

JOÉSIO LEANDRO DE SOUZA

**PRODUTIVIDADE E ESTADO NUTRICIONAL E SUAS RELAÇÕES COM A
REFLECTÂNCIA ESPECTRAL DO CAFEIEIRO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para a obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Júlio César Lima Neves

Coorientador: Elpídio Inácio Fernandes Filho

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2022**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

S729p
2022 Souza, Joésio Leandro de, 1993-
Produtividade e estado nutricional e suas relações com a
reflectância espectral do cafeeiro / Joésio Leandro de Souza. –
Viçosa, MG, 2022.

1 dissertação eletrônica (52 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Júlio César Lima Neves.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Solos, 2022.

Referências bibliográficas: f. 47-52.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2022.331>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Café - Nutrição. 2. Fertilidade do solo. 3. Química do
solo. 4. Análise foliar. 5. Probabilidade. I. Neves, Júlio César
Lima, 1955-. II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento
de Solos. Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de
Plantas. III. Título.

CDD 22. ed. 633.73

Bibliotecário(a) responsável: Bruna Silva CRB6/2552

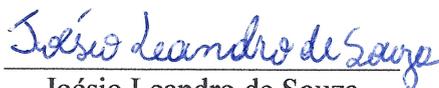
JOÉSIO LEANDRO DE SOUZA

**PRODUTIVIDADE E ESTADO NUTRICIONAL E SUAS RELAÇÕES COM A
REFLECTÂNCIA ESPECTRAL DO CAFEIEIRO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para a obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 25 de fevereiro de 2022

Assentimento:



Joésio Leandro de Souza

Autor



Júlio César Lima Neves

Orientador

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela força, saúde e por me permitir concluir essa jornada.

Aos meus pais, meus maiores exemplos de vida, que não pouparam esforços para estarem ao meu lado. Aos meus irmãos pelo companheirismo, principalmente a Pedro pelos conselhos

À minha namorada, Aniely, por sempre estar ao meu lado me apoiando e compartilhando das dificuldades desta jornada.

À Universidade Federal de Viçosa, pela oportunidade de realizar a pós-graduação.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos.

Ao Departamento de Solos pela infraestrutura disponibilizada para a realização do Mestrado.

À empresa de consultoria SNP, na pessoa do Eng^o. Rodrigo de Oliveira Lima, pela disponibilização do banco de dados, fundamental para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor Júlio César Lima Neves, por toda compreensão, amizade e orientação ao longo da realização deste estudo.

Ao meu coorientador Elpídio Inácio Fernandes Filho, pela disponibilidade e conhecimento compartilhado durante a pesquisa.

Ao Laboratório de Geoprocessamento (LabGeo) fundamental para o processamento e análise dos dados e a todos os colegas do LabGeo, pela disponibilidade e companheirismo durante o andamento do estudo.

A todos que, mesmo não sendo citados acima, torceram por mim e colaboraram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

RESUMO

SOUZA, Joésio Leandro de, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2022. **Produtividade e estado nutricional e suas relações com a reflectância espectral do cafeeiro.** Orientador: Júlio César Lima Neves. Coorientador: Elpídio Inácio Fernandes Filho.

Para a obtenção de um manejo nutricional adequado da cultura faz-se necessário, além da análise de solo, a utilização de outras técnicas visando abranger os efeitos de outros fatores importantes para a produção vegetal. Neste contexto, a análise foliar tornou-se uma ferramenta muito útil, tendo em vista que possibilita a avaliação dos nutrientes absorvidos pela cultura permitindo que ações de manejo sejam adotadas durante o ciclo, especialmente em culturas perenes, visando o ajuste fino do suprimento nutricional. Uma das técnicas que pode ser utilizada para subsidiar o manejo nutricional é o sensoriamento remoto, com base em índices de vegetação obtidos por meio da reflectância espectral da cultura. O objetivo deste trabalho consistiu em relacionar o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) com a produtividade, teores foliares de nutrientes e atributos da fertilidade do solo em lavouras irrigadas de café arábica visando subsidiar o manejo nutricional da cultura. O estudo foi realizado com base em um banco de dados contendo informações obtidas em nove fazendas produtoras de café arábica (*Coffea arabica*), localizadas nas mesorregiões do Noroeste de Minas e Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba. As sequências temporais das imagens espectrais das lavouras de café foram obtidas nos sites do USGS Earth Explorer da NASA e Copernicus Open Access Hub, com as correções atmosféricas, sendo selecionadas as imagens do satélite Sentinel-2 obtidas nas datas mais próximas das datas de amostragem foliar da cultura. As imagens obtidas foram cortadas de acordo com o tamanho das fazendas utilizando o programa ArcGis 10.1, através das coordenadas geográficas de cada parcela. O NDVI foi obtido através do processamento das imagens, utilizando as faixas de comprimento de onda do infravermelho próximo e vermelho. Utilizando o método de análise numérica Chance Matemática Relativa (CHMR) foram obtidos os relacionamentos da produtividade em função do NDVI e do NDVI em função dos teores foliares dos nutrientes e de atributos da fertilidade do solo. Conclui-se que a utilização do NDVI, associado ao método CHMR, permitiu a obtenção de faixas de suficiência dos teores de nutrientes foliares e de atributos da fertilidade do solo, condizentes com as relatadas na literatura, sendo alternativa viável para subsidiar o manejo nutricional da cultura de café arábica.

Palavras-Chave: Café - Faixas de suficiência Nutricional. Café - NDVI. Café - Chance Matemática Relativa. Café - Manejo Nutricional.

ABSTRACT

SOUZA, Joésio Leandro de, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2022. **Productivity and nutritional status and their relationships with spectral reflectance of coffee.** Adviser: Júlio César Lima Neves. Co-adviser: Elpídio Inácio Fernandes Filho.

In order to obtain an adequate nutritional management of the crop, it is necessary, in addition to soil analysis, to use other techniques to cover the effects of other important factors for plant production. In this context, foliar analysis has become a very useful tool, as it allows the assessment of nutrients absorbed by the crop, allowing management actions to be adopted during the cycle, especially in perennial crops, aiming at fine-tuning the nutritional supply. One of the techniques that can be used to support nutritional management is remote sensing, based on vegetation indices obtained through the spectral reflectance of the crop. The objective of this work was to relate the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) with productivity, leaf nutrient contents and soil fertility attributes in irrigated Arabica coffee plantations, to subsidize the nutritional management of the crop. The study was based on a database containing information obtained from nine farms producing Arabica coffee (*Coffea arabica*), located in the mesoregions of Northwest Minas and Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba. The temporal sequences of the spectral images of the coffee plantations were obtained from NASA's USGS Earth Explorer and Copernicus Open Access Hub sites, with atmospheric corrections, being selected the Sentinel-2 satellite images obtained on the dates closest to the foliar sampling dates. of culture. The images obtained were cut according to the size of the farms using the ArcGis 10.1 program, using the geographic coordinates of each plot. The NDVI was obtained by processing the images, using the near-infrared and red wavelength bands. Using the numerical analysis method Relative Mathematical Chance (RMCH) yield relationships as a function of NDVI and NDVI as a function of foliar nutrient contents and soil fertility attributes were obtained. It is concluded that the use of NDVI, associated with the method RMCH, allowed obtaining sufficiency ranges of foliar nutrient contents and soil fertility attributes, consistent with those reported in the literature, being a viable alternative to subsidize the Nutritional management of arabica coffee culture.

Keywords: Coffee - Nutritional Sufficiency Ranges. Coffee - NDVI. Coffee - Relative Mathematical Chance. Coffee - