

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA – CAMPUS MONTE
CARMELO
ENGENHARIA DE AGRIMENSURA E CARTOGRÁFICA**

SÉRGIO ASSUNÇÃO CRUVINEL JÚNIOR

**MONITORAMENTO DA CULTURA CAFEIEIRA A PARTIR DE IMAGENS DE
ALTA RESOLUÇÃO ESPACIAL**

MONTE CARMELO

2018

SÉRGIO ASSUNÇÃO CRUVINEL JÚNIOR

**MONITORAMENTO DA CULTURA CAFEIEIRA A PARTIR DE IMAGENS DE
ALTA RESOLUÇÃO ESPACIAL**

Trabalho apresentado como requisito para obtenção de aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 do Curso de Engenharia de Agrimensura e Cartográfica da Universidade Federal de Uberlândia.

Orientador: Prof. Dr. George Deroco Martins.

MONTE CARMELO

2018

RESUMO

O sensoriamento remoto é constituído principalmente por técnicas de processamento de imagens que tem por objetivo obter informações sobre alvos na superfície. Uma das principais utilizações deste está ligada ao monitoramento agrícola, com técnicas que possibilitam a identificação de anomalias em lavoura possibilitando o monitoramento da plantação, auxiliando na identificação e combate a pragas que destroem as plantas, no controle nutricional, na aplicação adequada de adubos e agrotóxicos além de várias outras utilidades. Sendo assim a utilização de imagens que atendam as necessidades do estudo são de grande importância, para fins de uma identificação precisa de elementos da área de interesse. Tendo em vista tais aspectos, o seguinte trabalho teve como objetivo avaliar o potencial da nova geração de nanossatélites de alta resolução espacial Planet em monitorar uma cultura ao longo do tempo. Para tanto observou-se a variabilidade espectral de talhões da cultura cafeeira ao longo de uma série mensal e anual de imagens e em um segundo momento, avaliou-se o potencial da imagem em estimar o teor de clorofila da cultura cafeeira. A partir das análises espectrais, observou-se que variabilidade espectral ocorre em função de variáveis ambientais e tem pouca influência em função da qualidade do sensor. Posteriormente, foi possível estimar o teor de clorofila a partir da banda do infravermelho próximo índice de vegetação NDVI, com uma precisão em torno de 90%.

Palavras chaves: Monitoramento agrícola; nanossatélites; variabilidade espectral; teor de clorofila.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Principais grãos de café produzidos no Brasil.....	12
Figura 2: Fluxograma do método de trabalho.....	16
Figura 3: Mapa de localização; A - Brasil; B - Minas Gerais; C - Monte Carmelo; D - área de estudo.....	18
Figura 4: Efeitos atmosféricos na radiação.....	22
Figura 5: Distribuição dos Pontos de Controle para Orientação das Imagens.....	24
Figura 6: Mapa para identificação da localização dos talhões de café.....	26
Figura 7: Gráficos de comportamento da reflectância para a série mensal.....	29
Figura 8: Gráficos de comportamento da reflectância para a série anual.....	30
Figura 9: Correlação teor de clorofila com cada banda.....	31
Figura 10: A - Mapa de concentração de clorofila baseado na banda do IVP; B - Mapa de concentração de clorofila baseado na banda do NDVI.....	34
Figura 11: Mapa da diferença de estimativas.....	35

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	7
2 OBJETIVOS.....	9
2.2 Objetivo Geral.....	9
2.2Objetivos Específicos.....	9
3 JUSTIFICATIVA.....	10
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	11
4.1 Nanossatélites.....	11
4.2 Características da Cultura Cafeeira.....	11
4.3 Parâmetro Agronômico.....	13
4.4 Sensoriamento Remoto da Vegetação.....	13
4.5 Índices de vegetação.....	14
4.6 Parâmetros Estatísticos.....	15
5 MATERIAIS E MÉTODOS.....	16
5.1 Materiais.....	16
5.2 Métodos.....	17
5.2.1 Definição da Área de Estudo.....	18
5.2.2 Aquisição das Imagens	19
5.2.3 Pré-processamento das Imagens.....	20
5.2.3.1 Recorte de imagens.....	21
5.2.3.2 Correção Atmosférica.....	21
5.2.3.3 Correção Geométrica.....	23
5.2.3.4 Normalização.....	24
5.2.4 Cálculo de Índice de Vegetação (NDVI)	25
5.2.4 Experimento 1: Análise da Variabilidade Espectral de Imagens Multiespectrais do Sensor Planet.....	25
5.2.6 Experimento 2: Correlação entre a Reflectância da Imagem Planet e o Teor de Clorofila Obtido pelo Clorofilômetro.....	27
5.2.6.1 Geração dos Mapas de Concentração.....	28
6 ANÁLISE E RESULTADOS.....	28
6.1 Análise de Variabilidade Espectral.....	28
6.2 Modelos Empíricos de Estimativa de Clorofila.....	31
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	36
REFERÊNCIAS.....	37
APÊNDICE A – VALORES MÉDIOS DE REFLECTÂNCIA.....	40
APÊNDICE B - PONTOS TEOR DE CLOROFILA SPAD E REFLECTÂNCIA DAS BANDAS.....	41

1 INTRODUÇÃO

Compreende-se por SR (sensoriamento remoto) o conjunto de procedimentos para a obtenção de informações de objetos da superfície terrestre sem que haja a necessidade de qualquer tipo de contato físico entre o objeto e o sensor (NOVO, 2010).

As técnicas de SR conhecidas tiveram início décadas atrás, onde começaram-se a usar esse tipo de equipamento para aplicações militares. Com o intuito de obter informações do território inimigo eram acopladas pequenas câmeras com disparadores automáticos ao peito de pombos-correio, estes eram soltos em locais estratégicos para sobrevoar o território inimigo (FIGUEIREDO, 2017).

Com o passar do tempo e o desenvolvimento de equipamento capazes de voar, os pombos então foram substituídos primeiramente por balões não tripulados presos por cabos que com câmeras acopladas a eles eram erguidos até uma altura que fosse possível adquirir imagens do território inimigo. Até que enfim, os aviões começaram a ser usados para esse propósito (FIGUEIREDO, 2017).

A partir da década de 1960 foram lançados os primeiros satélites ao espaço, esses satélites tinham como missão coletar informações meteorológicas. Lançado em 1960 pelos EUA o primeiro desses satélites foi o TIROS-1 (*Television IR Operational Satellite*) que embora com pouca nitidez em que sua resolução espacial possuía baixíssimo nível de detalhe, mas mesmo esse satélite utilizado para fins meteorológicos já estampavam em suas feições algumas pequenas informações da superfície terrestre (MENESES; ALMEIDA, 2012).

A partir do momento em que tiveram o conhecimento que era possível obter imagens da superfície terrestre através de satélites iniciaram então o desenvolvimento dos programas espaciais com intuito de produzir um equipamento capaz de captar imagens da superfície terrestre, visto que o uso de máquinas fotográficas tradicionais era inviável no espaço, pelo fato de que na época era necessário trocar o ‘filme’ destes equipamentos (MENESES; ALMEIDA, 2012).

Foram desenvolvidos posteriormente os sensores imageadores que forneciam imagens em formato digital, e em seguida esses sensores foram acoplados aos satélites e colocados em órbita (MENESES; ALMEIDA, 2012). O primeiro satélite de

sensoriamento remoto que embargava estes sensores foi o americano ERTS-1 posteriormente renomeado de LANDSAT 1, ele foi colocado em órbita em 1972 a uma altura de 919 km e fornecia imagens nas faixas do espectro do visível, infravermelho próximo e no termal (MENESES; ALMEIDA, 2012).

A partir do lançamento do LANDSAT 1 foram criados outros satélites com as mais diversas características e aplicações como é o caso de satélites como RapidEye, WorldView, CBERS, Planet, entre outros. Satélites como esses podem ser utilizados por exemplo: Para indicar possíveis problemas e colaborar na prevenção de desastres naturais como risco de queimadas, deslizamentos e enchentes; no estudo de bacias hidrográficas; estudos de urbanização; monitoramento agrícola; na análise de áreas florestadas ou desmatadas.

Das diversas aplicações, uma das principais está ligada ao monitoramento agrícola, com técnicas que possibilitam a identificação de anomalias em lavouras por meio da análise de séries de índices multiespectrais (NOVO, 2010). Tais produtos possibilitam o controle da plantação, auxiliando na identificação e combate a pragas que destroem as plantas (MARTINS, 2016), no controle nutricional (PAIVA, 2009), no controle do estresse hídrico que elas podem estar a sofrer (SCHIRMBECK; SCHIRMBECK; FONTANA, 2015), na aplicação adequada de produtos como adubos e agrotóxicos (ARAÚJO et al., 2009).

Da utilização do SR para o monitoramento agrícola pode-se citar uma série de novos sensores multiespectrais instalados em plataformas orbitais que incluem a aquisição de bandas espectrais específicas e apropriadas para monitorar atividades agrícolas. Sensores como RapidEye e o WorldView 2 e 3 dispõem de uma banda espectral no vermelho limítrofe, a qual é capaz de detectar variações sutis de clorofila nas folhas e fornecer informações sobre estrutura e a condição sanitária da vegetação, além de que índices derivados dessas bandas apresentam estimativas mais precisas que o NDVI tradicional (CHO et al. 2012).

Porém, uma das grandes dificuldades do monitoramento agrícola trata-se de conseguir imagens diárias com alta resolução espacial, uma vez que tais imagens representariam um grande ganho para a agricultura, visto que seria possível fazer um acompanhamento diário da sanidade da plantação (MARTINS, 2016). E mesmo com a existência de sensores orbitais direcionados a agricultura, a melhoria da resolução espacial das lentes orbitais e temporal dos satélites agrícolas ainda é um desafio (MARTINS, 2016).

Dada essa situação, com cerca de 150 nanossatélites em órbita a constelação Planet foi colocada em órbita em 2017 pela Planet Labs, com satélites com alta resolução espacial e resolução temporal de 1 dia (OLIVEIRA, 2017). Um dos alvos de venda das imagens é justamente o setor agrícola, uma vez que o principal portfólio da empresa justifica o uso das imagens para o monitoramento diário de lavouras (OLIVEIRA, 2017).

Porém, ainda há uma série de indagações quanto à qualidade e o verdadeiro potencial das imagens, uma vez que, todo o sistema, plataformas orbitais e sensor, pesam apenas 3 kg e possui baixa longevidade (3 meses).

Tendo em vista que o teor de clorofila presente na cultura cafeeira varia diariamente, esse estudo propõe responder à seguinte questão: As imagens produzidas pela constelação Planet que possuem um registro diário serão capazes de monitorar mudanças significativas quanto ao teor de clorofila da cultura? Levando em conta tal questão este estudo apresenta uma série de análises que visam verificar e apresentar o potencial e a viabilidade da utilização dessas imagens para o monitoramento de culturas.

