

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

DENNER BORGES REZENDE

USO DE IMAGENS TOMADAS POR AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA  
PARA DETECÇÃO DE INJÚRIAS PROVOCADAS POR *Spodoptera frugiperda* EM  
MILHO

Monte Carmelo

2021

DENNER BORGES REZENDE

USO DE IMAGENS TOMADAS POR AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA  
PARA DETECÇÃO DE INJÚRIAS PROVOCADAS POR *Spodoptera frugiperda* EM  
MILHO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
ao curso de Agronomia da Universidade  
Federal de Uberlândia, *Campus* Monte  
Carmelo, como requisito necessário para a  
obtenção do grau de Engenheiro Agrônomo.

Orientador: Prof. Dr. Odair José Marques

Monte Carmelo, 05 de novembro de 2021

Banca Examinadora

---

Prof. Dr. Odair José Marques  
Orientador

---

Profa. Dra. Vanessa Andaló Mendes de Carvalho  
Membro da Banca

---

Prof. Dr. Edson Aparecido dos Santos  
Membro da Banca

Monte Carmelo

2021

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente quero agradecer a Deus e Jesus Cristo por me dar forças e nunca deixar de acreditar no meu sonho, e me fazer enxergar sempre de forma mais clara e branda situações difíceis encontradas no meio do caminho, situações essas que foram superadas graças à minha FÉ.

Sinto o dever e a honra de agradecer aos meus pais: Edson Borges Rezende e Joana Celia Borges Rezende e minha irmã Anna Julia Borges Rezende, por sempre me apoiarem para que essa caminhada fosse possível. Também agradecer à toda minha família que contribuíram de alguma forma neste sonho, em especial às minhas queridas avós Ramira Borges de Deus (*in memoriam*), Maria Alves Gama (*in memoriam*), que sempre fizeram parte da minha vida neste plano e hoje estão ao lado do Pai Celestial intercedendo por minhas conquistas.

Agradeço ao povo brasileiro e à Universidade Federal de Uberlândia, Campus Monte Carmelo, por ter proporcionado grandes momentos em minha vida, por ter permitido que conhecesse tantos amigos que levarei para toda minha vida e lembranças que jamais esquecerei.

Sinto uma honra inestimável em poder citar o nome do Professor Odair José Marques e agradecer pela paciência, dedicação como orientador e amizade construída nesta caminhada. Agradeço imensamente o Professor George Deroco Martins que me fez despertar o interesse na agricultura digital e se fez presente apoiando e me passando conhecimentos sobre o assunto. Quero também agradecer ao Professor Edson Aparecido dos Santos pelos ensinamentos e por ter me proporcionado a chance de ser monitor da disciplina de Plantas Infestantes, assunto com o qual tenho grande afinidade. Agradeço a todos os meus professores com os quais tive o prazer de conviver em aulas teóricas e/ou práticas e poder ter tido a chance de absorver todos os ensinamentos por eles transmitidos.

Agradeço aos meus amigos que trilharam comigo esse caminho longo e difícil e que sempre me ajudaram na faculdade ou até mesmo em situações do dia a dia, em especial aos meus colegas de república Luiz Fernando Ferreira Gruppi, Danilo Aparecido Rosa, Leandro Junio, João Rodolfo Viana, Felipe Dornelas, Gustavo Borges, Valter Neto, Protasio Braz da Silva Neto, não posso deixar de agradecer também aos queridos colegas do curso de Engenharia de Agrimensura e Cartográfica que me ajudaram no desenvolvimento do trabalho: Carlos Alberto Matias de Abreu Júnior, Laura Cristina Moura Xavier e João Paulo Vieira, e a todos que contribuíram de uma forma em minha vida.

## SUMÁRIO

RESUMO	5
1. INTRODUÇÃO	6
2. OBJETIVO	9
3. REVISÃO DE LITERATURA	10
3.1. Lagarta-do-cartucho	10
3.2. Uso de aeronaves remotamente pilotadas na agricultura	10
3.3. Sensoriamento remoto em campo	11
3.4. Uso das imagens aéreas na agricultura	12
3.5. Processamento digital da imagem	13
4. MATERIAL E MÉTODOS	14
4.1. Caracterização da área de estudo	14
4.2. Instalação e condução do experimento	14
4.3. Captura e processamento das imagens aéreas	19
4.4. Análise de indicadores do potencial das imagens na identificação de distintos tratamentos	21
4.5. Definição do modelo empírico de estimativa do índice de área foliar	22
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	24
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	33
7. REFERÊNCIAS	34

## RESUMO

*Spodoptera frugiperda* (Smith), lagarta-do-cartucho, é a principal praga da cultura do milho. Com a intensificação da agricultura, os cultivos sucessivos têm possibilitado maior infestação pela praga, levando ao surgimento de populações resistentes a inseticidas e culturas transgênicas. Pesquisas de campo para iniciar tratamentos com inseticidas são demoradas e exaustivas. Pensando em agilidade e qualidade, neste trabalho foi utilizada uma aeronave remotamente pilotada (ARP) equipada com uma câmera RGB e uma câmera MAPP3 para capturar imagens de uma lavoura de milho, com o objetivo de avaliar o potencial de imagens tomadas por ARPs em discriminar distintos tratamentos inseticidas aplicados sobre o milho e estimar o índice de área foliar em função de diferentes tipos de manejo e de danos causados pela *S. frugiperda*. Durante o ciclo da cultura do milho foram realizadas as seguintes avaliações: determinação do IAF, severidade do ataque da praga e, voos para aquisição das imagens. Modelos radiométricos para estimativa do IAF foram obtidos a partir de modelos de regressão linear compostos pelas bandas que melhor correlacionaram com os parâmetros medidos. Os resultados obtidos demonstraram eficiência e maior precisão na estimativa do IAF para o modelo radiométrico composto pela a banda do infravermelho próximo na câmera MAPP3. A partir da análise de números digitais foi possível discriminar os tratamentos inseticidas aplicados sobre os dois híbridos do milho com um nível de significância de 68%, porém o mapa de distribuição espacial dos tratamentos evidenciou classes de informação dispostas de forma não equivalentes às parcelas de tratamento. Por meio do mapa gerado foi possível observar a perda do IAF e identificar os tratamentos, embasando a tomadas de decisões. O modelo gerado a partir da equação do IAF apresentou resultados satisfatórios, pois as plantas com injúrias apresentaram resposta espectral menor que as plantas saudáveis, o que interferiu diretamente no valor de IAF calculado por este modelo, uma vez que este apresentou o infravermelho próximo como variável com maior correlação sobre as demais bandas. O erro quadrático médio obtido foi de 885,0714 cm<sup>2</sup> para uma amostra de validação com o coeficiente determinístico de 25,1%. Nesta condição, este erro foi equivalente a uma folha de 8 cm de largura por 100 cm de comprimento. Dessa forma, no que tange a aplicabilidade da fórmula, os resultados apresentaram valores satisfatórios, e condizentes com o determinado em campo, constatando a validade do modelo. Obteve-se correlação satisfatória entre o IAF e as imagens aerofotogramétricas. O método estabelecido foi eficiente para o monitoramento de injúrias de *S. frugiperda* em lavoura de milho. Como observado na tabela das correlações dentre todas as bandas testadas a de melhor correlação foi a do IVP.

**Palavras-chaves:** controle de praga; ARP; lagarta-do-cartucho; *Zea mays*.

## 1. INTRODUÇÃO

Com a evolução humana e sua crescente densidade populacional grandes desafios surgiram e um desses desafios que vem sendo estudado é “Como alimentar o mundo?”. A resposta para essa pergunta é simples: produção agrícola. O milho *Zea mays* (L.) está entre os cereais mais consumidos no Brasil e é fonte de alimento principalmente na produção animal, sendo consumido de forma indireta na alimentação humana na forma de proteína animal (ovos, carnes, leites e seus derivados). É o cereal mais produzido no mundo, segundo o Index Mundi a produção de milho na safra 2020/2021 foi de aproximadamente 1,683 bilhão de toneladas, sendo o Brasil o terceiro maior produtor mundial dessa cultura (INDEX MUNDI, 2021).

Esse cereal em específico sofre bastante com insetos da ordem dos lepidópteros, sobretudo com *Spodoptera frugiperda* (Smith) (Lepidoptera: Noctuidae), conhecida popularmente como lagarta-do-cartucho, que no seu estágio larval é considerada a principal praga do milho, ocasionando grandes perdas na produtividade, devido ao seu hábito alimentar que provoca injúrias nas folhas da planta. Além de danificar folhas, hastes, vagens e grãos, ela é capaz de cortar uma plântula rente ao solo como uma lagarta cortadora de plântulas e assim, comprometer o estabelecimento da cultura (ARAÚJO et al., 2021). Essa lagarta pode causar prejuízos de 17 a 38,7% na produção, levando em conta fatores como o ambiente, a cultivar e o estágio de desenvolvimento da planta (OLIVEIRA et al., 2018).

As injúrias causadas pelas lagartas da *S. Frugiperda* são constatadas devido a raspagens e furos identificados nas folhas mais jovens das plantas. Há também de um sintoma bastante característico chamado coração morto, onde a lagarta corta a gema apical da planta interrompendo seu ciclo e causando a morte da planta atacada, mas isso só ocorre em plantas jovens, antes do estágio V3 (RITCHIE; HANWAY; BENSON, 1993).

A produtividade do milho é afetada negativamente, em função do ataque de pragas, bem como pela ausência do cultivo da área de refúgio em plantios com cultivares híbridas resistentes, isso ocasiona a explosão populacional de pragas, intensificando os danos nas lavouras.

Para o controle da *S. frugiperda*, tem-se usado principalmente inseticidas químicos, porém em função do uso inadequado, com o passar do tempo foram sendo selecionadas populações resistentes a determinados ingredientes ativos (mecanismos de ação), ficando mais difícil o seu controle. Com o aumento da tecnologia no campo, principalmente na parte da genética, foi desenvolvida a transgenia em híbridos de milho, essa tecnologia é bastante

difundida no Brasil e no mundo, pois confere resistência ao milho ao ataque de lepidópteros. As cultivares que passaram por transgenia são conhecidas como transgênicas ou organismos geneticamente modificados (OGMs), nas quais foram introduzidos genes *Bt* (*Bacillus thuringiensis*), porém, isso tem ocasionado o surgimento de populações resistentes da praga, devido a alta pressão de seleção de biótipos resistentes em lavouras transgênicas, em função da ausência do cultivo de áreas de refúgio com milho convencional. Este fato tem minado a tecnologia *Bt*, com a qual se objetiva manter a praga sobre controle e reduzir o uso de inseticidas na lavoura de milho.

