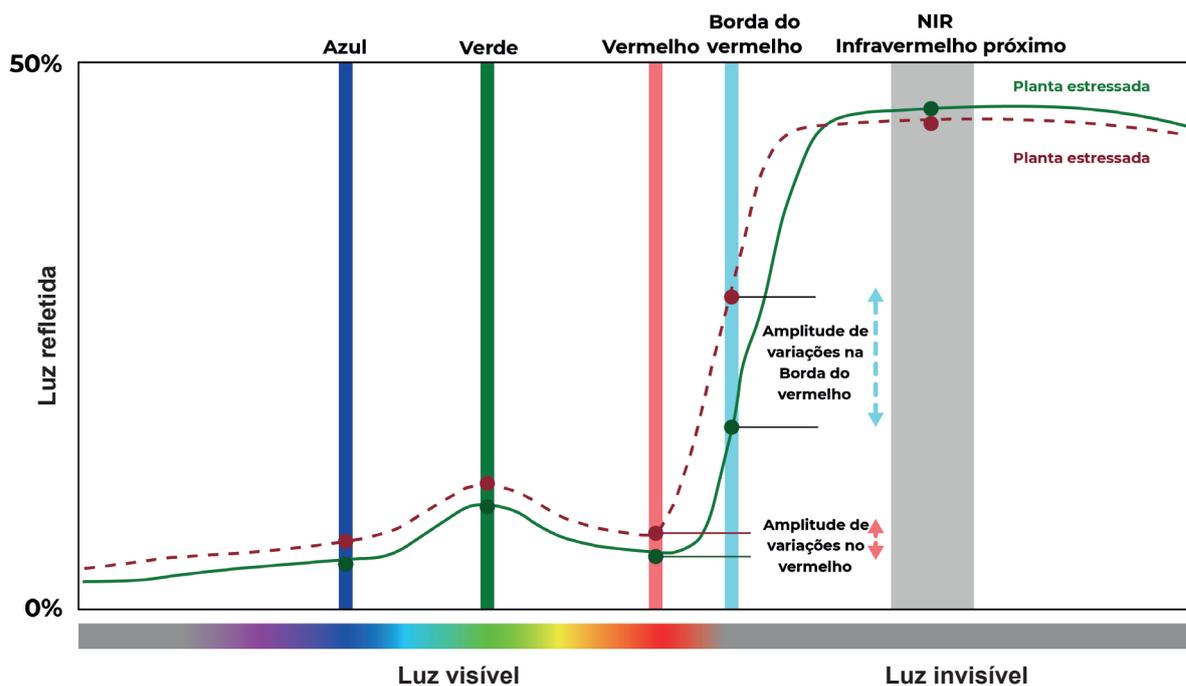


Figura 16. Mudanças da resposta espectral na borda do vermelho. Comparação do comportamento espectral de uma planta saudável e de uma planta estressada.

A Figura 17 apresenta o comportamento das bandas espectrais para uma câmera modificada Canon S110 e para a Micasense RedEdge-M. Observando o comportamento dos comprimentos de onda, percebe-se que, na câmera RedEdge-M, as bandas são mais estreitas e melhor definidas. Isso faz com que os cálculos dos índices espectrais (vegetação, solo e água) sejam mais precisos, pois não há confusão, nem sobreposição de bandas espectrais.