2 OBJETIVOS

A seguir estão demonstrados os seguintes objetivos geral e específicos que este estudo procura responder.

2.1 Objetivo Geral

Avaliar o potencial de imagens da nova constelação de nanossatélites de alta resolução espacial Planet para práticas relacionadas ao monitoramento agrícola a partir da estimativa do parâmetro agrônômico (teor de clorofila) da cultura cafeeira.

2.2 Objetivos Específicos

- Avaliar a variabilidade do teor de clorofila de talhões cafeeiros a partir das bandas multiespectrais e índices de vegetação ao longo de uma série mensal e uma anual de imagens Planet.

- Avaliar o potencial individual das bandas originais e índices de vegetação em estimar o parâmetro agrônômico (teor de clorofila) da cultura cafeeira.
- Produzir mapas para estimativa do teor de clorofila a partir da resposta da reflectância das imagens.

3 JUSTIFICATIVA

Para realizar o monitoramento agrícola de uma cultura tomando por base imagens de satélite é essencial ter a ciência que este material utilizado possa realmente gerar resultados satisfatórios e confiáveis, desta maneira a execução de um estudo aprofundado é de fundamental importância para verificar a verdadeira qualidade destas imagens.

A utilização de imagens em que se possa garantir a obtenção de respostas satisfatórias possibilitando a redução de custos no setor agrícola, propiciado através de vantagens como a aplicação de insumos de forma diferenciada e específica levando em conta problemas presentes na cultura como estresse hídrico, infestações de parasitas, entre outros.

Com a constante renovação das plataformas de imageamento, no campo da agricultura, o uso de Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARPs) tornou-se cada vez mais recorrente, visto que estas possibilitam a tomada de dados com alta resolução espacial e temporal. Neste contexto sabe-se que há grandes desafios em escala orbital quando o intuito é suprir, justamente, o intervalo temporal da retomada de dados de uma mesma área.

Neste sentido a constelação de nanossatélites Planet, surgiu justamente com este propósito, fornecer há um baixo custo produtos com alta resolução temporal e espacial, para atividade de monitoramento geológico e agrícola. Tendo em vista tais aspectos e o desconhecimento da real particularidade das imagens geradas a partir dos sensores embarcados em nanossatélites, esse estudo propõe-se a verificar a qualidade e viabilidade da utilização de imagens do conjunto de nanossatélites Planet para o monitoramento agrícola.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Nanossatélites

Os primeiros nanossatélites foram criados em 1999, como ferramenta educacional por Bob Twists e Jordi Puig-Suari, professores das universidades de Stanford e Politécnica da Califórnia, a partir de então eles só evoluíram e seu uso se expandiu destinando-se a diversas atividades (MORAES, 2018). Os nanossatélites são satélites artificiais bem pequenos mas também são bem eficientes e possuem tudo aquilo que os grandes satélites tem, uma de suas principais finalidades está ligada ao custo de produção, são bem baratos quando comparados aos grandes satélites (MORAES, 2018).

No que diz respeito a nanossatélites para aplicações em SR, tem-se hoje a nova constelação de nanossatélites Planet que produz imagens de alta qualidade com alta resolução espacial de 3m e com sua principal característica que é a produção de imagens com uma resolução temporal de 1 dia, as imagens produzidas por estes sensores ainda apresentam resolução espectral de 12 bits e fornece imagens nas bandas do RGB (vermelho, verde e azul) e do IVP (infravermelho próximo)(OLIVEIRA, 2017).

4.2 Características da Cultura Cafeeira

No Brasil a primeira muda de café foi cultivada no Pará, trazida por Francisco de Melo Palheta, em 1727, desde então essa cultura só se expandiu por todo território nacional se tornando o principal produto de exportação da economia brasileira durante o século XIX e o início do século XX, e ainda é um dos principais produtos cultivados e consumidos no país (SANTOS, 2018).

A cultura cafeeira trouxe grande desenvolvimento para o país, para o escoamento da produção ferrovias e rodovias foram construídas para substituir o transporte animal e impulsionar o comércio, além de possibilitar o surgimento de cidades, a dinamização e industrialização de importantes centros urbanos, hoje o país é o primeiro produtor e o segundo consumidor mundial do produto (SANTOS, 2018).

Os principais produtores do grão são os Estados de São Paulo, Minas Gerais, Paraná, Espírito Santo, Bahia e Rondônia e dos vários tipos de café produzidos no Brasil destaca-se o café robusta e o arábica, suas principais diferenças estão ligadas ao aroma e gosto além do formato dos grãos como mostra a Figura 1, esse destaque deve-se ao fato de essas duas espécies serem mundialmente cultivadas e comercializadas (SANTOS, 2018).

Figura1: Principais grãos de café produzidos no Brasil.



Fonte: Cultivando (2018).

No Brasil o cultivo de café apresenta diferentes padrões de produção que podem ser caracterizados pela localização de lavouras podendo estar situadas em diferentes tipos de relevo, seja ele plano ou inclinado, alto ou baixo; o espaçamento utilizado entre as plantas também varia de acordo com a quantidade de plantas por área podendo o plantio ser tradicional, adensado ou superadensado; em relação ao manejo existem lavouras do tipo sombreado, com proteção de quebra-ventos, irrigado por pivô central ou gotejamento e o cultivo sem irrigação (MOREIRA et al., 2008).

As diferentes características do sistema de produção do café culminado a fatores ligados ao sistema de cultivo, clima da região, tipo de solo, além do fato que as plantas estão sujeitas a ataque de pragas que podem agir tanto na parte de fora da planta quanto no sistema radicular da mesma, isso acaba resultando em um fator de stress na planta causando alterações como queda da produtividade e alterações na pigmentação das plantas.

A alteração da pigmentação das plantas pode ser observado de maneira científica através da mudança na concentração de clorofila nas folhas, essas alterações podem ocorrer tanto entre talhões quanto entre plantas cafeeiras, este fenômeno é conhecido

como a ‘bienalidade’, que trata da heterogeneidade da concentração de clorofila em uma mesma cultura (MATIELLO, 2018).

4.3 Parâmetros Agronômicos

Os parâmetros agronômicos são variáveis que atribuem características singulares da vegetação, tem o objetivo de auxiliar em análises quanto a sanidade da vegetação, alguns exemplos destes parâmetros são a biomassa da planta que se refere a quantidade de matéria orgânica na planta, o índice de área foliar que retrata a razão entre a área foliar do dossel por área de superfície e o teor de clorofila que é responsável pela conversão da radiação luminosa em forma de energia para a planta (MARTINS, 2016).

Dentre estes parâmetros destaca-se o teor de clorofila, pelo fato de este estar estreitamente ligado com a sanidade das plantas, o que afeta no processo fotossintético delas, ou seja, diferentemente de plantas que passam por algum tipo de estresse, plantas saudáveis apresentam um melhor processo fotossintético, conseqüentemente seu teor de clorofila vai apresentar uma maior consistência (MARTINS, 2016). Desta forma o teor de clorofila pode fornecer particularidades referentes a problemas de desordens nutricionais e deficiências nas plantas (MARTINS, 2016).

Uma das formas de se estimar o teor de clorofila das plantas é através do aparelho conhecido como clorofilômetro, este equipamento é capaz de executar de maneira rápida e de forma indireta leituras do teor de clorofila sem que haja a necessidade de danificar a as folhas da cultura (BOECHAT, 2012).

4.4 Sensoriamento Remoto da Vegetação

O estudo da vegetação por SR está ligado a fatores como o ambiente em que se encontram as plantas, a época do ano, às condições de iluminação e disponibilidade hídrica e os tipos e parâmetros das imagens utilizadas (NOVO, 2010). É necessário se conhecer ainda o processo de fotossíntese que trata-se da absorção da radiação eletromagnética pela vegetação por meio de pigmentos fotossintetizantes como as clorofilas, xantofilas e carotenos, tendo em vista ainda que este processo ocorre no

espectro do visível que varia de 400 nm à 720 nm (PONZONI; SHIMABUKURO; KUPLICH, 2012).

Existem ainda variações de estruturas de folhas entre espécies diferentes e até mesmo entre folhas de uma mesma espécie, que se desenvolvem em condições ambientais diferenciadas, a folha em si pode ser considerada como um meio pelo qual a radiação eletromagnética passa, e fatores como o comprimento de onda da radiação, alguns componentes do meio, bem como a fisiologia da planta, vão exercer influência no processo de interação entre a radiação e a vegetação (PONZONI; SHIMABUKURO; KUPLICH, 2012).

É preciso considerar também, variações nas propriedades espectrais das plantas que podem ser causadas por fatores ambientais ou patogênicos, como por exemplo o ataque de parasitas que pode gerar: modificação do conteúdo de pigmentação e causar variações de reflectância na região do visível; necrose que afeta a reflectância na região do IVP (PONZONI; SHIMABUKURO; KUPLICH, 2012).

O estudo de Ponzoni, Shimabukuro e Kuplich (2012) ainda indica que para um alto IAF (Índice de Área Foliar) do dossel da planta, que é a relação entre a densidade de folhas por área do terreno, espera-se que a reflectância seja baixa na região do visível e alta na região do IVP. Para uma melhor compreensão da reflectância da vegetação são utilizados índices de vegetação, estes são úteis para realçar alvos em uma imagem.

4.5 Índices de vegetação

Índices de vegetação são medidas radiométricas e adimensionais que representam a atividade da vegetação verde (RISSO, 2009). Estes índices tem o intuito de minimizar a variabilidade causada por fatores externos como solo, atmosfera e geometria de aquisição dos dados. Estudos ligados principalmente aos setores agrícolas e florestais tem buscado progresso na relação entre as características da vegetação com dados coletados remotamente (MARTINS, 2013).

Segundo Albuquerque (2013) os índices de vegetação foram criados com o intuito de avaliar os recursos naturais e monitorar a cobertura vegetal. São utilizados para caracterizar parâmetros biofísicos da vegetação, realçando o comportamento

espectral da vegetação a alvos na superfície terrestre, para se obter esses índices geralmente são usados dados das bandas do vermelho e do infravermelho por estas possuírem uma melhor resposta quanto à vegetação, realçando seu comportamento espectral (ALBUQUERQUE, 2013).

Na literatura são encontrados mais de 50 índices de vegetação, dos quais os dois utilizados com mais frequência são o EVI (Enhanced Vegetation Index) e o NDVI (Índice de Vegetação Diferença Normalizada) (SANTOS, 2015). Ainda de acordo com Santos (2015) os índices de vegetação têm sido utilizados de maneira efetiva em estudos para caracterizar e quantificar parâmetros biofísicos da vegetação como o IAF, a biomassa e o teor de clorofila.