A verificação da presença de pragas nos cultivos agrícolas é tradicionalmente realizada em campo com investigação realizada *in situ* e são efetivas. No entanto, esse trabalho é considerado demorado, desgastante e despendioso, devido à mão-de-obra. Além disso, ao se constatar a ocorrência do inseto-praga em índices populacionais nível de controle, a intervenção é geralmente realizada em área total, com grande desperdício de insumos na aplicação para o controle das pragas, e do custo elevado para o controle da praga. Entretanto, com o avanço sistemático da tecnologia de sensoriamento remoto no campo pode-se determinar a intervenção localizada, direcionada aos pontos de ocorrência da praga, que ocorrem muitas vezes em reboleiras, evitando desperdício de insumos, menor poluição do ambiente, reduzindo a ação dos inseticidas sobre insetos não-alvos, menor degradação do solo e a contaminação de lençóis freáticos.

Assim, na busca por ferramentas para melhorar o monitoramento e a tomada de decisões para o manejo da lavoura, entre eles o controle de pragas, chegou-se ao uso de veículos aéreos não tripulados, conhecidos como VANTs ou drones ou aeronaves remotamente pilotadas (ARPs). As ARPs são exemplos de uma dessas ferramentas utilizadas para levantamentos em lavouras e são bastantes utilizados nas culturas da soja, milho, cafeeiro e cana-de-açúcar, podendo se difundir nas demais culturas, uma vez que com o apoio do drone é possível melhorar a produção da cultura e identificar injúrias que podem ser corrigidas a tempo (JORGE; INAMASU, 2014).

As ARPs são utilizados na agricultura de várias formas e uma dessas formas é a identificação de injúrias, por meio de imagens capturadas acima do dossel da cultura, essas imagens são capturadas por câmeras acopladas na aeronave em sua parte inferior, graças a essas câmeras é possível capturar imagens nas cores: vermelho, verde e azul (RGB) e também imagens em IVP (infra-vermelho-próximo), facilitando a identificação das injúrias com auxílio

de índices gerados por dados obtidos em campo e correlacionados aos espectros irradiados pela planta.

Nesse sentido, se torna importante aferir a avaliação feita *in situ* com avaliação das imagens do dossel da lavoura, buscando otimizar o uso de insumos fitossanitários, e para que as avaliações se tornem menos exaustivas e mais eficientes.

## **2. OBJETIVO**

O objetivo deste trabalho foi avaliar o potencial de imagens tomadas por ARPs (Aeronaves Remotamente Pilotadas) em discriminar distintos tratamentos inseticidas aplicados sobre o milho e estimar o índice de área foliar da cultura do milho em função de diferentes tipos de manejo e de danos causados pela *Spodoptera frugiperda*.

### **3. REVISÃO DE LITERATURA**

#### **3.1. Lagarta-do-cartucho**

A lagarta-do-cartucho (*S. Frugiperda*) atualmente é detectada desde a fase inicial da lavoura do milho, sendo mais evidente a partir dos estádios V3 e V4, portanto, é comum nessa época o início do controle fitossanitário utilizando inseticidas químicos, biológicos entre outros, evitando perda de área foliar e, conseqüentemente, evitando perda na produção de grãos. Na fase larval, a lagarta-do-cartucho (*Spodoptera frugiperda*) é uma das pragas mais importantes do milho, elas se alimentam de folhas novas (cartucho) das plantas, podendo causar perdas significativas na produção se não houver o controle imediato e adequado (AUGUSTO et al., 2020). Os danos podem variar de acordo com a fase em que a lagarta ataca a lavoura, sendo que a fase inicial de oito a dez folhas as plantas são mais suscetíveis (CAMPOS; BOIÇA JUNIOR, 2012).

A lagarta é mais prejudicial, que ataca tanto na fase vegetativa quanto na reprodutiva, gerando nível de dano econômico à cultura, tornando-se a pragachave, visto que no Brasil já gerou danos anuais de mais de 400 milhões de reais, atingindo uma redução de até 60% de produtividade, a depender da cultivar e da época do ataque (ROSA 2011; DOS SANTOS ).

Para Ota et al. (2011) um dos fatores preponderantes para determinar o nível de ataque da lagarta-do-cartucho é a constituição genética do híbrido de milho escolhido, no entanto, com o passar do tempo o uso de híbridos de milho OGMs vem sendo questionado, devido à perda da resistência e ao elevado custo de produção, devido a necessidade de intervenções com inseticidas químicos, os quais deveriam ser reduzidos da tecnologia OGM.

#### **3.2. Uso de aeronaves remotamente pilotadas na agricultura**

As ARPs têm sido utilizados como um meio de monitorar a ocorrência de pragas em grandes culturas, como áreas de lavouras anuais e perenes. Tem sido cada vez mais constante o uso de ARPs na agricultura, uma vez que os preços para o emprego da tecnologia estão cada vez mais acessíveis e os sensores embarcados nas aeronaves também estão cada vez mais apurados e com maior precisão.

O uso de ARPs na agricultura tem focado em sensores baseados na espectroscopia de

reflectância, ou seja, em medidas da reflexão da radiação eletromagnética após a interação com diferentes superfícies de diferentes comprimentos de ondas, do chamado espectro refletido, mais especificamente na área do visível. Como indicadores de estresses, os sensores se dividem entre sensores que detectam a transpiração e a redução da absorção de CO<sub>2</sub> na planta ou na redução da fotossíntese, por meio de parâmetros associados às imagens do dossel da lavoura, como o índice de vegetação (JORGE; INAMASU, 2014).

Um índice de vegetação é uma combinação aritmética entre duas ou mais bandas que evidencia algum componente de interesse, portanto, existem vários índices que é possível correlacionar com avaliações *in situ*, (JORGE; INAMASU 2014). As imagens capturadas por ARPs estão sendo muito utilizadas para desenvolver índices que são associados a diversas propriedades fisiológicas da vegetação (vigor, senescência, estresse hídrico). Um dos índices mais conhecidos é o normalized difference vegetation index (NDVI), criado a partir de aritméticas com as bandas near-infrared (NIR) e visível, ou red (R) ou green (G).

### **3.3. Sensoriamento remoto em campo**

Segundo Ventura et al. (2018) na agricultura, este novo mundo tecnológico é realizado através do uso de tecnologia sofisticada e de uma ideologia de maior competitividade. O geoprocessamento e o sensoriamento remoto ao serem associados e utilizados lado a lado podem tornar previsões para monitoramento agrícola, tendo como objetivo antecipar ou prorrogar um calendário agrícola de acordo com a situação.

Estudos de caso mostraram o potencial do uso de tecnologia de sensoriamento remoto na agricultura, como mapeamento e monitoramento de culturas (MASELLI; REMBOLD, 2001; DORAISWAMY et al., 2003; RUDORFF, 2005; ROCHA, 2006; ESQUERDO, 2007).

Por meio do uso de GPS's (Global Position Sistem) a agricultura de precisão visa diminuir erros utilizando novas estratégias e técnicas, com isso é possível elaborar projetos mais eficientes das variáveis que afetam a produção, conseqüentemente, variando o nível de tecnologia de cada uma das propriedades e assim estabelecendo um padrão (NASCIMENTO e ABREU, 2012).

Com a implantação do sensoriamento remoto facilitará as aplicações tecnológicas neste setor, como por exemplo, a necessidade de reduzir os custos de aplicação de adubos e produtos fitossanitários e principalmente diminuir o tamanho dos equipamentos utilizados (JORGE;

INAMASU, 2014).

Várias abordagens têm sido avaliadas para a detecção de doenças sintomáticas e assintomáticas de plantas a partir de dados obtidos por sensoriamento remoto em multiescala, ambos baseados em espectroscopia (ASHOURLOO et al., 2016; MARTINS; GALO, 2015) ou em imagem multiespectral e hiperespectral (MARTINS; GALO, 2014).

Os diferentes tipos de dados de sensoriamento remoto obtidos em multiescala para o monitoramento e mapeamento de culturas agrícolas infestadas por parasitas, encontram-se em fase de constante avanço. Isto ocorre devido à quantidade de dados obtidos por intermédio de plataformas terrestres, aeronaves e/ou plataformas orbitais, o que facilita o acesso a produtos radiométricos oriundos de fontes diversas (CANDIAGO et al., 2015).

Para Teixeira et al. (1997) o geoprocessamento é a tecnologia que abrange o conjunto de procedimentos de entrada, manipulação, armazenamento e análise de dados espacialmente referenciados. Já para definir sensoriamento NOVO (2010) definiu como sendo a tecnologia da utilização conjunta de sensores, equipamentos de processamento e transmissão de dados, aeronaves, espaçonaves, com o objetivo de estudar o ambiente terrestre por meio de registro e análise das interações eletromagnéticas com as substâncias componentes do planeta Terra, em suas mais diferentes manifestações.

### **3.4. Uso das imagens aéreas na agricultura**

O padrão espectral da vegetação apresenta uma série de padrões para identificar o estágio fisiológico e de saúde das plantas. Em comprimentos de onda na região visível do espectro eletromagnético (FÉRET et al., 2017).

De acordo com Resende et al (2020) nas imagens podemos enxergar a banda do visível, porém, algumas respostas como, por exemplo, a resposta de estresse nutricional e estruturas do dossel como folhas atacadas por pragas e doenças, são melhores detectadas pelo infravermelho próximo. Sensores dessa natureza são capturados geralmente por câmeras multiespectrais que trocam a banda do azul pela do infravermelho próximo, ou seja, assim as bandas são trocadas do azul, verde e vermelho, por verde, vermelho e infravermelho próximo, tendo com essa configuração a possibilidade de criar índices de vegetações que tornam possível avaliar partes do dossel de grandes lavouras.