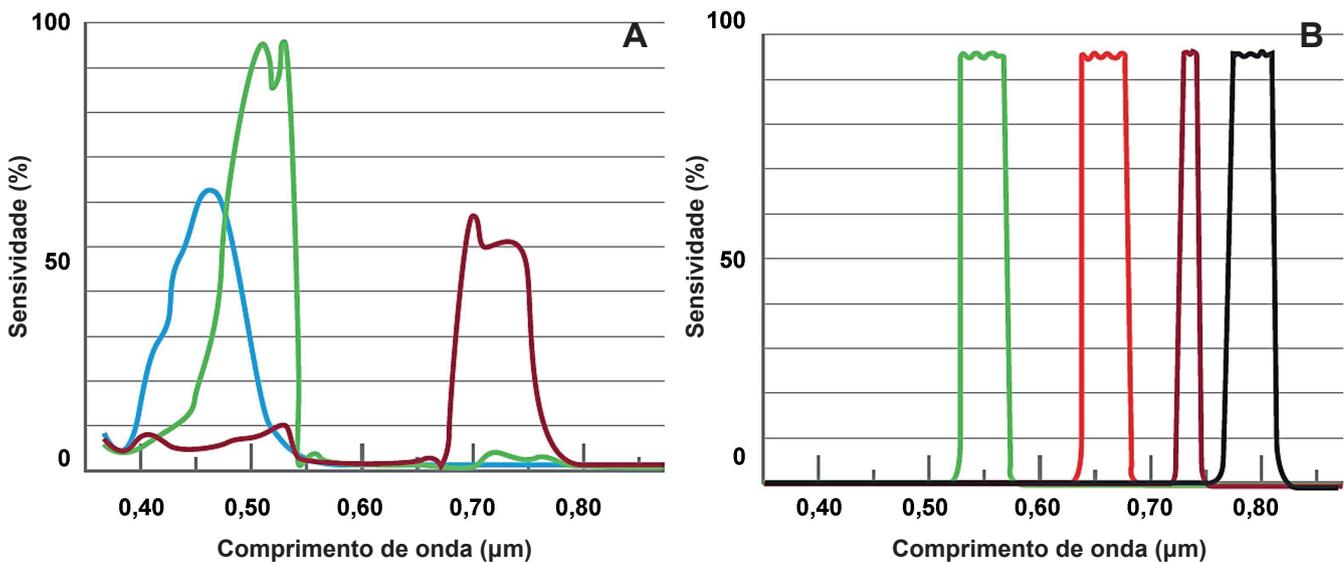


Figura 17. Comportamento das bandas espectrais para uma câmera modificada (A) e para uma câmera multiespectral (B).

Na câmera modificada (Canon S110), além da banda azul transformada em NIR responder de maneira mais modesta, ocorre a sobreposição das bandas, influenciando negativamente o resultado de análises que utilizam a banda NIR. Na Figura 17A as respostas das bandas da Canon S110 NIR estão normalizadas em relação à banda verde (Sensibilidade 100%). Na Figura 17B é apresentada a curva de resposta espectral para a câmera Micasense RedEdge-M. As cores das linhas correspondem às bandas da câmera. A linha marrom é um perfil de reflectância padrão da vegetação.

A XM5, câmera da Xrobots, une em um único sensor as bandas R, G, B, NIR e *red-edge*. O fabricante considera que um dos grandes diferenciais da XM5 é o sensor APS-C, que possibilita a geração de imagens multiespectrais com resolução de 4.7 cm/pixel a 120 m (400 ft) AGL, quando o comum em sensores do tipo é um GSD de 8 cm na mesma altitude (XRobots, 2020).

Atualmente, é encontrado no mercado o modelo Phantom 4 Pro Multiespectral, que possui seis sensores CMOS 1/2.9", incluindo um sensor RGB para imagens RGB e cinco sensores monocromáticos para imagens multiespectrais. Cada sensor possui pixels efetivos de 2,08 MP (2,12 MP no total) (DJI, 2019). Um sensor solar integrado no topo do drone permite capturar a radiação solar, diminuindo a incerteza na coleta de dados em diferentes períodos do dia.

Gomes et al. (2021) compararam o desempenho de uma câmera RGB modificada com a de uma câmera multissensor, para a obtenção do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), em uma área com cultivo de café. Os autores relatam que para obter o padrão de variabilidade espacial do NDVI da cultura, a câmera MAPIR Survey3W pode ser usada. No entanto, esta câmera não pode monitorar a variabilidade temporal NDVI; neste caso, o MicaSense RedEdge-MX é a câmera recomendada.

Gomes et al. (2021) fizeram uma comparação entre um sensor portátil de campo, sensor RGB e Multiespectral. Os autores mostraram, que valores mais altos de NDVI foram gerados ao usar o sensor GreenSeeker, sensor óptico de campo para calcular NDVI. As imagens calibradas do MAPIR Survey3W resultaram em valores mais baixos e menos variabilidade espacial do NDVI, enquanto as imagens calibradas da câmera MicaSense RedEdge-MX mostraram maior variabilidade espacial nos valores de NDVI. A câmera MAPIR Survey3W consiste em apenas um sensor para detectar as

três bandas. Portanto o ajuste das configurações da câmera não é feito separadamente para cada banda - ou seja, a mesma configuração é usada para capturar as três bandas. Por esse motivo, as configurações podem resultar em um bom ajuste para uma banda e nem tanto para as outras duas bandas. Então, a refletância pode não ser tão bem estimada.