No monitoramento agrícola índices como o NDVI propiciam um realce na área foliar da cultura possibilitando a análise e interpretação mais efetiva de parâmetros como teor de clorofila, tornando possível quantificar problemas e otimizar resultados (RISSO, 2009). Neste trabalho em especial foi utilizado o índice de vegetação NDVI que é obtido a partir de uma operação de bandas envolvendo a banda do vermelho e a banda do IVP, justamente por estas apresentarem uma melhor resposta quanto a reflectância da vegetação.

4.6 Parâmetros Estatísticos

Os parâmetros são medidas relacionadas a dados de toda uma população que tem por finalidade demonstrar a distribuição de um evento em forma ou função de probabilidade (MINITAB, 2018). Na estatística existem vários parâmetros que auxiliam no conhecimento de uma população, como exemplo tem-se os parâmetros de média, moda, mediana, desvio padrão, variância, e muitos outros (MINITAB, 2018). Para este trabalho em especial será dado um enfoque nos parâmetros de média e desvio padrão.

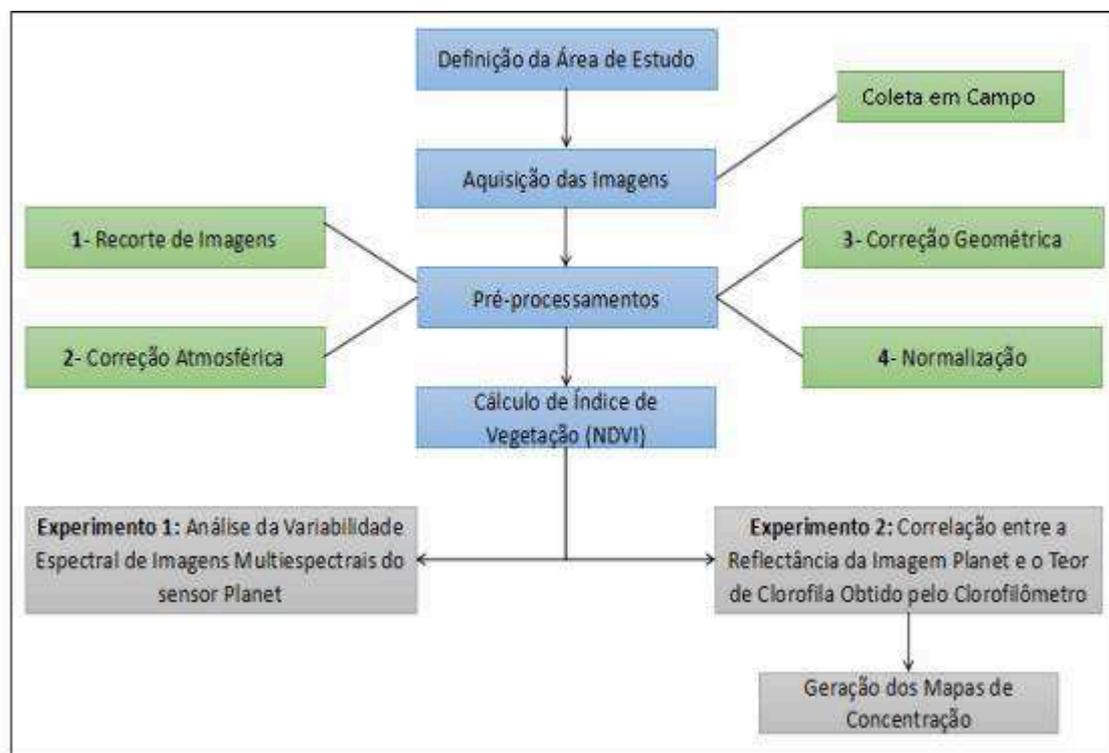
A média é uma medida estatística de tendência central obtida através da soma de um conjunto de dados dividida pela quantidade de dados, é utilizada como uma forma de se obter um resultado que mais se aproxima de todos os dados (MINITAB, 2018). O desvio padrão é uma medida de dispersão obtido através da raiz quadrada da soma ao quadrado das diferenças de cada dado pela média de todos os dados dividido pelo

número de amostras menos um, quanto maior for o desvio padrão mais dispersos os dados estão (MINITAB, 2018).

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste tópico serão apresentados os materiais que foram utilizados para a realização do trabalho, bem como a metodologia de execução que foi empregada e aplicada para gerar os resultados. A execução desse trabalho seguiu o fluxograma descrito na Figura 2.

Figura 2: Fluxograma do método de trabalho.



Fonte: O autor.

5.1 Materiais

Para a realização desse estudo foi utilizado os seguintes materiais:

- ✓ Uma série temporal de 18 imagens pertencentes a constelação Planet que contam com as características apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1: Características dos nanossatélites Planet.

Peso	Altitude	Imagens/ dia	Resoluções (espacial/ radiométrica/ temporal)	Bandas
3 kg	475 km	370 mil	3 m/12 bits/ 1 dia	Azul (455-515 nm), Verde (500-590nm), Vermelho (590-670 nm) IVP (780 - 860 nm)

Fonte: Oliveira (2017)

- ✓ O software ENVI na versão 5.1 para fins de pré-processamento e processamento das imagens;
- ✓ O clorofilômetro *SPAD - 502 plus* com precisão média de 1 unidade SPAD (para o valor entre 0,0 e 50,0 em temperatura/umidade normais), para determinação direta do teor de clorofila da planta;
- ✓ O software Excel 2016 para operações e geração de gráficos;
- ✓ O software Minitab para calculo das correlações e elaboração dos modelos de resposta;
- ✓ O software gratuito Qgis para confecção de mapas.

5.2 Métodos

Para o desenvolvimento deste trabalho foi realizada uma série de pré-processamentos para que as imagens fossem corrigidas e pudessem gerar resultados livres de erros advindos do processo de aquisição (MARTINS, 2016). A etapa de pré-processamento, genericamente foi definida pelas seguintes etapas: 1- Recorte da área de estudo; 2- Correção atmosférica; 3- Correção geométrica; 4- Normalização radiométrica. Além do pré-processamento, também foi gerado um índice de vegetação para auxiliar nas análises.

O método proposto contemplou duas linhas de trabalho: A primeira etapa procurou apresentar modelos de variabilidade espectral gerados a partir de uma série temporal de bandas multiespectrais e índices de vegetação derivados do sensor Planet. Para tanto a análise temporal foi realizada a partir de um conjunto de dados referentes a um mês de tomadas de dados e outra referente a uma aquisição anual. Na segunda etapa

deste trabalho o método foi desenvolvido para analisar o potencial das imagens em estimar a concentração de clorofila do cafeeiro.

5.2.1 Definição da Área de Estudo

A área de estudo está localizada no município de Monte Carmelo – MG, trata-se de alguns talhões de café dispostos na “Fazenda Santa Juliana” cuja sede encontra-se nas coordenadas $18^{\circ}42'1.13''\text{S}$ e $47^{\circ}33'5.51''\text{O}$, ao lado da rodovia LMG-746 e próximo ao campus da UFU em Monte Carmelo. Por está disposta na região do cerrado mineiro com altitude em torno de 900 metros e com condições ideais como clima favorável e topografia adequada, a fazenda Santa Juliana se tornou destaque na produção de café e uma referência na região.

A área de estudo foi definida primordialmente por estar inserida no contexto local sendo a cultura cafeeira uma das principais atividades exercidas na região, a Figura 3 demonstra a localização da área de estudo.

Figura 3: Mapa de localização; A - Brasil; B - Minas Gerais; C - Monte Carmelo; D - área de estudo.



Fonte: O autor.

5.2.2 Aquisição das Imagens

Para as análises temporais foi feita a aquisição das imagens Planet, foram adquiridas um total de 18 imagens, as foram analisadas em dois intervalos de tempo distintos, um intervalo verificou e avaliou as imagens para um período mensal e outro para um período anual de tempo. Para a série mensal foram utilizadas 7 imagens e para a série anual foram utilizadas 13 imagens, as datas das imagens utilizadas estão apresentadas no Quadro 2.

Quadro 2: Datas das imagens utilizadas.

Série Mensal	Série Anual
16 de Abril de 2017	16 de Abril de 2017
03 de Junho de 2017	11 de Maio de 2017
04 de Junho de 2017	03 de Junho de 2017
06 de Junho de 2017	09 de Julho de 2017
09 de Junho de 2017	01 de Agosto de 2017
18 de Junho de 2017	08 de Novembro de 2017
20 de Junho de 2017	06 de Outubro de 2017
-----	13 de Novembro de 2017
-----	05 de Dezembro de 2017
-----	11 de Janeiro de 2018
-----	08 de Fevereiro de 2018
-----	06 de Março de 2018
-----	03 de Abril de 2018

Fonte: O autor.

A aquisição foi feita no site da Planet Labs, o qual obteve-se acesso gratuito pela universidade. Foram identificadas as imagens correspondentes a área de interesse e efetuou-se o *download*. Vale ressaltar que foram selecionadas imagens de dias em que a menor cobertura de nuvens possível, afim de amenizar efeitos atmosféricos causados pela cobertura de nuvens.

5.2.3 Pré-processamento das Imagens

As imagens originais adquiridas pelos satélites normalmente apresentam degradações advindas do processo de aquisição, antes da utilização desta imagem é preciso submetê-la a um tratamento preliminar que é o pré-processamento. Este tratamento tem o intuito de corrigir imperfeições adquiridas durante o processo de obtenção da imagem que podem ser ocasionadas devido a desajustes na calibração dos detectores, erros esporádicos na transmissão dos dados, influências atmosféricas, e distorções geométricas (FIGUEIREDO, 2017).

Ainda segundo Meneses e Almeida (2012) as técnicas de pré-processamento não visam alterar características da imagem, o objetivo real dessas técnicas é melhorar a qualidade das imagens. Conhecendo-se qual é a fonte de distorção, as correções dos diferentes tipos de erros que a imagem pode apresentar são modeladas de acordo com o tipo da estrutura dos erros que ela apresenta.

Para tanto foram realizadas as seguintes etapas: Recorte de imagens para a seleção apenas a área de interesse, reduzindo o tamanho da imagem e consequentemente a morosidade e o tempo das etapas posteriores de processamento.

A correção atmosférica, a qual foi executada com o intuito de corrigir erros causados por efeitos atmosféricos; a correção geométrica e a normalização, essas duas foram executadas pois neste trabalho as análises foram dadas sobre uma série temporal, ou seja, o intuito foi manter as imagens da série com a mesma orientação e intervalo de reflectância respectivamente, para assim possibilitar uma comparação entre as imagens.

5.2.3.1 Recorte de imagens

As imagens de satélites adquiridas dispõe de uma grande faixa imageada, então para evitar um grande esforço computacional essas imagens normalmente são recortadas,

esse recorte consiste em separar a área de interesse da imagem absoluta. O processo de recorte nada mais é do que a delimitação da área de interesse visando processos menos desgastantes na sequência do trabalho.