### 3.5. Processamento digital da imagem

O processamento de imagens conhecido também como PDI (processamento de imagens digital), segundo Crósta (1993), é uma forma de extração de dados de imagens usando o sensoriamento remoto para uma futura observação ou avaliação. Existem três etapas que incluem a técnica do PDI são elas: pré-processamento, processamento e pós-processamento (BATISTA; ROSANGELA, 2011).

As técnicas de pré-processamento têm como objetivo corrigir as imperfeições das imagens. As técnicas de processamento consistem em melhorar a qualidade visual das imagens. O pós-processamento é a aferição da imagem, ou seja, uma operação de análise da imagem.

As imagens aéreas são de baixo custo e, portanto, mais acessíveis aos interessados em estudos mais detalhados de pequenas áreas. São fotografias coloridas, permitem visão tridimensional que facilitam a interpretação e o mapeamento necessário ao planejamento territorial, tanto no meio rural quanto no meio urbano. Para uma boa visualização dessas imagens é muito importante que seja feito o mosaico das várias fotos capturadas, para assim poder ser feito um planejamento e monitoramento das áreas de interesse, podendo-se diagnosticar crescimento de cidades ou mesmo áreas agricultáveis e também analisar recursos naturais (MARCHETTI, 1978).

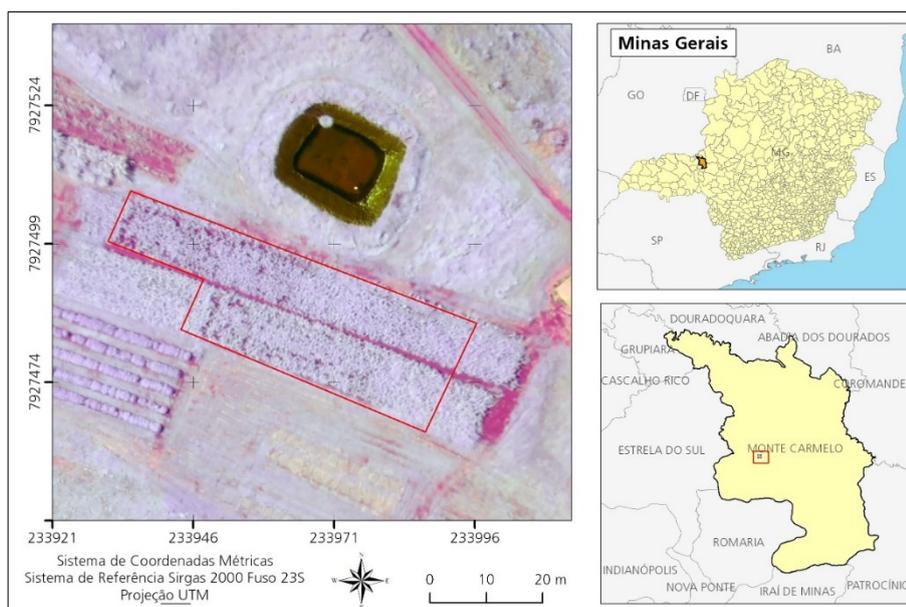
Conforme o método tradicional, imagens geradas da concatenação de fragmentos de várias imagens aéreas em papel, recortadas e sistematicamente coladas, com o propósito de formar uma imagem global da área fotografada. Tem-se estudado a confecção de mosaicos feitos a partir de imagens digitalizadas, sendo o método mais utilizado (ELMIRO, 1994).

A classificação de supervisionada de imagens é feita sob identificação de parâmetros de acordo com as respostas espectrais dos elementos supervisionados. Para Eastman (2006) é referido como classificação de digital de imagens a interpretação de imagens em sensoriamento remoto com o auxílio de um computador. O objetivo da classificação de imagens em sensoriamento remoto é identificar as feições na imagem, isto é, traduzir os diversos padrões de energia eletromagnética refletida em classes de cobertura terrestre (LILLESAND; IEFER, 1994).

## 4. MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1. Caracterização da área de estudo

O experimento foi instalado, no período da safra de 2018, na área experimental da Universidade Federal de Uberlândia, Campus Monte Carmelo. Na Figura 1, está representado o mapa de localização espacial da área de estudo, que pertence à região do Alto Paranaíba, Estado de Minas Gerais, 23k 0233937 UTM 7927503 e 23k 0233951 UTM 7927488, apresenta altitude aproximada de 908 m. A região destacada por vermelho na imagem indica o local onde foi realizado o experimento, sendo cada um dos blocos da plantação subdivididos para a aplicação de diversos tratamentos. O solo da área é caracterizado como LATOSSOLO Vermelho de textura argilosa (DOS SANTOS et al, 2018).



**Figura 1.** Área experimental na Universidade Federal de Uberlândia, Campus Monte Carmelo, MG. Fonte: Do autor.

### 4.2. Instalação e condução do experimento

O experimento foi estabelecido em delineamento em blocos com tratamentos casualizados, contendo dois híbridos de milho (um convencional SHS4080® da Santa Helena Sementes e um transgênico Fórmula Viptera® da Syngenta Seeds) e seis tratamentos

fitossanitários, descritos abaixo, com quatro repetições, totalizando 48 parcelas. Cada parcela tem dimensão de 6,0 x 2,0 m (12 m<sup>2</sup>), contendo quatro linhas de plantas, sendo a área útil composta pelas duas linhas centrais com dimensões de 5,0 x 1,0 (5 m<sup>2</sup>). A semeadura foi feita sob palhada no sistema de plantio direto com densidade populacional de 60.000 plantas por ha, sendo quatro linhas espaçadas em 0,50 m entre elas. Os híbridos de milho foram semeados em faixas separadas, em função do uso da semeadora tratorizada, sendo aplicados a cada um os tratamentos descritos abaixo.

Os tratamentos foram constituídos de: uma testemunha sem aplicação de inseticidas, três inseticidas químicos e dois inseticidas fisiológicos, aplicados no mesmo dia, sempre ao entardecer/anoitecer. Os produtos utilizados foram: T1 (testemunha) foi aplicado apenas água, T2- bifentrina 180 g L<sup>-1</sup>; zetacipermitrina 200 g L<sup>-1</sup> na dose de 200 mL ha<sup>-1</sup>, T3- tebufenozide 240g L<sup>-1</sup> na dose de 300 mL ha<sup>-1</sup>, T4- chlorfenapyr 240 g L<sup>-1</sup> na dose de 750 mL ha<sup>-1</sup>, T5- espinosade 480g L<sup>-1</sup> na dose de 100 mL ha<sup>-1</sup> e T6- lambda-cialotrina 250 g L<sup>-1</sup> na dose de 30 mL ha<sup>-1</sup>. Os tratamentos foram distribuídos conforme apresentado na Figura 2



**Figura 2.** Distribuição dos tratamentos na área experimental, H1) híbrido convencional e H2) híbrido transgênico. Fonte: Do autor.

Todos os produtos foram preparados em doses equivalentes para 200 L de calda por ha, como demonstrado na Figura 3, sendo a aplicação realizada com auxílio de um cilindro de CO<sub>2</sub> e uma barra com quatro pontas de pulverização, totalizando uma faixa de aplicação de 1,5 m de largura, de modo que as duas linhas centrais receberam os tratamentos em dose cheia.



**Figura 3.** A) Calda de cada produto a ser aplicado; B) Garrafas organizadas em caixa para transporte. Fonte: Do autor.

As aplicações foram feitas logo após a primeira avaliação em que foi observado o ataque da *S. frugiperda*, como raspagem e furos de acordo com a metodologia de avaliação da tabela Davis, descrita no Tabela 1 (DAVIS, 1989). Assim, o controle foi realizado ao se atribuir a nota 2 ou superior em qualquer uma das parcelas. A partir da primeira aplicação dos tratamentos fitossanitários, a escala de Davis foi utilizada para verificação da eficiência dos tratamentos. Para utilização da escala Davis, utilizou-se os critérios do que é uma pontuação, lesão circular, lesão alongada pequena < 1,5 cm, lesão alongada média de 1,5 cm a 3,0 cm, lesão alongada grande > 3,0 cm e furos. Neste caso, não foram considerados furos a partir de lesões velhas que perderam a película transparente.

**Tabela 1.** Escala de notas (0 a 9) utilizadas para avaliação de danos por ataque de *Spodoptera frugiperda* no cartucho do milho

Nota	Descrição
0	Planta sem injúria
1	Nenhum dano ou até 3 lesões muito pequenas nas folhas do cartucho
2	Lesões muito pequenas e pequenas circulares na folha do cartucho
3	Pequenas lesões circulares e algumas pequenas lesões alongadas (formato de retângulo), lesões de até 1,3cm de comprimento nas folhas do cartucho.
4	De quatro a sete lesões alongadas pequenas ou médias de 1,3 a 2,5cm em algumas folhas do cartucho e folhas expandidas.
5	De quatro a sete lesões alongadas grandes maiores que 2,5cm de comprimento em algumas folhas do cartucho.
6	De quatro a sete lesões alongadas em várias folhas do cartucho e expandidas
7	Oito ou mais lesões alongadas de todos os tamanhos presentes em várias folhas do cartucho.
8	Oito ou mais lesões alongadas de todos os tamanhos presentes na maioria das folhas do cartucho
9	Cartucho e ou folhas expandidas totalmente destruídas

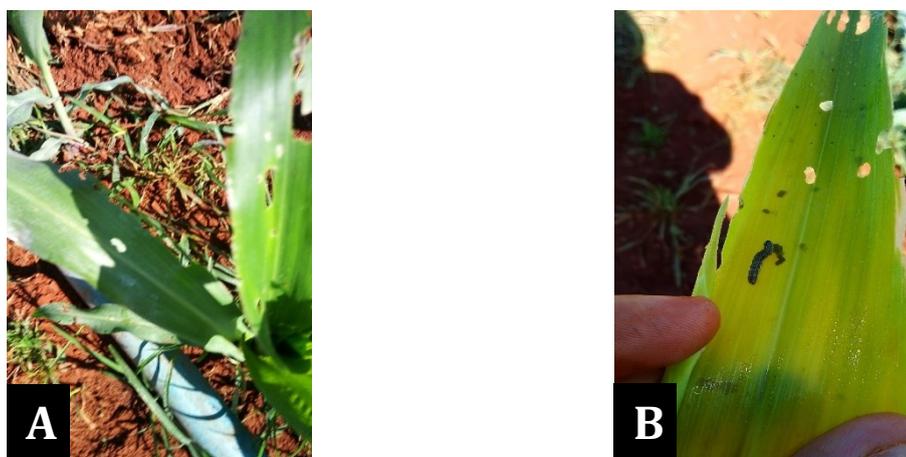
Fonte: Adaptada de Davis (1989).