Limitações em câmeras multiespectrais

As imagens obtidas por câmeras tipicamente multiespectrais também podem apresentar limitações. Fernández-Guisuraga et al. (2018) mostraram que as imagens brutas capturadas pela câmera multiespectral Parrot SEQUOIA podem apresentar algumas anomalias radiométricas indesejáveis. Na banda vermelha pode ocorrer a saturação do sensor em superfícies altamente refletivas.

Problemas relacionados com o efeito da função de distribuição de reflectância bidirecional (BRDF) também podem ocorrer em algumas câmeras multiespectrais (Stark et al., 2016). O BRDF ocorre em função do comprimento de onda, do azimute do observador, do zênite do observador, do azimute da iluminação e do zênite da iluminação (Schaeppman-Strub et al., 2006). Algumas correções para contornar esse tipo de efeito foram propostas (McKenna et al., 2017; Tu et al., 2018) e devem ser feitas individualmente para cada imagem, levando em consideração o tempo e a posição da aquisição da imagem, orientação da imagem e posicionamento solar (azimute e elevação), seguindo algumas etapas fotogramétricas.

Algumas plataformas de processamento possuem algoritmos para minimizar o efeito BRDF, caso se esteja utilizando os dados e imagens de um painel de reflectância apropriado. Cada painel possui uma curva de calibração associada a ele no espectro visível e próximo ao infravermelho. Voos cruzados e baixa velocidade também ajudam a minimizar esse efeito.

A dependência do comprimento de onda no BRDF pode ser percebida pela mudança no tom de cor das árvores na imagem na Figura 18, obtida por uma câmera tipicamente multiespectral, variando os tons de cinza de baixo para cima. Em Stark et al. (2016) pode ser encontrado um exemplo do efeito BRDF em imagem tomada com câmera modificada (Canon - ELPH110) na composição GBNIR (Verde, Azul e Infravermelho próximo), variando os tons de cinza da direita para a esquerda.



Figura 18. Efeito BRDF em imagem tomada com câmera multiespectral Micasense RedEdge (banda Borda do vermelho Red Edge).

Sensor de irradiância (DLS) e painel de reflectância calibrado (CRP)

Algumas câmeras multiespectrais e modificadas possuem acessórios para tornar a captação das imagens por drones mais acurada. A fabricante Micasense recomenda a utilização em conjunto de dois acessórios. O *downwelling light sensor* (DLS – tradução livre em português sensor de irradiância), Figura 19B, e o *calibrated reflectance panel* (CRP – tradução livre em português painel de reflectância calibrado), Figuras 19A e 19C, para permitir calibrações de reflectância. Nas câmeras modificadas, atualmente, não existem opções para se obter a irradiância com um acessório específico para esse fim como o DLS, mas tem-se disponível o CRP para a obtenção da radiância e a execução do ajuste dos valores dos pixels.

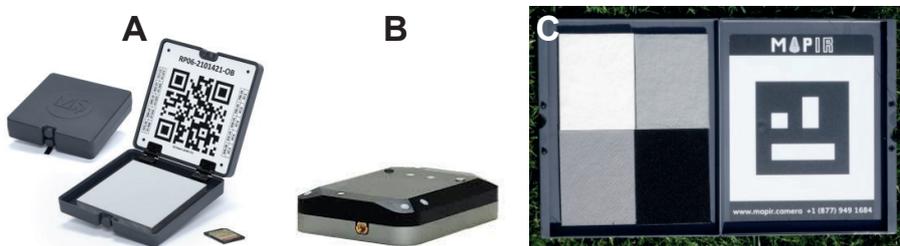


Figura 19. CRP para RedEdge MX (A) e para Mapir Survey 3 (C), e DLS Micasense (B).