O recorte de imagens foi a primeira etapa de pré-processamento a ser executada, visto que a seguir seriam executados pré-processamentos como as correções atmosféricas e geométricas e a normalização. É importante ressaltar que quando as imagens são recortadas a uma reamostragem de pixels, degradando levemente a resolução nas bordas da imagem.

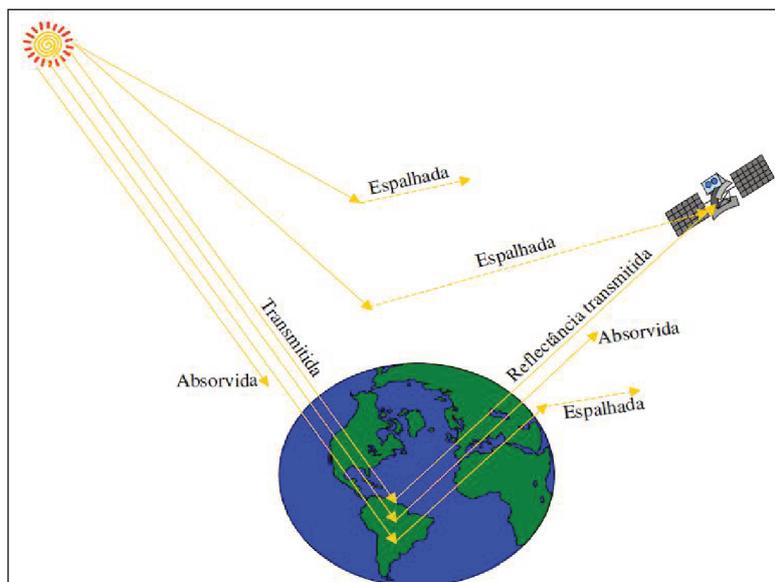
Esta etapa consistiu na identificação da área de interesse, assim selecionando dois pares de coordenadas conhecidas, um no superior esquerdo da área de interesse e outro no inferior direito, de forma que a área de interesse ficasse dentro de um retângulo envolvente feito a partir desses pares de coordenadas. Para a execução desse recorte foi utilizada a ferramenta *map - spatial subset* presente no *software* ENVI 5.1

5.2.3.2 Correção Atmosférica

Ao atingir a atmosfera a radiação eletromagnética (REM) passa por um processo de espalhamento e absorção desencadeada por gases e partículas suspensas, como mostra a Figura 4.

Esses efeitos causam danos como redução do contraste entre objetos de uma imagem, dificultando a distinção entre objetos que retratam pequena variação na intensidade. Para executar a correção atmosférica foi utilizado o módulo de correção FLAASH do *software* ENVI 5.1, com o intuito de eliminar erros provenientes do processo de aquisição das imagens causados basicamente pela absorção e espalhamento da radiação por partículas e gases suspensos na atmosfera.

Figura 4: Efeitos atmosféricos na radiação.



Fonte: Figueiredo (2017).

O FLAASH é uma ferramenta para a aplicação da correção atmosférica que incorpora o código de transferência de radiação MODTRAN4, este código minimiza efeitos de espalhamento e absorção na atmosfera corrigindo os comprimentos de onda nas regiões visíveis através do infravermelho próximo e de ondas curtas (ENVI, 2017).

O método utilizado para esta etapa de correção dependeu de informações específicas da própria imagem para determinar a contribuição da atmosfera em cada banda espectral. Especificamente, para a aplicação da correção atmosférica nas imagens Planet é necessário informar ao algoritmo alguns importantes parâmetros de execução. O Quadro 3 indica tais parâmetros com seus correspondentes valores, além de fornecer também a data e hora da aquisição de cada imagem a ser corrigida.

Quadro 3: Parâmetros para a correção atmosférica

Parâmetros	
Fator de Escala	100
Altitude do Sensor	475 km
Grau de Elevação	0,9 km

Fonte: O autor.

Estes parâmetros devem ser inseridos para que o FLAASH estabeleça um fator de correção designado de acordo com as informações fornecidas, a correção atmosférica

foi um processo totalmente automatizado a partir do fornecimento das características do sensor e da imagem.

5.2.3.3 Correção Geométrica

Alguns dos principais fatores que causam as distorções geométricas são o movimento de rotação e a curvatura da Terra, posicionamento do satélite e arrastamento da imagem durante um processo de varredura. Com a existência desses erros sistemáticos incorporados durante o processo de aquisição das imagens é necessário à realização da correção geométrica para a remoção de tais erros, além de ser de suma importância que uma imagem seja referenciada para que se possa interpretar a resposta para certa posição no espaço (D'ALGE, 2017).

De acordo com Novo (2010), as distorções panorâmicas são causadas por variações no tamanho dos *pixels* pelo fato do campo de visada do sensor ser constante ao longo da linha de varredura, então o aumento da distância do ponto nadir causa um incremento no tamanho do *pixel*.

Para a aplicação da correção geométrica na série temporal, foi necessário a escolha de uma imagem referência para que todas sigam a mesma orientação desta, para tanto foi selecionada a imagem de (16 de Abril de 2017) como referência. Para a orientação das demais imagens foram selecionados cinco pontos de controle em comum entre elas, pontos os quais se trata de vértices dos talhões de café por serem fáceis de se identificar em qualquer imagem da série.

Um exemplo da distribuição dos pontos de controle escolhidos pode ser observado na Figura 5. Através do *software* ENVI foram selecionados pontos homólogos nas imagens, para tanto foi utilizada a ferramenta (*Map Registration Select GPS: Image to Image*) do ENVI, ao selecionar os pontos nas imagens a ferramenta calcula um erro de posicionamento, então foram selecionados os pontos de maneira que o erro não excedendo 0,2 metros. Assim as imagens da série temporal são orientadas de acordo com a imagem referência.

Figura 5: Distribuição dos Pontos de Controle para Orientação das Imagens.



Fonte: O autor.

5.2.3.4 Normalização

O processo de normalização tem o intuito de se obter imagens homogêneas de acordo com uma imagem modelo, objetiva-se em adquirir um desempenho uniforme em termos de resposta espectral para objetos que não variam sua resposta de acordo com o passar do tempo (PONZONI; SHIMABUKURO; KUPLICH, 2012).

Nesta fase as imagens foram ajustadas de acordo com a imagem de referência (16 de Abril de 2017), este processamento foi executado em todas as bandas (bandas do azul, verde, vermelho e IVP) da imagem que se desejou normalizar, e repetido para todas as demais imagens. Foram utilizados pontos de controle, ou seja, *pixels* que tem sua resposta espectral invariante em relação ao tempo e que possam ser identificados nas imagens da série temporal.

De maneira geral o fator de reflectância (FR) desses pixels foram coletados manualmente, observando pontos mais escuros e mais claros nas bandas das imagens, estes valores então foram aplicados na equação 1 e processados na ferramenta *Enter an Expression* presente no *software* ENVI 5.1.

$$T_i = m_i * x_i + b_i \quad (1)$$

Onde:

- $m_i = (B_{ri} - D_{ri}) / (B_{si} - D_{si})$;
- $b_i = (D_{ri} * B_{si} - D_{si} * B_{ri}) / (B_{si} - D_{si})$;
- T_i = FR da imagem referência;
- x_i = FR da imagem a ser normalizada;
- B_{ri} = média do conjunto de referência clara;
- D_{ri} = média do conjunto de referência escura;
- B_{si} = média do conjunto claro a ser normalizado;
- D_{si} = média do conjunto escuro a ser normalizado;
- i = bandas do sensor em estudo.

5.2.4 Cálculo de Índice de Vegetação (NDVI)

Após a fase de pré-processamento a qual as imagens foram devidamente corrigidas, foi executado o cálculo do NDVI, este cálculo é produzido através de operações lineares entre as bandas originais do sensor Planet.

A operação para se obter o NDVI consistiu em aplicar nas imagens uma operação de bandas envolvendo as bandas do vermelho e do IVP, pelo fato de estas apresentarem melhor resposta quanto a vegetação, esta operação então foi processada na ferramenta *Enter an Expression* presente no *software* ENVI 5.1, a operação utilizada está descrita na equação 3.

$$(B_4 - B_3) / (B_4 + B_3) \quad (2)$$

Onde: B3 – Banda 3 (vermelho);

B4 – Banda 4 (infravermelho próximo).

5.2.5 Experimento 1: Análise da Variabilidade Espectral de Imagens Multiespectrais do Sensor Planet

Foi avaliada a variabilidade espectral da reflectância em função do tempo das bandas multiespectrais e índices de vegetação derivados, as etapas do experimento 1 foram assim definidas: 1- Definição das áreas testes (Talhões monitorados); 2- Cálculo de parâmetros estatísticos descritivos, média e desvio padrão; 3- Geração de gráficos de dispersão; 4- Geração de modelos de dispersão.

A área de estudo possui dois talhões de café que foram analisados separadamente e podem ser observados na Figura 6. Os valores de reflectância de cada talhão, banda e imagem foram obtidos através do *software* ENVI 5.1 com o auxílio da ferramenta *roi tool*, que possibilita a seleção de uma área de interesse (talhão de café) e fornece dados estatísticos dessa região, foram detectados os valores médios de reflectância fornecidos por esta ferramenta.

Figura 6: Mapa para identificação da localização dos talhões de café.



Fonte: O autor.

Os valores de reflectância obtidos foram então inseridos no *software* Excel 2016 de acordo com talhões, bandas e imagens adequadas, como é possível verificar no Apêndice A. Cada conjunto de dados foram produzidos a partir de modelos de regressão linear considerando o domínio tempo (X) e a resposta reflectância (Y), de acordo com os valores da reflectância em função do tempo foram calculados então de forma automática no Excel os parâmetros estatísticos de média e desvio padrão, bem como gerados os gráficos e os modelos de dispersão.

5.2.6 Experimento 2: Correlação entre a Reflectância da Imagem Planet e o Teor de Clorofila Obtido pelo Clorofilômetro

Para avaliar a qualidade das imagens Planet em estimar a clorofila foliar do cafeeiro foram desenvolvidas as seguintes etapas: 1- Análise da correlação entre a resposta de pixels das bandas multiespectrais e índices de vegetação derivados com a concentração de clorofila obtida diretamente em campo; 2-Geração dos modelos de estimativa a partir de Regressão Linear; 3- Análise da acurácia dos modelos.

Para esta etapa utilizando o clorofilômetro SPAD - 502 plus foram coletadas em locais georreferenciados cinquenta amostras do teor de clorofila, estas amostras estão dispostas no Apêndice B. Tendo em vista que as imagens Planet também são georreferenciadas, foi possível avaliar a correlação da resposta espectral das bandas da imagem com o teor de clorofila obtido em campo.