Após a determinação da data da primeira aplicação dos tratamentos fitossanitários, as plantas (no estágio V4) foram monitoradas no 7º dia após a aplicação (DAA1), em seguida após a segunda aplicação o monitoramento aconteceu no 7º e 15º (DAA2), respectivamente nos estádios V5 e V8. O monitoramento consistiu da avaliação de cinco plantas por parcela, atribuindo a cada planta notas na escala de Davis, sendo utilizada para verificar severidade de ataque, sendo o resultado final a razão da somatória das notas pelo número de plantas avaliadas em cada parcela.

As coordenadas geográficas de cada planta avaliada foram georreferenciadas no mesmo dia em que foram feito os monitoramentos do ataque causado pela lagarta para a correlação das variáveis medidas *in situ* com os valores de reflectância da imagem obtida por drone DJI Phantom 4Pro acoplado com uma câmera Mappir 3, e em um segundo momento no mesmo dia os mesmos pontos que foram apuradas a ocorrência do ataque da lagarta foram úteis para a geração dos mapas de controle da praga.



**Figura 4.** A) Barra de pulverização com 6 bicos espaçados de 0,5 metros; B) Aplicação realizada com cilindro CO<sub>2</sub>. Fonte: Do autor.



**Figura 5.** A) Injúrias causadas por *S. Frugiperda*; B) *S. frugiperda* em fase jovem. Fonte: Do autor.

Durante o ciclo da cultura foram realizados todos os tratos culturais preconizados pelos órgãos oficiais de pesquisa de acordo com as necessidades da cultura, respeitando os estádios fenológicos (RITCHIE, HANWAY e BENSON, 1993) da mesma, considerando desde a semeadura até a maturidade fisiológica (R<sub>6</sub>) (EMBRAPA, 2012).

O índice de área foliar (IAF) foi mensurado logo após a constatação dos estádios V<sub>4</sub>, V<sub>10</sub> e V<sub>T</sub>, correspondentes aos mesmos estádios em que foram captadas imagens aéreas com o drone. Para tanto, foram avaliadas cinco plantas ao acaso em cada parcela, sendo mensurado o comprimento total e a largura do meio da folha, em centímetros, de todas as folhas de cada uma das plantas para obtenção da área foliar (AF). Para o cálculo da AF, foi empregada a equação 1 proposta por Francis (1969):

$$AF = 0,75 * \left( \frac{C}{100} * \frac{L}{100} \right) \dots\dots\dots(1)$$

Onde: AF: área foliar (m<sup>2</sup>); C: comprimento da folha (cm); L: largura da folha (cm).

Em seguida, o IAF será calculado a partir das medidas de AF, conforme a equação 2:

$$IAF = \left( \frac{AF}{e_1 * e_2} \right) \dots\dots\dots(2)$$

Onde: IAF: índice de área foliar; e<sub>1</sub>: espaçamento entre plantas (m); e<sub>2</sub>: espaçamento entre linhas de plantas (m).

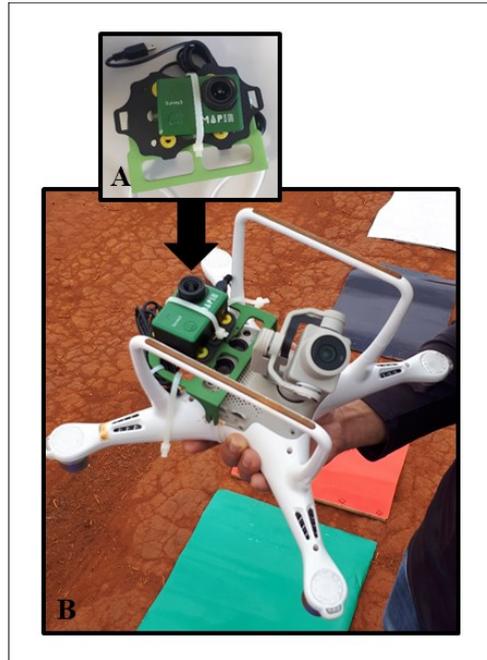


**Figura 6.** Avaliação de índice de área foliar *in situ* pelo método de Francis (1969). Fonte: Do autor.

#### **4.3. Captura e processamento das imagens aéreas**

Concomitante as medidas do IAF, as imagens multiespectrais contendo as bandas do intervalo espectral médio do verde (550 nm), vermelho (660 nm) e infravermelho próximo (850 nm).

A câmera foi instalada na posição nadir em um ARP, drone Phantom 4 Pro e, o voo foi realizado às 12 h com uma altitude de 165 m é uma configuração da resolução espacial das imagens em 12,5 cm. No momento da aquisição de imagens, foram instaladas na superfície próxima do talhão, placas de papel fotográfico nas cores: azul, verde, vermelho, branco e preto para a posterior calibração radiométricas das imagens adquiridas. Na Figura 3 é apresentado o sistema de aquisição de imagens: drone Phantom 4 Pro e Câmara MAPIR 3.



**Figura 7.** Drone Phantom 4 Pro e câmera MAPIR 3. A) Suporte com a câmera MAPIR 3; B) Câmera MAPIR 3 acoplada ao drone Phantom 4 Pro. Fonte: Agro Link.

O mosaico de imagens foi gerado no software *Pixel4D*. Na etapa de fototriangulação, não foram utilizados pontos de apoio materializados no terreno, para formação do mosaico, apenas utilizou-se as coordenadas geográficas do centro perspectivo das imagens e os ângulos de orientação exterior proveniente de um sistema inercial embarcado na própria câmera MAPIR 3. A calibração radiométrica do mosaico foi realizada de forma automática com o software *Mapir Camera Control*.

Através do mosaico das imagens da ARP, foi determinada qual banda possuía maior correlação com o IAF calculado em campo, para que a partir disso fosse estabelecida a regressão linear, a fim de gerar uma equação que modelasse o IAF das imagens aerofotogramétricas (equação 3). Para extrair os valores de reflectância da imagem, foi gerado um arquivo *shapefile* através das coordenadas mensuradas em campo, de 125 plantas, que foram selecionadas de forma aleatória. Dessa forma, foi possível garantir a correlação do IAF de cada planta com seu respectivo valor espectral.



**Figura 8.** Mosaico de imagens com as bandas IVP da área experimental. Fonte: Do autor.

$$IAF = \frac{IVP * 69}{-7369} + \dots (3)$$

Onde: IAF: índice de área foliar; IVP: Valores de reflectância do infravermelho próximo.

Para testar a validade da equação, assim como sua acurácia, foi selecionada uma amostra aleatória de 25 elementos para calcular o RMS (*Root Medium Square*), através da equação 4.

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^j \frac{(x_o - x_i)^2}{n}} \dots (4)$$

Onde: RMSE = Erro médio quadrático;  $x_o$  o valor de referência;  $x_i$  o valor calculado e n o número de elementos.

#### 4.4. Análise de indicadores do potencial das imagens na identificação de distintos tratamentos

Para analisar o potencial das imagens em discriminar os distintos tipos de tratamento

inseticidas para os diferentes híbridos de milho em função da radiometria do dossel do experimento, a partir de uma amostra de 2000 pontos representativos para cada um dos tratamentos, foram gerados gráficos de distribuição de frequência, análise de agrupamentos, cálculo da média e desvio padrão.

Na análise de agrupamento, foram gerados os possíveis *clusters* considerando um nível de similaridade de 68%, os quais geraram dendogramas de similaridade. Ao final da análise estatística, foi gerado um mapa de distribuição de classes de informação, no qual cada classe referiu-se aos 12 tratamentos inseticidas aplicados sobre o experimento. Para geração do mapa, foi aplicada a classificação supervisionada do tipo Máxima Verossimelhança, considerando uma similaridade 99%.

A imagem foi classificada considerando-se como arquivo de classificação a associação das três bandas originais da câmara MAPIR 3 com o índice NDVI. O mesmo conjunto amostral de 2000 pontos utilizados nas análises estatísticas foi utilizado para o treinamento do algoritmo de classificação.

Ressalta-se que nesta etapa, os tratamentos estão codificados conforme: Tx\_y, onde T significa tratamento, x significa um identificador variável de 1 a 6, indicando o tipo de tratamento e y significa um identificador variável de 1 a 2, indicando os dois híbridos do milho: 1-convencional e 2- transgênico.

#### **4.5. Definição do modelo empírico de estimativa do índice de área foliar**

Para geração dos modelos empíricos, primeiramente, foram avaliadas a correlação *Pearson* entre o IAF e as bandas originais da câmara MAPIR 3.

O critério para escolha das bandas e dos índices de vegetação para composição dos modelos foi definido a partir dos canais que apresentaram uma significativa e maior correlação com o IAF. Deste modo, definiu-se como significativa à correlação superior a 50% e um nível de significância de 5%.

Os modelos predição foram definidos a partir de equações de regressão lineares simples entre valores radiométricos medidos na imagem e a concentração do IAF. Para tanto se considerou a radiância e o IAF de 180 amostras (definidas aleatoriamente) entre os 210 pontos de coletas contidos dentro da área de estudo.

A validação da precisão dos modelos de predição foi realizada estimando-se o IAF em

30 (definidos aleatoriamente) dos 210 pontos amostrados *in situ*. A partir dos dados de discrepância entre o IAF observado e estimado, foi calculado o erro médio quadrático (RMSE) da amostra. O RMSE e erro (RMSE (%)) foi calculado a partir do modelo da equação 5:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{med})^2}{n}} \dots\dots\dots(5)$$

Onde:  $x_i$  e  $x_{med}$  - valor estimado e medido *in situ* do TCT, respectivamente;  $n$  - número de amostras.