Fontes: micasense.com e mapir.camera.

Tanto em câmeras multiespectrais quanto nas modificadas usa-se um CRP para ajustar as condições de iluminação no momento da tomada da foto. Fotos de um CRP tiradas antes e depois de cada voo fornecem a quantidade de luz que chega ao solo no momento da captura das imagens. Os CRP fazem uma compensação dos valores dos pixels das fotos e procuram retratar as condições de iluminação da data, hora e local do voo. Assmann et al. (2018) apresentaram em detalhes as implicações do uso de painéis de calibração e correção radiométrica dos dados de saída das câmeras multiespectrais.

A irradiância pode ser definida como a densidade de energia solar incidente, por unidade de tempo, numa determinada superfície, medida geralmente em *watt* por metro quadrado. A reflectância é a razão entre a quantidade de energia radiante que deixa uma unidade de área no terreno (radiância) e a quantidade de energia incidente naquela área (irradiância), medida no mesmo instante de tempo em determinada faixa do espectro eletromagnético. A radiância representa o brilho de um elemento na superfície terrestre, sendo que cada pixel da imagem representa a radiância média da cena contida neste pixel.

A reflectância é uma propriedade do alvo e utiliza um artifício matemático para caracterizá-la, conhecido como fator de reflectância. De acordo com Milton (1987), o fator de reflectância é uma relação existente entre a radiância do alvo e a radiância de uma placa padrão (superfície lambertiana com 100% de reflectância) (Steffen et al., 1996). Essa placa é popularmente conhecida como painel de calibração, que normalmente acompanha as câmeras multiespectrais. Os cálculos para gerar o fator de reflectância foram apresentados por Salvado (2018) e Maguire (2018).

Na prática, o DLS e o CRP fornecem valores para a calibração dos valores dos pixels. Realizam a calibração dos dados (valores de pixel) e não do sensor. O DLS deve ser instalado na parte superior do drone, voltado para o céu. Ele grava dados sobre a quantidade de luz para cada uma das bandas da câmera durante o voo (incorporados aos metadados). As medidas obtidas pelo DLS dependem da orientação do sensor em relação ao sol. Se o DLS estiver inclinado, ele irá obter valores diferenciados para cada imagem. O ideal é que ele permaneça horizontalmente nivelado no momento da coleta das imagens.

No pós-processamento, os dados do DLS e do CRP podem ser usados para corrigir alterações nas condições de iluminação durante o voo. O DLS está continuamente sendo aprimorado para diminuir a necessidade de imagens do CRP. Atualmente, os dois vêm sendo utilizados em conjunto. Em algumas situações onde se tem condições de incidência de luz com variações abruptas ocasionadas pela alternância de áreas sem sombra e com sombra devido à presença de nuvens esparsas, abrir mão do uso dos metadados provenientes do DLS e CRP pode gerar resultados mais homogêneos e mais apropriados, quando o objetivo é realizar o monitoramento (diversos voos em datas diferentes) de uma área. A utilização de um CRP permite ter parâmetros para a normalização de imagens tomadas em dias diferentes ou em horários distintos, auxiliando a comparação quando o objetivo é monitorar determinadas áreas.

Pontos de apoio com drones (foto-identificáveis em campo)

O mapeamento com drones normalmente utiliza pontos de apoio no terreno, isto é, pontos com coordenadas conhecidas (georreferenciados). Os pontos de apoio são marcos ou locais foto-identificáveis cujas coordenadas geodésicas são conhecidas, em um determinado sistema de referência. São utilizados para o georreferenciamento das respectivas imagens obtidas no local e na orientação absoluta do modelo estereoscópico.

Os alvos artificiais são utilizados quando não se consegue utilizar as feições ou objetos do próprio terreno, o que normalmente ocorre em áreas rurais. Esses alvos podem ser de diferentes formas, sendo as mais comuns os formatos em X (delineado, muitas vezes, com cal) e quadrícula (preto e amarelo) (Figura 20). Considera-se imprescindível ter o centro do alvo bem definido, pois irá auxiliar na etapa de processamento dos dados.



Fotos: Wilson Anderson Holler

Figura 20. Exemplos de pontos de apoio artificiais foto-identificáveis.