O cálculo da correlação foi desenvolvido a partir de quarenta pontos georreferenciados, os demais dez pontos foram reservados para fins de averiguação do modelo que foi estimado, o cálculo da correlação foi desenvolvido a partir da comparação do teor de clorofila obtido com a reflectância das bandas e índice das imagens. Estes valores foram então inseridos no *software* Minitab, através deste foi calculada a correlação entre o teor de clorofila e reflectância.

Ainda com o Minitab foram elaborados modelos a partir de uma regressão linear entre a resposta espectral (eixo X) e o valor de SPAD (eixo Y). Para a construção dos modelos considerou-se apenas as bandas que apresentaram a maior correlação ao valor de SPAD, pelo fato de estas estimarem com maior precisão o teor de clorofila.

Para avaliar a acurácia do modelo, considerou-se o valor de SPAD estimado e medido para os dez pontos restantes, essa relação foi avaliada a partir do cálculo EMQ (Erro Médio Quadrático) calculado através da equação 3. Esta equação foi capaz de indicar em porcentagem a precisão de cada modelo em estimar teor de clorofila a partir da reflectância.

$$EMQ = \sqrt{\frac{\sum (X_{estimado} - X_{medido})^2}{n \text{ (n}^\circ \text{ de amostras)}}} * \frac{100 * n}{\sum X_{medido}} \quad (3)$$

5.2.6.1 Geração dos Mapas de Concentração

A etapa final do trabalho foi a geração dos mapas de concentração de clorofila a partir da aplicação dos modelos de regressão obtidos da relação entre a resposta da reflectância e os valores de teor de clorofila do SPAD. A aplicação dos modelos foi realizada pela ferramenta *Enter an Expression* do ENVI, os mapas foram gerados a partir da aplicação dos modelos obtidos, de forma que o valor de reflectância das imagens foram convertidos para teor de clorofila.

Foi utilizada apenas a imagem de 16 de Abril de 2017 para a estimativa pois esta foi a imagem utilizada como base para a correção das demais, e este trabalho ainda segue uma linha que parte da premissa que os modelos estimados podem ser utilizados para estimar a concentração de clorofila em diferentes imagens do sensor.

6 ANÁLISE E RESULTADOS

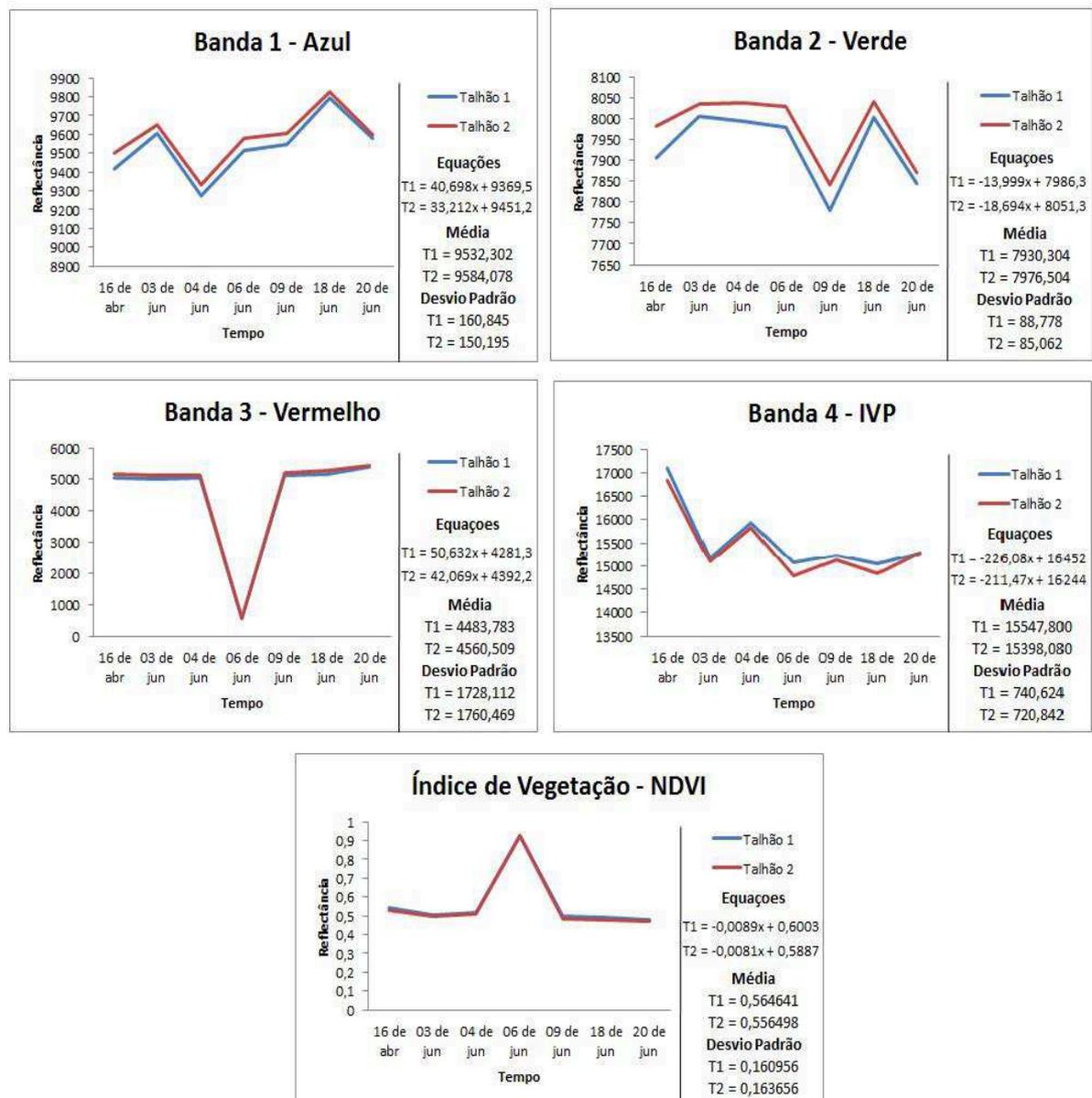
Seguindo a método proposto anteriormente obteve-se os resultados que estão apresentados e discutidos neste tópico. Os resultados estão divididos em duas partes: A primeira parte consiste em analisar a resposta espectral da vegetação, nas bandas originais e índice NDVI, para diferentes intervalos de tempo, já a segunda parte trata-se da aferição e aplicação de operações nessas imagens para estimar teor de clorofila.

6.1 Análise de Variabilidade Espectral

A análise da variabilidade espectral de imagens consegue fornecer diversas respostas quanto ao comportamento do objeto em estudo, trabalhos como os de (MARTINS, 2016) que utilizou de tal análise temporal para identificar sintomas de infestações de pragas no café, como (SOUZA, 2015) para o mapeamento da cafeicultura, como (BAYMA, 2015), para a identificação de desmatamento no cerrado, são um excelente exemplo de estudos que se beneficiaram da utilização de tal método de análise.

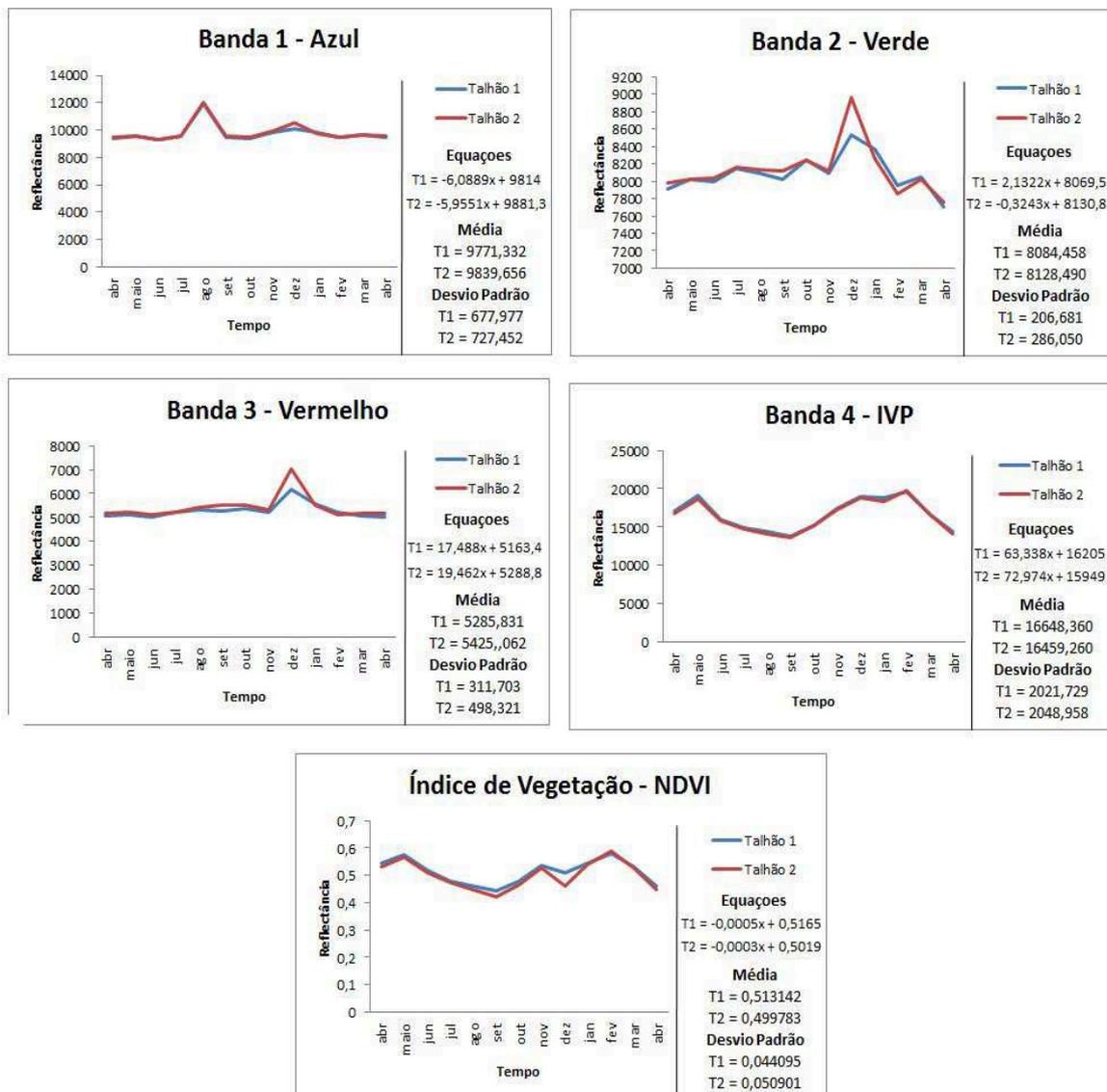
Considerando as séries mensal e anual em cada talhão de café estudado foram gerados gráficos (para cada banda original do sensor e para o índice NDVI) de reflectância da vegetação em função do tempo, ainda calcula-se seus respectivos parâmetros estatísticos (média e desvio padrão) e seus modelos lineares de resposta. A Figura 7 apresenta os resultados para análise da reflectância para a série mensal de imagens, enquanto a Figura 8 apresenta os resultados para análise da série anual de imagens.