Além da análise da acurácia, a tendência do modelo gerado foi avaliada a partir de um teste de hipótese *t* de *Student*, onde as hipóteses formuladas foram:  $H_0$ : Tendência = 0 e  $H_1$ : Tendência  $\neq$  0. O teste *t* de *Student* foi calculado a partir da equação 6:

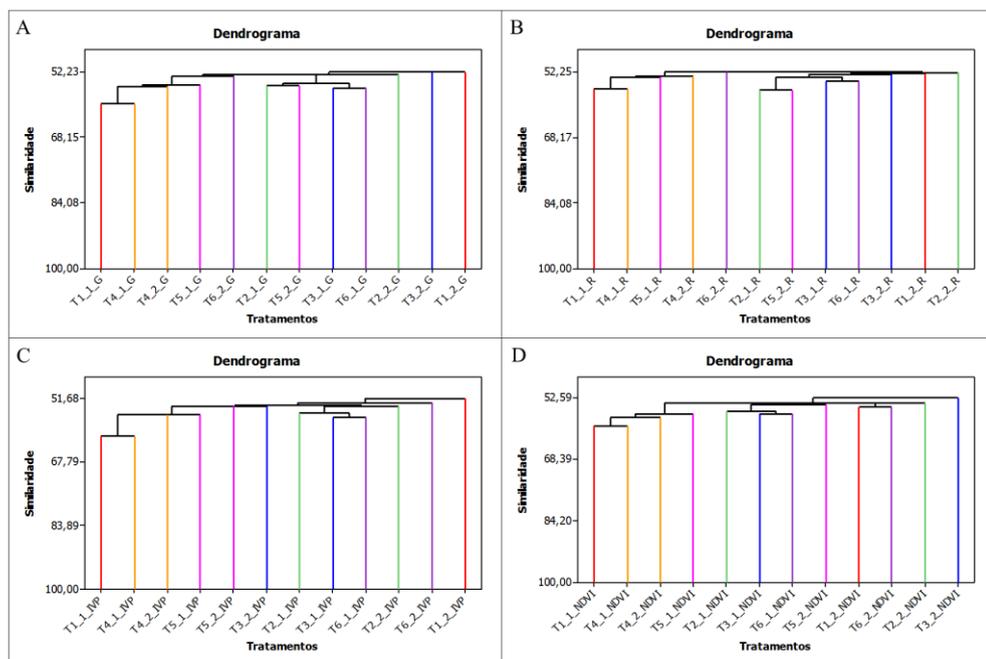
$$t = \frac{X_n - \mu}{\frac{S_n}{\sqrt{v}}} \dots\dots\dots(6)$$

Onde:  $t$  = valor crítico de  $t$  ao nível de 5% de significância;  $X_n$ : média populacional;  $\mu$  - referência;  $S_n$  - desvio padrão amostral;  $v$  - graus de liberdade.

Ao final, com o modelo empírico foi gerada uma carta contendo o mapeamento do IAF sobre os talhões milho. O mapa coroplético foi dividido em cinco classes em intervalos iguais, apresentando a magnitude do IAF em ordem crescente de cinco unidades de valores de medida. Deve-se ressaltar que dentre possíveis métodos de definição de classes de valores para a carta gerada, o método utilizado foi o fatiamento por intervalos iguais.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

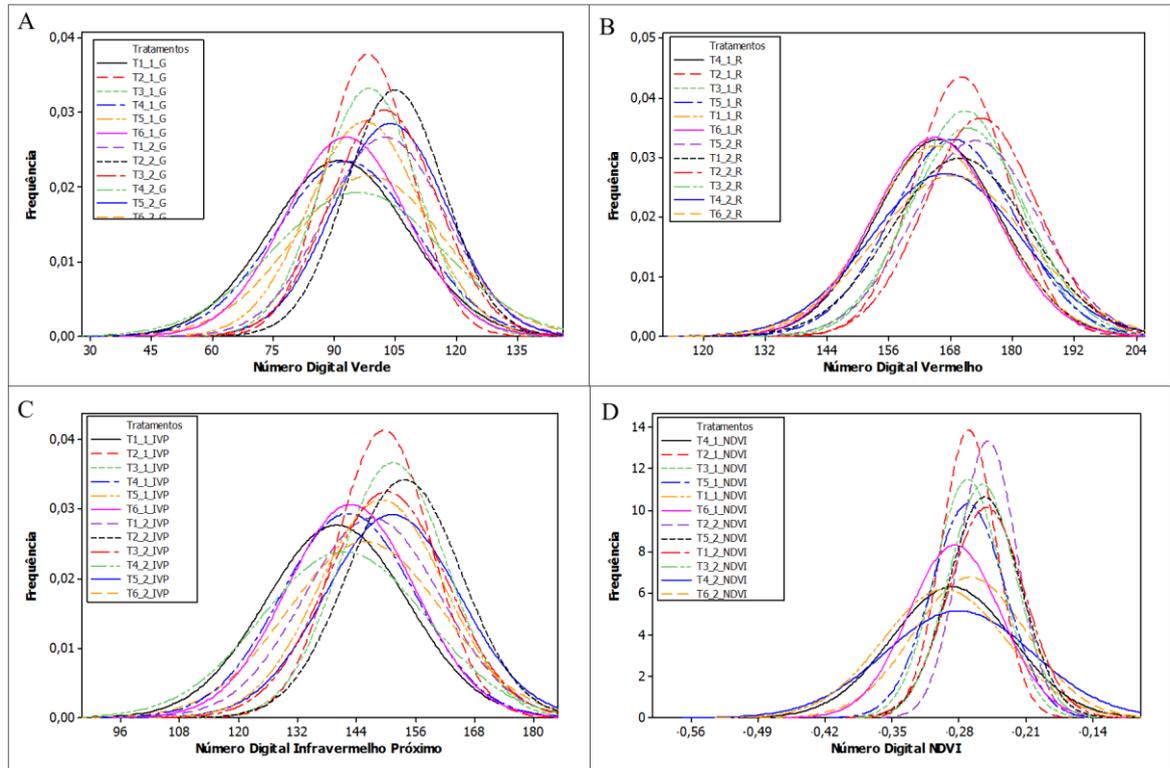
Os dendrogramas demonstrados na Figura 9 foram gerados a partir da análise de similaridade dos números digitais correspondentes aos distintos tratamentos inseticidas observados nas bandas do verde, vermelho, infravermelho próximo e o índice NDVI.



**Figura 9.** Dendrograma discriminando a similaridade entre os tratamentos para as bandas originais e os índices derivados. Fonte: Do autor.

Ao analisar os dendrogramas gerados observa-se em cada um a formação de 12 agrupamentos distintos, ou seja, a partir de todas as bandas e do índice NDVI é possível discriminar todos os tipos de tratamentos para os dois híbridos de milho, considerando valores inferiores um nível de similaridade de 1 sigma (68%).

Na Figura 10 observa-se a distribuição de frequência dos números digitais referentes às amostras de treinamento para cada tratamento.



**Figura 10.** Diagramas de frequência para cada um dos tratamentos. A) números digitais da banda do verde; B) números digitais da banda do vermelho; C) números digitais da banda do infravermelho próximo; e D) números digitais do índice NDVI. Fonte: Do Autor.

A partir da Figura 10 observa-se que para todas as amostras de treinamento, a distribuição de frequência para cada um dos tratamentos segue um padrão de normalidade. Esta condição permite que em processos de discriminação de tratamentos por imagem, possam ser aplicados classificadores supervisionados estatísticos, tais como o de máxima verossimilhança (MARTINS; GALO; VIEIRA, 2017). Porém, em processos desta natureza observa-se que para classes de informação deste estudo, não podem ser discriminadas com critério de semelhança inferior a 99%, uma vez que há pouca aderência entre as médias e a amplitude dos diferentes dados de treinamento para cada uma das bandas e índice de vegetação analisado.

Neste experimento, a proximidade do valor médio da resposta espectral para todas as amostras de treinamento pode ser justificada pelo fato de que o vigor vegetativo das distintas parcelas ter sido pouco atacado por *S. frugiperda*, ou seja, a cor das folhas e a taxa de fotossíntese das áreas atacadas pouco diferenciou das áreas saudas. Assim, para discriminar os tipos de tratamento, a partir da Figura 10 observa-se que uma única banda não é possível discriminar tais classes de informação, mas sim, a partir da associação das mesmas com o índice de vegetação NDVI.

Para uma análise mais pontual da resposta espectral dos distintos tratamentos, na Tabela 2 são apresentados os valores de média e desvio padrão do número digital das bandas e o índice NDVI para cada uma das classes de informação.

**Tabela 2.** Estatística descritiva de média e desvio padrão dos tratamentos. Colunas: 1 - Identificação do tratamento; 2 - Número digital na banda do verde (G); 3 - Número digital na banda do vermelho (R); 4 - Número digital na banda do infravermelho próximo (IVP); 5 - Número do índice de vegetação (NDVI)

Tratamentos	G	R	IVP	NDVI
<b>Híbrido 1 (convencional)</b>				
<b>T1 1</b>	165,05/0,280	91,176/0,379	139,91/0,322	0,29474/0,00144
<b>T2 1</b>	170,07/0,205	98,278/0,236	149,50/0,216	0,26940/0,00064
<b>T3 1</b>	170,73/0,236	98,584/0,268	151,38/0,243	0,27051/0,00077
<b>T4 1</b>	165,49/0,270	92,968/0,380	142,29/0,304	0,28714/0,00142
<b>T5 1</b>	168,45/0,270	97,557/0,310	149,07/0,285	0,27012/0,00086
<b>T6 1</b>	164,95/0,268	92,894/0,335	142,79/0,291	0,28411/0,00107
<b>Híbrido 2 (transgênico)</b>				
<b>T1 2</b>	169,86/0,298	102,54/0,334	147,17/ 0,311	0,25089/0,00088
<b>T2 2</b>	173,82/0,244	104,93/0,271	153,68/0,261	0,24935/0,00066
<b>T3 2</b>	171,24/0,255	102,26/0,295	150,12/0,275	0,25515/0,00079
<b>T4 2</b>	167,05/0,327	95,815/0,463	141,39/0,374	0,28002/0,0017
<b>T5 2</b>	172,84/0,272	103,78/0,313	151,21/0,306	0,25294/0,00083
<b>T6 2</b>	168,20/0,331	98,525/0,415	145,65/0,353	0,26801/0,00132