Além disso, considera-se importante que os alvos apresentem cores contrastantes, como por exemplo, preto e branco, preto e amarelo, entre outros. Deve-se também atentar para a quantidade e disposição dos pontos de apoio em campo, que irá variar de acordo com as características da área de estudo. Para estudos de monitoramento, sugere-se a implantação de marcos artificiais.

Considerações finais

As imagens obtidas por drones possuem uma resolução espacial muito alta, sendo possível perceber mais detalhes nas imagens. Variações na orientação do sensor embarcado, no azimute e na elevação do sol criarão características distintas de sombra ao longo do dia. Esse fator pode introduzir uma variabilidade de reflectância e, conseqüentemente, distorcer o cálculo de índices espectrais. Portanto, o planejamento de voo com a finalidade de monitoramento deve levar em consideração essas variações.

As câmeras RGB e modificadas, em geral, possuem largura de banda (*bandwidth*) mais ampla do que as câmeras multiespectrais. A interpretação, a discriminação e identificação de anomalias em uma área de plantio com câmeras multiespectrais são mais confiáveis, enquanto com câmeras modificadas são necessárias diversas validações para que seu uso seja aceitável. Os resultados das câmeras modificadas não discriminam tão bem as variações de anomalias, mas permitem perceber algumas diferenças e podem servir como indicadores.

No Brasil existem iniciativas que buscam otimizar o uso de câmeras modificadas para captar as faixas do NIR e *red-edge*, com resultados aceitáveis utilizando o NIR e calibrações para culturas específicas. O grande ganho está na percepção de detalhes, que se ganha com a alta resolução espacial.

Assim como o termômetro mede a temperatura do corpo humano, as câmeras multiespectrais capturam assinaturas espectrais: temperatura alta pode indicar doença, mas não a causa. Da mesma forma, mudanças na reflectância da vegetação indicam estresse, porém, não indicam sua causa.

Referências

- ASSMANN, J. J.; KERBY, J. T.; CUNLIFFE, A. M.; MYERS-SMITH, I. H. Vegetation monitoring using multispectral sensors: best practices and lessons learned from high latitudes. **Journal of Unmanned Vehicle Systems**, v. 7, n. 1, p. 54-75, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1139/juvs-2018-0018>.
- CÁRDENAS, J. L.; CORONA, N.; PIZANA, J. M. G.; NÚÑEZ, J. M.; MADRIGAL, J. M. Geospatial technologies to support coniferous forests research and conservation efforts in Mexico. **Old-Growth Forests and Coniferous Forests: Ecology, Habitat and Conservation**, p. 67-123, 2015.
- DJI. **Características do Phantom 4 Pro Multispectral**. [2019]. Disponível em: <https://www.dji.com/br/p4-multispectral/specs>. Acesso em: 10 fev. 2021.
- FERNÁNDEZ-GUISURAGA, J. M.; SANZ-ABLANEDO, E.; SUÁREZ-SEOANE, S.; CALVO, L. Using unmanned aerial vehicles in postfire vegetation survey campaigns through large and heterogeneous areas: opportunities and challenges. **Sensors**, v. 18, n. 2, p. 586, 2018.
- GATES, D. M. Energy, plants, and ecology. **Ecology**, v. 46, n. 1-2, p. 1-13, 1965. DOI: <https://doi.org/10.2307/1935252>