Figura 7: Gráficos de comportamento da reflectância para a série mensal.



Fonte: O autor.

Figura 8: Gráficos de comportamento da reflectância para a série anual.



Fonte: O autor.

Analisando a variabilidade da série mensal as bandas 1 e 2 (azul e verde) apresentaram visualmente resultados mais variantes, na banda 3 (vermelho) se mostrou bem uniforme em relação ao tempo, exceto por um pico de reflectância que causou uma grande variação em uma data específica da banda, isto pode ser justificado por um erro sistemático e considerado portanto como um *outlier*, na banda 4 (IVP) apresentou um resultado uniforme e com baixas variações durante o tempo, no índice de vegetação NDVI assim como na banda 3 também apresentou um resultado uniforme porém o possível outlier da banda 3 causou outro pico de reflectância também no NDVI por este utilizar dados da banda 3.

Para a série anual todas as bandas conseguiram apresentar resultados próximos a um modelo linear que podem ser observados visualmente nos gráficos e também quando analisados seus padrões estatísticos, e mesmo com alguns picos de reflectância em datas bem específicas de cada banda, o resultado aponta que as imagens possuem um comportamento padrão ao longo do tempo.

Tanto a série mensal quanto a anual apresentaram uma resposta de reflectância constante em relação ao tempo, em especial quando analisadas em um maior período de tempo, ou seja, na série anual, as imagens demonstraram um comportamento mais uniforme. Quando observados os talhões de café separadamente também é possível notar que os dois possuem praticamente o mesmo comportamento quanto a reflectância das imagens, além do mais ao se observar os parâmetros estatísticos das séries observa-se que as imagens possuem baixas discrepâncias em razão do tempo.

6.2 Modelos Empíricos de Estimativa de Clorofila

Para a aferição das imagens foi utilizado o software Minitab, este possibilitou o cálculo das correlações entre os valores de clorofila com os valores de reflectância de cada banda e do índice de vegetação obtidos pelas imagens, as correlações estão indicadas na Figura 9 juntamente ao nível de significância de cada banda.

Figura 9: Correlação teor de clorofila com cada banda.

	Clorofila
Banda 1	-0,435 0,005
Banda 2	-0,461 0,003
Banda 3	-0,502 0,001
Banda 4	0,614 0,000
Banda 5	0,608 0,000

Fonte: O autor.

O cálculo da correlação indicou que as bandas que apresentam uma maior correlação com o teor de clorofila obtido pelo clorofilômetro são a banda 4 (IVP) e a banda 5 (NDVI) com correlação de 0,614 e 0,608 respectivamente, levando em consideração que quanto mais próximo de 1 ou -1 maior é a correlação. A banda 3 que apresentou correlação de 0,5 foi utilizada apenas indiretamente no NDVI, já as demais bandas apresentaram correlação menor que 0,5 e portanto foram desprezadas.

Para este trabalho foram utilizadas apenas as bandas com alta correlação pois estas fornecem uma estimativa mais adequada, em que se aproxima mais da realidade. Definido que serão utilizadas apenas as bandas do IVP e NDVI e ainda com o auxílio do Minitab a próxima etapa do trabalho foi gerar as equações de resposta do teor de clorofila em relação à reflectância das bandas, foi gerada duas equações, uma para cada banda.

As equações foram geradas a partir da relação do teor de clorofila obtido com o valor de reflectância das bandas, as Equações 4 e 5 explicitam ainda que para cada ponto em que se inserir o valor de reflectância do IVP e do NDVI respectivamente, estas devem retornar a estimativa de teor de clorofila no ponto.

Equação 4: Relação banda do IVP com o teor de clorofila.

$$\text{Clorofila} = - 28,6 + 0,00529 \cdot \text{IVP} \quad (4)$$

Equação 5: Relação banda do NDVI com o teor de clorofila.

$$\text{Clorofila} = 17,2 + 83,2 \cdot \text{NDVI} \quad (5)$$

Os modelos para estimativa do teor de clorofila apresentam de acordo com o Minitab um R^2 de 36% para a equação 1 e um R^2 de 35,3% para a equação 2, de modo geral isto indica que para a equação 1 o modelo consegue explicar 36% dos valores observados e para a equação 2 o modelo consegue explicar 35,3% dos valores observados.

Utilizando dos 10 pontos de checagem que constam com os valores do teor de clorofila obtidos diretamente em campo pelo clorofilômetro SPAD e calculado os valores do teor de clorofila pelos modelos através das Equações 4 e 5, obteve-se o

Quadro 4 com os valores do teor de clorofila obtido e estimados e com a diferença de cada modelo estimado em relação ao obtido..

Quadro 4: Pontos de checagem.

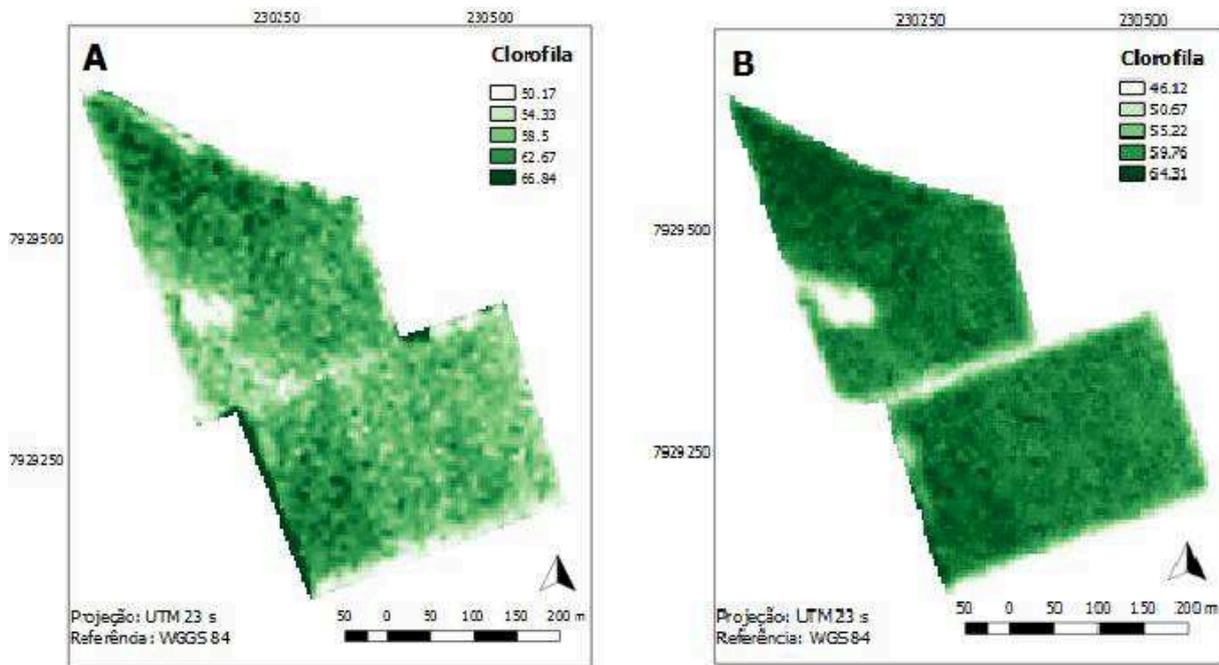
Pontos	Clorofila (SPAD)	Clorofila (IVP)	Clorofila (NDVI)	Diferença (SPAD - IVP)	Diferença (SPAD - NDVI)
7	61,4	61,63682	51,40352	-0,23682	9,99648
10	56,8	63,52535	58,61696	-6,72535	-1,81696
14	70,4	62,45148	62,8768	7,94852	7,5232
21	50,5	53,23101	50,064	-2,73101	0,436
29	62,8	62,02299	60,03968	0,77701	2,76032
30	58,4	57,43656	60,27264	0,96344	-1,87264
34	60,8	58,60565	61,27936	2,19435	-0,47936
38	64,5	60,30374	61,34592	4,19626	3,15408
42	50	58,70087	61,74528	-8,70087	-11,74528
49	55,6	63,7634	64,0832	-8,1634	-8,4832

Fonte: O autor

Pelo Quadro 4 nota-se que as equações de estimativa de clorofila produziram uma estimativa bem próxima ao teor de clorofila obtido pelo clorofilômetro, ao comparar esses dados observa-se que houve uma diferença relativamente baixa. Em outra perspectiva foi calculado o EMQ desses dados, o qual indicou que a primeira estimativa do IVP está errando em torno de 8,986% e a do NDVI está errando em torno de 10,580%. Este pequeno erro pode ser atribuído ao fato do clorofilômetro captar o teor de clorofila em um ponto específico (folha) e já as imagens levam em conta toda a estrutura da planta.

Tendo em vista as equações e levando em consideração a premissa de que estas respondem aos valores de reflectância de imagens de qualquer data foram gerados os mapas de concentração de clorofila baseados na imagem de referência (16 de Abril de 2017), os mapas de concentração de clorofila podem ser observados na Figura 10.

Figura 10: A - Mapa de concentração de clorofila baseado na banda do IVP; B - Mapa de concentração de clorofila baseado na banda do NDVI.



Fonte: O autor.

Esta técnica de estimativa já foi utilizada por outros autores, como é o caso de trabalhos como o de (MARTINS, 2016) que utilizou de tal técnica para estimar áreas de café infestadas por nematoides, em outro caso (JESUS; MIURA, 2009) utilizou de tal técnica para estimar índices de vegetação a partir de modelos obtidos por bandas originais do satélite Landsat5, e também (SANTOS et al., 2017) que estimou parâmetros florestais no cerrado a partir de imagens Landsat8.