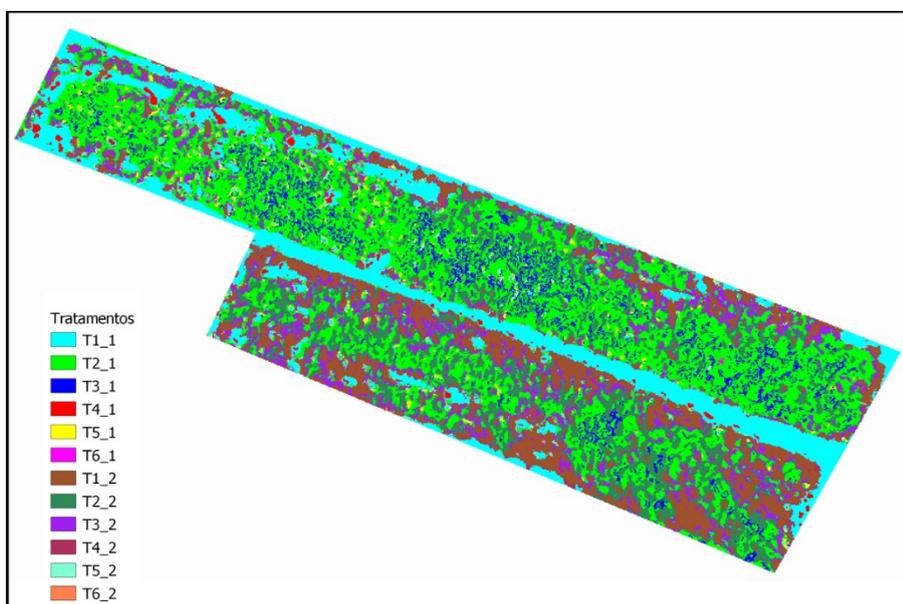
Na Tabela 2, observa-se que os maiores valores estão concentrados na banda do verde e não na banda do infravermelho próximo, onde há uma maior resposta e espalhamento da energia refletida em função do processo de fotossíntese (MARTINS; GALO, 2015). Esse comportamento deve-se ao fato da banda do infravermelho próximo estar centrada no início do intervalo de frequência da região termal, ou seja, 850 nm, região onde a energia refletida da vegetação, ainda não é máxima (MARTINS; GALO, 2017).

Outra possibilidade que justifica os valores da resposta na banda infravermelho próximo menor do que na banda vermelho, é o fato de que sensores termais de baixo custo, como ao utilizado nesta pesquisa, são originalmente câmaras convencionais e só são capazes de captar a energia refletida na região do termal, pois a banda do azul é substituída pela a do infravermelho próximo. Na maioria destes sensores, a banda do azul é a mais sensível à energia refletida na região do termal, assim esta técnica é possível a partir da aplicação de um filtro colocado sobre lente da câmera onde ocorre o bloqueio da leitura do comprimento de onda do azul, liberando apenas a captura de uma pequena magnitude de energia refletida na região do

infravermelho próximo (IMAI et al., 2017).

Em geral, observa-se que para as três bandas, os dados sinalizam baixa variabilidade em torno das médias, onde os valores de número digital foram maiores para os tratamentos aplicados para o híbrido 2 (transgênico) (Tabela 2). Outro ponto observado é em relação aos baixos valores do índice NDVI, os quais são em maioria menores para os tratamentos aplicados para o híbrido 2 (Tabela 2), esta condição pode estar associada à influência da resposta do solo em áreas com baixo IAF resultante da desfolha do milho causada pelo ataque da *S. frugiperda*.

A Figura 12 apresenta um mapa de distribuição de classes de tratamento gerado a partir da classificação supervisionada de máxima verossimilhança.



**Figura 12.** Mapa de distribuição de classes máxima verossimilhança dos tratamentos inseticidas. T1 (testemunha) foi aplicado apenas água, T2- bifentrina 180 g L<sup>-1</sup>; zetacipermitrina 200 g L<sup>-1</sup> na dose de 200 mL ha<sup>-1</sup>, T3- tebufenozide 240g L<sup>-1</sup> na dose de 300 mL ha<sup>-1</sup>, T4- chlorfenapyr 240 g L<sup>-1</sup> na dose de 750 mL ha<sup>-1</sup>, T5- espinosade 480g L<sup>-1</sup> na dose de 100 mL ha<sup>-1</sup> e T6- lambda-cialotrina 250 g L<sup>-1</sup> na dose de 30 mL ha<sup>-1</sup>, sendo que os números \_1 e \_2 na frente de cada tratamento representa os dois híbridos sendo \_1 híbrido convencional e \_2 híbrido resistente a lagarta. Fonte: Do autor.

No mapa da Figura 12 observa-se que as classes de informações foram mapeadas de forma não homogênea ao longo de todo o experimento, ou seja, não foi possível discriminar os distintos tratamentos inseticidas distribuídos espacialmente em parcelas retangulares de 12 m<sup>2</sup> (6 m x 2 m). Verifica-se que houve um predomínio das classes referentes aos tratamentos T2\_1 e T1\_2 e que a classe T1\_1 foi classificada em áreas onde havia alta resposta do solo exposto:

1- carreadores e 2-falhas causadas pelo ataque de *S. frugiperda*.

A Tabela 3 apresenta o valor da correlação de *Pearson* entre as bandas da câmera MAPPIR 3 e o IAF, na coluna 1, e respectivo P-valor na coluna 3.

**Tabela 3.** Coeficiente de correlação de *Pearson* e P-valor entre as bandas da imagem e o IAF

<b>Banda</b>	<b>IAF</b>	<b>P-valor</b>
<b>IVP</b>	0,550	0,001
<b>Verde</b>	0,545	0,001
<b>Vermelho</b>	0,516	0,003
<b>NDVI</b>	0,530	0,002

Todas as correlações obtidas foram significativas, ou seja, para todas as relações o P-valor foi inferior a 0,005 (Tabela 3). A radiância das bandas extraídas de pontos específicos mostrou melhores índices de correlação com a banda espectral do verde, 0,545, e maior correlação com a banda do infravermelho próximo, 0,550. A banda do vermelho apresentou a menor correlação com o IAF, 0,516.

De acordo com Novo (2010), Schlemmer et al. (2013) a maior correlação com o intervalo do infravermelho próximo é influenciada pela estrutura celular do mesófilo, no qual ocorre elevado espalhamento da radiação. Dessa forma, mudanças estruturais no tecido e na área foliar, devido a variações no suprimento e deficiência nutricional, a exemplo da disponibilidade de N podem ter efeito considerável na resposta nessa faixa. Segundo Oliveira (2019) as bandas do verde e do vermelho são altamente sensíveis a mudanças na concentração de clorofila, sendo o nitrogênio o principal elemento que induz essas alterações, assim espera-se que para esses intervalos, a correlação seja maior para medidas correlacionadas a clorofila.

Em estudo como de Tumlisian (2017), a partir de imagens capturadas por ARPs, também foi observada a possibilidade de correlacionar a banda do infravermelho próximo com o grau de dano causado por doenças no milho. Neste estudo, o autor ressalta a importância da banda no comprimento de onda no termal para detecção de injúrias foliares que ainda não estejam visíveis em situações de inspeções visuais de campo.

De fato, em diversas culturas, as bandas localizadas no intervalo do termal e os índices de vegetação contribuem para detecção de parâmetros e atributos agronômicos relacionados à presença de doenças (MARTINS; GALO; VIEIRA, 2017), porém deve-se ressaltar que a alta resolução espacial de bandas centradas nos intervalos do visível também contribuir no monitoramento de parâmetros físicos (IAF) de culturas com folhas grandes como a do milho

(RAEVA; ŠEDINA; DLESK, 2018).

A partir da relação entre a radiância da banda do infravermelho próximo e o IAF, o modelo de predição do IAF é descrito a partir da equação 7:

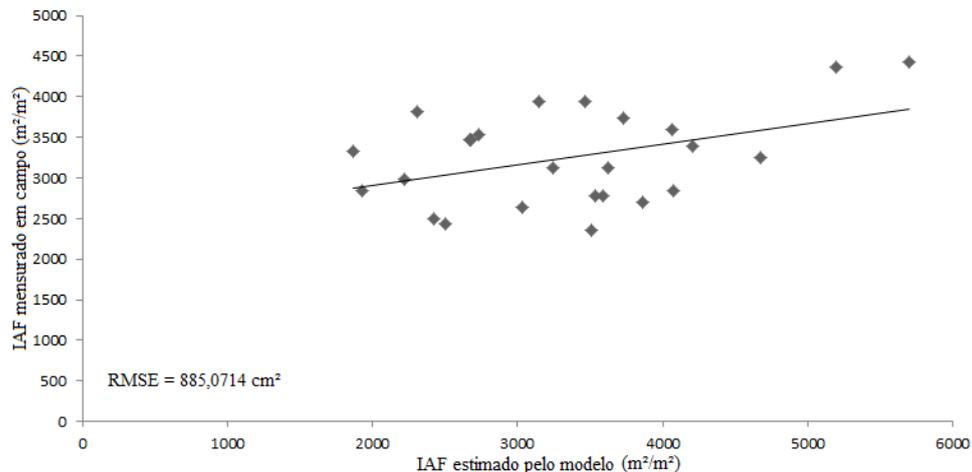
$$\text{IAF} = -7369 + \text{IVP} * 69 \dots \dots \dots (7)$$

Onde: IAF - índice de área foliar; IVP - valores de radiância do infravermelho próximo.

Dada a utilização de uma única variável para estimativa de IAF, a equação 5 apresentou um coeficiente determinístico relativamente baixo na ordem de 26,6%. Deve-se ressaltar que o uso de mais bandas ou a associação do índice NDVI poderiam resultar em um modelo de estimativa mais robusta por técnicas de regressão múltipla, porém dada a alta correção entre as bandas e o NDVI, a técnica de regressão múltipla torna-se inviável devido à colinearidade entre as variáveis preditoras.