- GOMES, A. P. A.; QUEIROZ, D. M. DE; VALENTE, D. S. M.; PINTO, F. DE A. DE C.; ROSAS, J. T. F. Comparing a single sensor camera with a multisensor camera for monitoring coffee crop using unmanned aerial vehicles. **Engenharia Agrícola**, v. 41, n. 1, p. 87–97, 2021. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v41n1p87-97/2021>. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-69162021000100087&tlng=en. Acesso em: 5 maio 2021.
- JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente**: uma perspectiva em recursos terrestres. 3. ed. São José dos Campos: Parêntese, 2011. 604 p.
- MAGUIRE, M. S. **An evaluation of unmanned aerial system multispectral and thermal infrared data as information for agricultural crop and irrigation management**. 2018. 142 f. Thesis (Master of Science) - University of Nebraska, Lincoln.
- MCKENNA, P.; ERSKINE, P. D.; LECHNER, A. M.; PHINN, S. Measuring fire severity using UAV imagery in semi-arid central Queensland, Australia. **International Journal of Remote Sensing**, v. 38, n. 14, p. 4244-4264, 2017.
- MILTON, E. J. Review article principles of field spectroscopy. **Remote Sensing**, v. 8, n. 12, p. 1807-1827, 1987.
- NASA. National Aeronautics and Space Administration. Science Mission Directorate. **Reflected near-infrared waves**. 2010. Disponível em: http://science.nasa.gov/ems/08_nearinfraredwaves. Acesso em: 20 maio 2021.
- NEBIKER, S.; LACK, N.; ABÄCHERLI, M.; LÄDERACH, S. Light-weight multispectral UAV sensors and their capabilities for predicting grain yield and detecting plant diseases. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences**, v. 41, 2016.
- NELSON, R. Collecting accurate, reliable crop health measurements using commercial camera sensors. **Sentera**, 2017.
- NIJLAND, W.; JONG, R. de; JONG, S. M. de; WULDER, M.; BATER, C. W.; COOPS, N. Monitoring plant condition and phenology using infrared sensitive consumer grade digital cameras. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 184, p. 98-106, 2014.
- PONZONI, F. J. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação**: diagnosticando a Mata Atlântica. São José dos Campos: INPE, 2002. Disponível em: http://ecologia.ib.usp.br/lepac/bie5759/CAP8_FJPonzoni.pdf. Acesso em: 10 fev. 2021.
- ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. HARLAN, J. C. Monitoring the vernal advancements and retrogradation. Texas, **Texas A & M University**, p. 1-371, 1974.
- SALVADO, A. B. de T. **Aerial semantic mapping for precision agriculture using multispectral imagery**. 2018. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores) - Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.
- SCHAEPMAN-STRUB, G.; SCHAEPMAN, M. E.; PAITER, T. H.; DANGEL, S.; MARTONCHIK, J. V. Reflectance quantities in optical remote sensing: definitions and case studies. **Remote Sensing of Environment**, v. 103, n. 1, p. 27-42, 2006.
- STARK, B.; ZHAO, T.; CHEN, Y. Q. An analysis of the effect of the bidirectional reflectance distribution function on remote sensing imagery accuracy from small unmanned aircraft systems. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON UNMANNED AIRCRAFT SYSTEMS (ICUAS), 2016. [Proceedings]... [S.l.]: IEEE, 2016. p. 1342-1350. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICUAS.2016.7502566>.
- STEFFEN, C. A., MORAES, E. C., GAMA, F. F. Tutorial radiometria óptica espectral. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 8., 1996. Salvador. **Anais [...]**. Salvador: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1996.
- THOMPSON, L. J.; SHI, Y.; FERGUSON, R. B. **Getting Started with drones in Agriculture**. Lincoln: University of Nebraska, Extension, 2017. Disponível em: <http://extensionpublications.unl.edu/assets/pdf/g2296.pdf>. Acesso em: 2 fev. 2021.
- TU, Y.-H.; PHINN, S.; JOHANSEN, K.; ROBSON, A. Assessing radiometric correction approaches for multi-spectral UAS imagery for horticultural applications. **Remote Sensing**, v. 10, n. 11, p. 1684, 2018.
- VAUTHERIN, J.; RUTISHAUSER, S.; SCHNEIDER-ZAPP, K.; CHOI, H. F.; CHOVANCOVA, V.; GLASS, A.; STRECHA, C. Photogrammetric accuracy and modeling of rolling shutter cameras. **ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences**, v. 3, n. 3, 2016.
- WÜLLER, D.; GABELE, H.; ELECTRONIC, F.; GMBH, V. C. Z. H. The usage of digital cameras as luminance meters. **Proceedings** Volume 6502, Digital Photography III. 2007. <https://doi.org/10.1117/12.703205> Acesso em: 12 dez. 2020.
- XMOBOTS. **Características da câmera XM5**. [2020]. Disponível em: <https://xmrobots.com.br/cameras/xm5/>. Acesso em: 5 fev. 2021.

Embrapa

Florestas