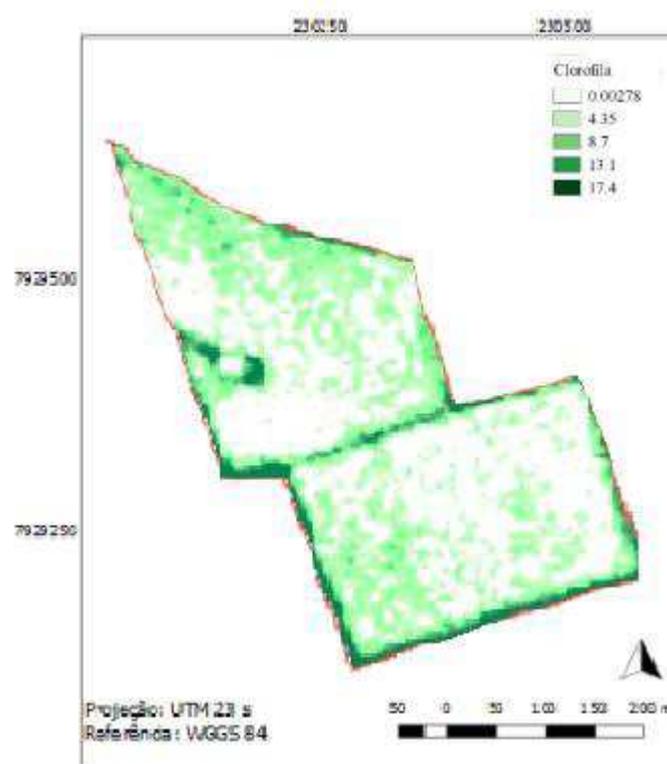
A estimativa do teor de clorofila está representada nos mapas por uma escala de tons de verde em que quanto maior fator de cor de verde maior a concentração do teor de clorofila nos mapas. Ao analisar os dois mapas, nota-se que, na porção superior do talhão A e na porção esquerda do talhão B, estão concentrados os maiores índices de clorofila.

Áreas em que o teor de clorofila é praticamente inexistente como é o caso da área a esquerda no talhão A podem ser atribuídas a áreas de solo exposto, já áreas com

uma tonalidade discrepante podem ser atribuídas tanto a plantas doentes devido a parasitas ou mesmo a plantas recém plantadas em que a cobertura vegetal da área não é tão densa, já áreas com alto teor de clorofila podem ser atribuídas a plantas saudas.

Em uma perspectiva mais aplicada foi feita uma operação entre os mapas para se observar de maneira mais simples se o comportamento da estimativa do teor de clorofila foi similar em ambos os casos, o resultado desta operação simples que foi apenas a subtração de um mapa pelo outro pode ser observado na Figura 11.

Figura 11: Mapa da diferença de estimativas.



Fonte: O autor.

Pode se observar pela Figura 11 que ambas as equações de estimativa de clorofila responderam de maneira similar quanto a concentração de clorofila. Nota-se que as estimativas mais variantes estão nas bordas dos talhões, enquanto que a região central apresentou resultados praticamente iguais quando observado que são estas as áreas mais claras o que pela legenda observa-se serem as estimativas mais homogêneas.

É possível afirmar que as equações responderam bem quanto à estimativa do teor de clorofila ressaltando que a estimativa da concentração a partir da resposta espectral do cafeeiro foi representada com um erro estimado em torno dos 10% para ambos os mapas de concentração e que ao comparar os dois mapas de estimativa observou-se resultados similares com baixa diferença.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao avaliar a variabilidade da reflectância das bandas e do índice nos talhões cafeeiros, tanto para a série mensal quanto para a série anual, notou-se um padrão em que as bandas se ajustaram a modelos lineares de resposta, tal fato indica que a reflectância das imagens Planet responderam bem a vegetação, pois assim como o esperado a vegetação possui um comportamento linear em relação ao tempo.

As imagens originais Planet se mostraram de alta qualidade para estimar concentração de clorofila, em especial a banda do IVP e o índice de vegetação NDVI possuem as melhores relações para estimarem o teor de clorofila quanto à vegetação uma vez que há alta correlação entre essas bandas e o teor de clorofila da vegetação.

Os mapas de concentração de clorofila foram então gerados a partir dos modelos matemáticos gerados dos valores de reflectância das bandas do IVP e do NDVI com o teor de clorofila obtido pelo clorofilômetro estabeleceu-se uma relação em forma de equação entre essas variáveis em que estas equações conseguem estimar o teor de clorofila através da reflectância com aproximadamente 10 % de erro médio.

As imagens do sensor Planet se mostraram de qualidade para o monitoramento agrícola, uma vez que elas possuem um comportamento ajustável a um modelo linear e a estimativa do teor de clorofila apresentou um EMQ (Erro Médio Quadrático) de aproximadamente 10%, o que significa que os modelos ajustaram com grande precisão ao teor de clorofila do café.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, Renan Henrique Casarim. **Comparação entre Metodologias de Índices de Vegetação Utilizando Dados do Satélite WorldView-2 no Parque Estadual do Lago Azul, Campo Mourão e Luiziana-PR.** 2013. 35 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2013.

ALMEIDA, Rafael Vilela Justino de et al. **Comparação dos Métodos de Correção Atmosférica: "6S" e "DOS" Processadas em Dados do Sensor TM/Landsat 5 e Correspondentes a Região de Ocorrência da Turfeira P-d-F.** João Pessoa: Inpe, 2015.

ARAÚJO, Suzana Romeiro et al. **Sensoriamento Remoto Espectral na Aplicação de Corretivos em Solos.** Natal: Inpe, 2009.

BAYMA, Adriana Panhol. **Análise do Potencial de Séries Temporais de Índices de Vegetação (Ndi e Evi) do Sensor Modis para Detecção de Desmatamentos no Bioma Cerrado.** 2015. 99 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Geociências Aplicadas, Universidade de Brasília - Unb, Brasília - Df, 2015.

BOECHAT, Lorena Temponi. **Técnicas de Sensoriamento Remoto na Detecção do Mofo Branco e da Mancha-Angular no Feijoeiro.** 2012. 128 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Agrícola, UFV, Viçosa, 2012.

CASTEJON, Emiliano Ferreira; FONSECA, Leila Maria Garcia; FORSTER, Carlos Henrique Quartucci. **Melhoria do Processo de Correção Geométrica de Imagens CBERS-CCD pelo Uso de Amostras Georreferenciadas Classificadas.** Curitiba: Boletim de Ciências Geodésicas, 2015.

CHO, Moses Azong et al. Potential utility of the spectral red-edge region of SumbandilaSat imagery for assessing indigenous forest structure and health. **International Journal Of Applied Earth Observation And Geoinformation.** p. 85-93. jan. 2012.

D'ALGE, Júlio César Lima. **Geoprocessamento - Teoria e Aplicações - Parte I - Cap. 6 - Cartografia para Geoprocessamento.** INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2001. Disponível em www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/. Acesso em 22 OUT. 2017.

DEPPE, Flavio et al. **Monitoramento da Evolução Temporal de Cultivos Agrícolas Através de Imagens TERRA/MODIS.** Florianópolis: Inpe, 2007.

ENVI. **Atmospheric Correction Module: QUAC and FLAASH User's Guide.** Disponível em: http://www.harrisgeospatial.com/portals/0/pdfs/envi/Flaash_Module.pdf>. Acesso em: 25 nov. 2017.

ESCOBAR, Nadia Romina Cardozo. **Normalização Radiométrica para Detecção de Mudanças da Cobertura da Terra em IBAs Situadas no Departamento Boquerón, Paraguai.** João Pessoa: Inpe, 2015.

FIGUEIREDO, Divino. **Conceitos Básicos de Sensoriamento Remoto**. Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB. Brasília - DF, 2005. Disponível em http://72.14.205.104/search?q=cache:r9r3jyI5bKsJ:www.conab.gov.br/conabweb/download/SIGABRASIL/manuais/conceitos_sm.pdf+divino+figueiredo,+conceitod+basicos+sensoriamento+remoto&hl=pt-BR&ct=clnk&cd=1&gl=br Acesso em 24 out. 2017.

JESUS, Silvia Cristina de; MIURA, Adalberto Koiti. **Análise de regressão linear múltipla para estimativa do índice de vegetação melhorado (EVI) a partir das bandas 3, 4 e 5 do sensor TM/Landsat 5**. Natal - Rn: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - Inpe, 2009.

LATORRE, Marcelo et al. **Correção Atmosférica: Conceitos e Fundamentos**. São José dos Campos: Espaço & Geografia, 2002.

LUIZ, Silvia; OLIVEIRA, Cleber Gonzales de; OKIDA, Rosana. **Comparação entre Diferentes Métodos de Correção Geométrica em Imagem Radarsat-1 no Flona Tapajós**. Belo Horizonte: Inpe, 2003.

MARTINS, George Deroco. **Caracterização Espectral e Espacial de Áreas Infestadas por Nematoides e Migdolus Fryanus em cultura canavieira**. 2013. 115 f. Tese (mestrado) - Curso de Faculdade de Ciências e Tecnologia, Unesp – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2013.

MARTINS, George Deroco. **Inferência dos Níveis de Infecção por Nematoides na Cultura Cafeeira a Partir de Dados de Sensoriamento Remoto Adquiridos em Multiescala**. 2016. 125 f. Tese (Doutorado) - Curso de Faculdade de Ciências e Tecnologia, Unesp – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2016.

MATIELLO, José Braz. **A bienalidade do cafeeiro pode ocorrer até mesmo dentro da planta**. Disponível em: <<https://www.cafepoint.com.br/noticias/tecnicas-de-producao/a-bienalidade-do-cafeeiro-pode-ocorrer-ate-mesmo-dentro-da-planta-veja-105859n.aspx>>. Acesso em: 17 jun. 2018.

MENESES, Paulo Roberto; ALMEIDA, Tati de. **Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto**. Brasília: Unb - Universidade de Brasília, 2012.

MINITAB. **O que são Parâmetros, Estimativas de Parâmetros e Distribuições de Amostragem?** Disponível em: <<https://support.minitab.com/pt-br/minitab/18/help-and-how-to/statistics/basic-statistics/supporting-topics/data-concepts/what-are-parameters-parameter-estimates-and-sampling-distributions/>>. Acesso em: 10 dez. 2018.

MORAES, Maria Fernanda. **Nanossatélites - Eles estão Reaquecendo o Programa Espacial Brasileiro**. Disponível em: <<https://vestibular.uol.com.br/resumo-das-disciplinas/atualidades/nanossatelites-eles-estao-reaquecendo-o-programa-espacial-brasileiro.htm>>. Acesso em: 10 dez. 2018.

MOREIRA, Mauricio Aves et al. **Uso da geotecnologia para monitorar a cafeicultura brasileira – Fase II São Paulo e Minas Gerais**. São José dos Campos: Inpe, 2008.

MOTOMIYA, Anamari Viegas de Araujo et al. **Mapeamento do Índice de Vegetação da Diferença Normalizada em Lavoura de Algodão**. Goiânia: Ufg, 2012.

NOVO, Evlyn M. L. de Moraes. **Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações**. 4. ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 2010.

OLIVEIRA, Guilherme Barroso e Murilo. **Artigo: Nanossatélites Planet – a Realidade do Monitoramento Contínuo**. Disponível em: <<http://mundogeo.com/blog/2016/12/09/artigo-nanossatelites-planet-a-realidade-do-monitoramento-contínuo/>>. Acesso em: 27 out. 2017.