Além disso, apesar da função resposta ter sido uma função linear, alguns pontos devem ser ressaltados, primeiramente, esta função só será válida para este estágio de desenvolvimento da cultura se encontrava (estádio V8), e para as condições de manejo em que a cultura fora submetida. Geralmente, na cultura do milho, o IAF é sensível a variações temporais, onde, esta variação pode ser descrita por uma função quadrática, havendo um decréscimo devido à senescência e queda das folhas logo após ser atingido um ponto de máximo durante a etapa de florescimento (FORNASIERI FILHO, 2007). As intensidades destas variações são reflexos da variabilidade temporal da partição de fotoassimilados que estão relacionados à temperatura, assumindo que os demais fatores de produção sejam constantes.

O gráfico de dispersão da Figura 13 apresenta o RMSE do modelo de estimativa da IAF.



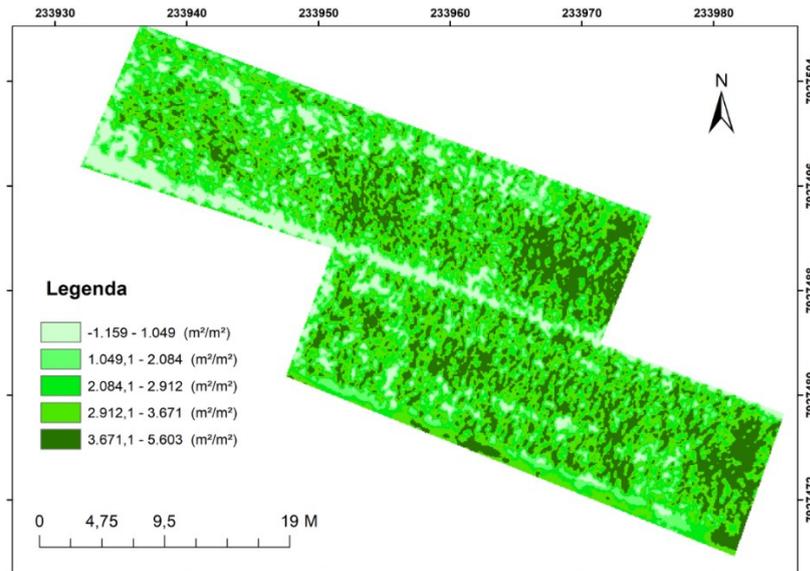
**Figura 13.** Dispersão do erro quadrático médio (RMSE) para os IAFs estimados e mensurados dos tratamentos. Fonte: Do autor.

O gráfico de RMSE da Figura 13 apresenta os pontos plotados referentes aos valores mensurados em campo de IAF, no eixo das ordenadas, e valores estimados de IAF pelo modelo, no eixo das abcissas. A reta do gráfico transcreve o comportamento das variações entre cada valor, calculado e mensurado em campo. O RMSE obtido foi de 885,0714 cm<sup>2</sup> para uma amostra de validação com o coeficiente determinístico de 25,1%. Nesta condição, este erro é equivalente a uma folha de 8 cm de largura por 100 cm de comprimento. Dessa forma, no que tange a aplicabilidade da fórmula, os resultados apresentaram valores satisfatórios, e condizentes com o determinado em campo, constatando a validade do modelo.

Segundo Ponzoni; Shimabukuro; Kuplich (2015), alguns modelos provenientes de sensores como o MODIS são concebidos para realizar estimativas de IAF na escala diária, enquanto outros simulam a partir da média de um período mais longo, como um estágio fenológico ou o ciclo da cultura. De uma maneira ou de outra, o conhecimento da ordem de grandeza do índice de área foliar é imprescindível para estimativa da produtividade da cultura de milho e, é natural que os modelos tenham um uma acurácia inferior a 50%.

Outro ponto que contribui para diminuir a acurácia dos modelos de estimativa de variáveis agrícolas é alta resolução espacial das imagens adquiridas por sensores desta natureza. Nesta perspectiva há uma dificuldade de se relacionar o pixel da imagem que representa com exatidão a posição exata da folha teve as variáveis agrícolas mensuradas em campo. Neste contexto, a imprecisão entre os receptores GNSS embarcados na ARP e utilizados nas medidas *in situ*, também, contribuem para inexatidão do modelo.

A figura 14 apresenta o mapa de distribuição espacial dos valores de IAF calculados.

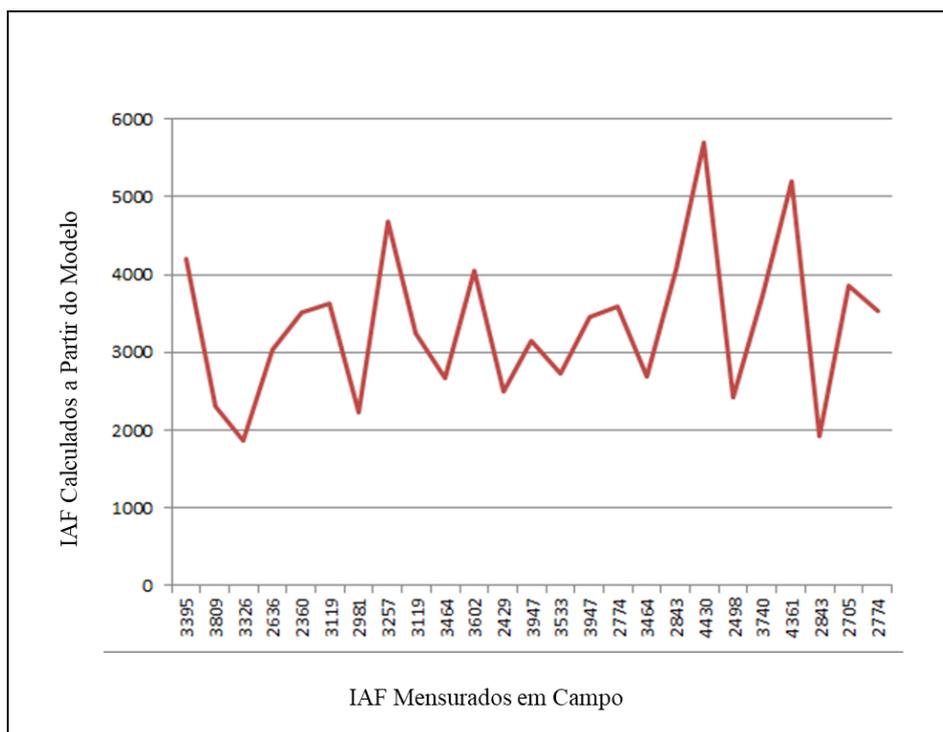


**Figura 14.** Mapa de IAF gerado através da equação de regressão linear em função do infravermelho próximo. Fonte: Do autor.

A partir da carta da Figura 14, observa-se que ao longo dos dois talhões há dispersão de diversos pontos com máxima concentração de IAF, sendo que a maior concentração se encontra à direita dos dois talhões. As regiões onde se evidenciam a menor concentração de IAF referem-se justamente as áreas onde foram encontrados focos *S frugiperda*. Em uma visão geral, a carta evidencia-se que a distribuição do IAF é abrupta e não contínua, a este fato pode-se associar os diferentes tipos de manejos aplicados as distintas parcelas.

Os valores negativos no mapa são referentes a “ruídos” na imagem, e não ao valor espectral das plantas. Para Danelichen et al. (2016) que estima o IAF através de imagens orbitais, esses ruídos são um dos fatores que provavelmente influenciam na diferença encontrada entre o cálculo do índice com dados mensurados em campo e em modelos.

O gráfico de RMSE (Figura 15) mostra a variação do erro ao longo das amostras. No gráfico, o eixo das abcissas é representado pelos valores calculados de IAF através do modelo, ao passo que o eixo das ordenadas é representado pelos valores originais de IAF, calculados através das amostras mensuradas em campo.



**Figura 15.** Variação do erro quadrático médio (RMSE) para os IAFs estimados e mensurados dos tratamentos. Fonte: Do autor.

Por meio do mapa gerado foi possível observar a perda do IAF, podendo também identificar os tratamentos e assim servindo como embasamento para tomadas de decisões.

O modelo gerado a partir da equação do IAF apresentou bons resultados, pois as plantas com injúrias apresentaram uma resposta espectral menor que as plantas saudáveis, o que interfere diretamente no valor de IAF calculado por este modelo, uma vez que este apresenta o IVP como variável, pois apresentou uma maior correlação sobre as demais bandas.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da análise de números digitais foi possível discriminar os tratamentos inseticidas aplicados sobre os dois híbridos do milho com um nível de significância de 68%, porém o mapa de distribuição espacial dos tratamentos evidenciou classes de informação dispostas de forma não equivalentes às parcelas de tratamento.

Por meio do mapa gerado foi possível observar a perda do IAF e identificar os tratamentos, embasando a tomadas de decisões. O modelo gerado a partir da equação do IAF apresentou resultados satisfatórios, pois as plantas com injúrias apresentaram resposta espectral menor que as plantas saudáveis, o que interferiu diretamente no valor de IAF calculado por este modelo, uma vez que este apresentou o infravermelho próximo como variável com maior correlação sobre as demais bandas.

O erro quadrático médio obtido foi de 885,0714 cm<sup>2</sup> para uma amostra de validação com o coeficiente determinístico de 25,1%. Nesta condição, este erro foi equivalente a uma folha de 8 cm de largura por 100 cm de comprimento. Dessa forma, no que tange a aplicabilidade da fórmula, os resultados apresentaram valores satisfatórios, e condizentes com o determinado em campo, constatando a validade do modelo.

Obteve-se correlação satisfatória entre o IAF e as imagens aerofotogramétricas. O método estabelecido foi eficiente para o monitoramento de injúrias de *S. frugiperda* em lavoura de milho. Como observado na tabela das correlações dentre todas as bandas testadas a de melhor correlação foi a do IVP.

## 7. REFERÊNCIAS

AGRO LINK. **Agricultura de Precisão**. 2020. Disponível em: <[https://www.agrolink.com.br/georreferenciamento/agricultura-de-precisao\\_361504.html](https://www.agrolink.com.br/georreferenciamento/agricultura-de-precisao_361504.html)> Acesso em: 17 de Ago. de 2020.

ARAÚJO, Waldenio Antonio et al. Danos de *Spodoptera frugiperda* (Smith, 1797)(Lepidoptera: Noctuidae) com hábito de Lagarta-Rosca em plântulas de soja (*Glycine max* (L.) Merrill) **Journal of Education, Science and Health**, 1 (1) : p. 42-48. Congresso Nacional de Entomologia online (I Conaent). 1, 2021-07-21/2021-07-24, (Brésil).