PAIVA, Yhasmin Gabriel. **Estimativa do Índice de Área Foliar por Métodos Óticos e Sensoriamento Remoto para Calibrar Modelo Ecofisiológico em Plantios de Eucalipto em Áreas de Relevo Ondulado**. 2009. 74 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Meteorologia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.

PONZONI, Flávio Jorge; SHIMABUKURO, Yosio Edemir; KUPLICH, Tatiana Mora. **Sensoriamento Remoto da Vegetação**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

PRATES, Izabela. **Planet Labs Anuncia Compra da BlackBridge e dos Satélites RapidEye**. Disponível em: <<http://mundogeo.com/blog/2015/07/15/planet-labs-anuncia-compra-da-blackbridge-e-dos-satelites-rapideye/>>. Acesso em: 27 out. 2017.

RAMÍREZ, Fátima L. Benítez; ANDERSON, Liana O.; FORMAGGIO, Antônio R.. **Normalização Radiométrica Automatizada Para Geração de Mosaicos de Imagens RapidEye sobre Paisagens Amazônicas, Através da Transformação IR-MAD**. João Pessoa: Inpe, 2015.

RISSO, Joel et al. **Potencialidade dos Índices de Vegetação EVI e NDVI dos Produtos MODIS na Separabilidade Espectral de Áreas de Soja**. Natal: Inpe, 2009.

SANTIAGO, Marcondes Marroquim et al. **Análise da Cobertura Vegetal Através dos Índices de Vegetação (NDVI, SAVI e IAF) no Entorno da Barragem do Botafogo-PE**. Natal: Inpe, 2009.

SANTOS, Alexandre Rosa dos. **Geomática Aplicada à Gestão de Recursos Hídricos**. Viçosa: Engesat, 2015. 18 slides, color.

SANTOS, Micael Moreira et al. **Estimativa de Parâmetros Florestais em Área de Cerrado a Partir de Imagens do Sensor Oli Landsat 8**. Curitiba - Pr: Universidade Federal do Paraná, 2017.

SANTOS, Tales. **Raízes do café no Brasil**. Disponível em: <<https://brasilecola.uol.com.br/historia/o-cafe-no-brasil-suas-origens.htm>>. Acesso em: 04 out. 2018.

SCHIRMBECK, Lucimara Wolfarth; SCHIRMBECK, Juliano; FONTANA, Denise Cybis. **Produtos MODIS para Identificação de Áreas em Estresse Hídrico na Cultura da Soja**. João Pessoa: Inpe, 2015.

SOUZA, Carolina Gusmão. **Uso de Séries Temporais para o Mapeamento da Cafeicultura**. 2015. 163 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pósgraduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal de Lavras, Lavras – Mg, 2015.

APÊNDICE A – VALORES MÉDIOS DE REFLECTÂNCIA.

- Valores médios de reflectância para a série mensal.

Data	Banda 1 (Azul)		Banda 2 (Verde)		Banda 3 (Vermelho)	
	talhão 1	talhão 2	talhão 1	talhão 2	talhão 1	talhão 2
16 de abr	9417,370432	9497,945446	7904,749122	7982,399905	5054,379723	5178,676154
03 de jun	9603,08905	9650,650688	8004,707024	8034,475785	5025,221468	5112,996473
04 de jun	9274,075801	9331,239696	7992,550217	8038,093357	5037,312946	5131,460448
06 de jun	9512,868165	9577,580395	7979,713849	8029,62609	575,84576	575,858664
09 de jun	9546,124229	9605,198752	7781,601378	7841,467925	5120,991737	5219,171556
18 de jun	9791,961894	9826,679088	8003,782031	8039,055209	5170,567255	5263,942622
20 de jun	9580,621626	9599,253263	7845,025011	7870,411729	5402,159072	5441,454107

Data	Banda 4 (IVP)		Banda 5 (NDVI)	
	talhão 1	talhão 2	talhão 1	talhão 2
16 de abr	17088,15445	16839,62935	0,543291	0,529479
03 de jun	15174,21739	15101,04484	0,502193	0,494046
04 de jun	15923,16399	15818,55178	0,519086	0,510037
06 de jun	15071,87744	14786,44723	0,926342	0,924989
09 de jun	15238,83788	15133,23634	0,496531	0,487014
18 de jun	15048,10335	14837,80186	0,487819	0,475803
20 de jun	15290,25278	15269,867	0,477225	0,474119

- Valores médios de reflectância para a série anual.

Data	Banda 1 (Azul)		Banda 2 (Verde)		Banda 3 (Vermelho)	
	talhão 1	talhão 2	talhão 1	talhão 2	talhão 1	talhão 2
abr	9417,370432	9497,945446	7904,749122	7982,399905	5054,379723	5178,676154
maio	9547,165568	9560,671644	8019,203762	8020,406246	5121,616823	5203,003105
jun	9274,075801	9331,239696	7992,550217	8038,093357	5037,312946	5131,460448
jul	9596,926461	9606,467823	8142,672683	8164,008141	5204,638057	5237,831325
ago	11.912,710003	12048,15041	8090,804832	8131,125724	5313,232549	5420,625152
set	9524,739759	9.594,256401	8024,694437	8112,194376	5286,401978	5511,107271
out	9415,612287	9448,468343	8239,908519	8244,47041	5374,492559	5533,05132
nov	9866,574795	9917,241016	8087,108473	8111,055895	5241,849804	5337,450816
dez	10070,45608	10522,14327	8526,36957	8961,247994	6197,93405	7002,82065
jan	9792,514265	9726,570528	8366,152521	8255,094312	5548,354356	5512,922218
fev	9504,972923	9453,441683	7947,830933	7858,155033	5207,115304	5128,912928
mar	9660,95886	9666,477287	8048,019106	8027,895279	5088,881744	5144,337533
abr	9443,232342	9542,454567	7707,89502	7764,220974	5039,596343	5183,603954

Data	Banda 4 (IVP)		Banda 5 (NDVI)	
	talhão 1	talhão 2	talhão 1	talhão 2
abr	17088,15445	16839,62935	0,543291	0,529479
maio	19083,92336	18721,56132	0,57663	0,564992
jun	15923,16399	15818,55178	0,519086	0,510037
jul	14864,52722	14679,32964	0,480406	0,473651
ago	14470,11174	14151,69647	0,462053	0,445728
set	13749,65605	13588,90614	0,444786	0,423016
out	15289,75311	15134,35114	0,480068	0,464642
nov	17380,82908	17255,32407	0,536404	0,527394
dez	19045,87579	18890,33468	0,509859	0,459776
jan	18783,83903	18405,92966	0,54394	0,538512
fev	19586,16071	19704,39536	0,579605	0,586783
mar	16692,54888	16629,96757	0,532662	0,527445
abr	14470,11174	14151,69647	0,462053	0,445728

APÊNDICE B - PONTOS TEOR DE CLOROFILA SPAD E REFLECTÂNCIA DAS BANDAS.

Pontos	X	Y	SPAD	Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4	Banda 5
1	230088	7929669	46,5	10039	8711	6316	14121	0,3819
2	230046	7929654	66,9	10246	9151	6977	17427	0,4282
3	230097	7929648	43,5	10582	9293	7114	14592	0,3445
4	230064	7929603	63,7	9306	7962	4972	17580	0,5591
5	230115	7929603	59,5	9599	8002	5277	17604	0,5387
6	230208	7929600	43,9	10079	8667	6043	15110	0,4286
7	230166	7929597	61,4	10618	9175	7119	17058	0,4111
8	230133	7929555	67,2	9380	7883	4924	17783	0,5663
9	230226	7929552	54,3	9318	8012	5299	17415	0,5334
10	230280	7929543	56,8	9643	8278	5839	17415	0,4978
11	230337	7929522	56,7	9503	8229	5541	16434	0,4957
12	230148	7929507	65,8	9272	7625	4993	17701	0,56
13	230247	7929504	61,6	9371	7724	4973	17143	0,5503
14	230205	7929504	70,4	9328	7925	5011	17212	0,549
15	230298	7929495	57,7	9600	8096	5151	16800	0,5307
16	230355	7929474	54,8	9960	8713	6082	16295	0,4564
17	230118	7929462	62	9615	7961	5235	16366	0,5153
18	230265	7929456	63,6	9391	7794	5037	17387	0,5507
19	230223	7929456	57,8	9348	7835	4917	17211	0,5556
20	230319	7929450	69,7	9545	8079	5079	17001	0,5399

Pontos	X	Y	SPAD	Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4	Banda 5
21	230373	7929429	50,5	10379	8957	6709	15469	0,395
22	230136	7929417	55,9	10653	9223	6725	16158	0,4122
23	230283	7929408	65,7	9313	7875	4938	17322	0,5563
24	230334	7929405	52,6	9850	8218	5581	17249	0,5111
25	230499	7929381	54,7	9500	8190	5460	16633	0,5057
26	230202	7929375	60,8	9418	7803	5217	16245	0,5138
27	230445	7929372	62,7	9711	8062	5358	16483	0,5094
28	230259	7929363	53,6	9523	7905	5245	16411	0,5156
29	230301	7929360	62,8	9494	8217	5485	17131	0,5149
30	230211	7929348	58,4	9495	8083	5168	16264	0,5177
31	230355	7929348	56,9	9567	8162	5601	16477	0,4926
32	230169	7929339	62,7	9536	8161	5470	16567	0,5036
33	230517	7929336	71,9	9860	8127	5327	16581	0,5137
34	230409	7929333	60,8	9394	7836	5067	16485	0,5298
35	230463	7929327	59,5	9220	7918	5000	16209	0,5285
36	230220	7929327	57,6	9648	8095	5705	15687	0,4666
37	230277	7929318	51,3	9581	7924	5339	16610	0,5135
38	230319	7929315	64,5	9495	7934	5154	16806	0,5306
39	230376	7929300	62,8	9286	7879	5213	16589	0,5218
40	230535	7929288	53,1	9701	8140	5312	16271	0,5078
41	230487	7929279	61,9	9761	8183	5373	16196	0,5018
42	230337	7929270	50	9026	7817	4993	16503	0,5354
43	230394	7929252	61,7	9410	7945	5165	16629	0,526
44	230448	7929243	64,9	9189	7950	5112	17272	0,5432
45	230553	7929243	67,2	9657	8097	5282	16316	0,5109
46	230256	7929234	73,5	9311	7780	4910	17223	0,5563
47	230355	7929222	56,6	9232	7971	5196	17327	0,5386
48	230412	7929204	61,7	9470	7924	5147	17019	0,5356
49	230274	7929183	55,6	9186	7756	4874	17460	0,5635
50	230331	7929174	56,3	9399	7889	5098	17260	0,544