ASHOURLOO, D. et al. Developing an index for detection and identification of disease stages. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 13, n. 6, p. 851-855, 2016. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2016.2550529>

AUGUSTO, Ana Rafaela de Almeida et al. Uso De Diferentes Diluições De Extrato De Nim E Detergente Em No Controle Da Lagarta Do Cartucho Na Cultura Do Milho. In: **11ª JICE-JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E EXTENSÃO**. 2020.

BATISTA, José Luiz Oliveira; SANTOS, Rosangela Leal. A Geotecnologia Como Ferramenta Para O Mapeamento Do Uso E Ocupação Do Solo, Entre 2007 E 2008, No Município De Teofilândia (Ba). **GEOGRAFIA (Londrina)**, v. 20, n. 3, p. 095-108, 2011.

CAMPOS, A. P. de; BOIÇA JUNIOR, A. L. Lagartas de *Spodeptera frugiperda* (J. E. Smith) (Lepidóptera: Noctuidae) submetidas a diferentes concentrações de óleo de nim. **Revista de milho e sorgo**, v.11, n.2, p. 137-144, 2012. <https://doi.org/10.18512/1980-6477/rbms.v11n2p137-144>

CANDIAGO, S. et al. Evaluating multispectral images and vegetation indices for precision  
CHAVES, Bruno Edson. Aspectos anatômicos da raiz e lâmina foliar de *Saccharum* L.(POACEAE) nativas do Brasil. **Dissertação (mestrado)**—Universidade de Brasília, Instituto de Biología, Departamento de Botânica.2012.

CHISHOLM, L. A. Characterisation and evaluation of moisture stress in *Eucalyptus camaldulensis* using hyperspectral remote sensing. **University of New South Wales** (Australia). 1977.

CRÓSTA, A. P. Processamento Digital de Imagem de Sensoriamento Remoto. Campinas: **IG/UNICAMP**,1993. 123 p

CROSTA, Alvaro Pentead. **Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto**. UNICAMP/Instituto de Geociências, 1999.

CRUZ, I.; TURPIN, F. T. Yield impact of larval infestation of the fall armyworm *Spodoptera frugiperda* (Smith) to mid-whorl growth stage of com. **Journal of Economic Entomology**, v. 76, p. 1052-1, 1983. <https://doi.org/10.1093/jee/76.5.1052>

DANELICHEN, V.H.M. et al. Uso do sensoriamento remoto na estimativa do índice de área foliar em floresta tropical. **Ciência e Natura**, v. 38, n. 3, p. 1352-1360, 2016. <https://doi.org/10.5902/2179460X19917>

DAVIS, F. M.; WILLIAMS, W. P.; WISEMAN, B. R. Methods used to screen maize for and to determine mechanisms of resistance to the Southwestern corn borer and fall armyworm. In: **International Symposium on Methodologies for Developing Host Plant Resistance to Maize Insects. Mexico, DF (Mexico). 9-14 Mar 1987**. 1989.

DORAISWAMY, P.C. et al. Crop yield assessment from remote sensing. **Photogrammetric engineering & remote sensing**, v. 69, n. 6, p. 665-674, 2003. <https://doi.org/10.14358/PERS.69.6.665>

DOS SANTOS, Humberto Gonçalves et al. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, DF: Embrapa, 2018., 2018. <https://doi.org/10.21439/conexoes.v14i4.1471>

DOS SANTOS, Jailma Rodrigues et al. Influência dos métodos de controle da lagarta-do-cartucho sobre o desenvolvimento e produção de milho. **Conexões-Ciência e Tecnologia**, v. 14, n. 4, p. 31-38, 2020.

ELMIRO, M.A.T. Técnicas de processamento digital de imagens para aplicações no mapeamento por carta-imagem. **São José dos Campos: INPE**, 1994.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo, **Sistema de produção de milho**, 8ª. Ed., Versão eletrônica, EMBRAPA-CNPMS: Sete Lagoas, Out/2012, Disponível em: <[http://www.cnpms.embrapa.br/publicacoes/milho\\_8\\_ed/index.htm](http://www.cnpms.embrapa.br/publicacoes/milho_8_ed/index.htm)>. Acesso em 24 maio 2018.

ESQUERDO, J.C.D.M. Utilização de perfis multi-temporais do NDVI/AVHRR no acompanhamento da safra de soja no oeste do Paraná. Campinas, SP. 186p. **Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola)**. UNICAMP, 2007 farming applications from UAV images. **Remote sensing**, v. 7, n. 4, p. 4026-4047, 2015.

FÉRET, J.B. et al. PROSPECT-D: towards modeling leaf optical properties through a complete lifecycle. **Remote Sensing of Environment**, v. 193, p. 204-215, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.03.004>

FERNANDES, E. Monitoramento da cultura de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo por meio de imagens Spot Vegetation e dados meteorológicos. 2009. 115 p. 2009. **Tese de Doutorado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola)-Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

FORNASIERI FILHO, D. **Manual da cultura do milho**. Jaboticabal: FUNEP, 2007. 576p.

FRANCIS, C. A.; RUTGER, J. N.; PALMER, A. F. E. A rapid method for plant leaf area estimation in maize (*Zea mays* L.) 1. **Crop science**, v. 9, n. 5, p. 537-539, 1969. <https://doi.org/10.2135/cropsci1969.0011183X000900050005x>

IMAI, N. N. et al. Analysis of the radiometric response of orange tree crown in hyperspectral uav images. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences-ISPRS Archives**, p. 73-79, 2017. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-3-W3-73-2017>

INDEX MUNDI – Agriculture. **Corn Production by Country**: prevision for 2021. Disponível em:< <https://www.indexmundi.com/agriculture/?commodity=corn&graph=production>>. Acesso em: 10 ago. 2021.

JORGE, L.A.C.; INAMASU, Ricardo Y. Uso de veículos aéreos não tripulados (VANT) em agricultura de precisão. **Embrapa Instrumentação-Capítulo em livro científico (ALICE)**, 2014.

LILLESAND, T.; KIEFER, R.W. Remote Sensing and Image Interpretation. 3.ed. **New York**: John Wiley & Sons, 1994.

MARCHETTI, D.A.B. **Princípios de fotogrametria e fotointerpretação**. Nobel, 1978.

MARTINS, G.D.; GALO, M.L.B.T. Caracterização espectral da cana-de-açúcar infectada por nematoides e *Migdolus fryanus* por espectrorradiometria de campo. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 21, p. 783-796, 2015. <https://doi.org/10.1590/S1982-21702015000400046>

MARTINS, G.D.; GALO, M.L.B.T. Detecção de áreas infestadas por nematoides e *Migdolus fryanus* em cultura canavieira a partir de imagens multiespectrais Rapideye. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 66, n. 2, 2014.

MARTINS, G.D.; GALO, M.L.B.T.; VIEIRA, B.S. Detecting and mapping root-knot nematode infection in coffee crop using remote sensing measurements. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 10, n. 12, p. 5395-5403, 2017. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2017.2737618>

MASELLI, F.; REMBOLD, F. Analysis of GAC NDVI Data for Cropland Identification and Yield Forecasting in Mediterranean African Countries. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v.67, n.5, p.593-602, 2001.

NASCIMENTO, H.R.; ABREU, Y.V. Geração de informações sobre a agricultura de energia por meio das geotecnologias. **Interações (Campo Grande)**, v. 13, p. 181-189, 2012. <https://doi.org/10.1590/S1518-70122012000200005>

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. 4ª ed. São Paulo: Blucher, 2010.

OLIVEIRA, Ivenio Rubens et al. Associação dos controles biológico e químico para manejo da lagarta-do-cartucho na cultura do sorgo forrageiro. **Embrapa Milho e Sorgo-Comunicado Técnico (INFOTECA-E)**, 2018.

OLIVEIRA, Marcio Regys Rabelo de. Uso de sensoriamento remoto hiperespectral na caracterização da cultura do algodoeiro (*Gossypium hirsutum* L.) **Dissertação (mestrado)** – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias.2019.

OTA, É.C. et al. Desempenho de cultivares de milho em relação à lagarta-do-cartucho. **Bragantia**, v. 70, p. 850-859, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0006-87052011000400018>

PONZONI, Flávio Jorge; SHIMABUKURO, Yosio Edemir; KUPLICH, Tatiana Mora. **Sensoriamento remoto da vegetação** . Oficina de Textos, 2015.

RAEVA, PL.; ŠEDINA, J.; DLESK, A. Monitoring of crop fields using multispectral and thermal imagery from UAV. **European Journal of Remote Sensing**, v. 52, n. sup1, p. 192-201, 2019. <https://doi.org/10.1080/22797254.2018.1527661>

RESENDE, Denner Borges et al. Uso de imagens tomadas por aeronaves remotamente pilotadas para detecção da cultura do milho infestada por *Spodoptera frugiperda*. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 01, p. 156-166, 2020. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v13.1.p156-166>

RITCHIE, S.W.; HANWAY, J.J.; BENSON, G.O. How a corn plant develops. Special Report n. 48. Ames: **Iowa State University of Science and Technology**. Cooperative Extension Service, 1993.

ROCHA, J.V. Crop monitoring in South America (MERCOSUR + Bolivia). Bulletin no. 7/2006 (August, 2006). **Ispira**, Italy: JRC (Joint Research Centre), 2006.

RUDORFF, B.F.T. et al. Imagens de satélite no mapeamento e estimativa de área de cana-de-açúcar em São Paulo: ano-safra 2003/04. **Agricultura em São Paulo**, v.52, n.1, p.21-39, 2005.

SCHLEMMER A. M et al.. Remote estimation of nitrogen and chlorophyll contents in maize at leaf and canopy levels. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, vol. 25, p. 47-54, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2013.04.003>

TUMLISAN, G.Y. **Monitoring growth development and yield estimation of maize using very high-resolution UAV-images in Gronau, Germany**. 2017. Dissertação de Mestrado. University of Twente.

VENTURA, M.V.A. et al. Efeito de fungicidas em castanhas de caju comum e anão no sul de tocantins. **Anais da Semana Agronômica da Faculdade Evangélica de Goianésia**, v. 8, n. 2018, 2018.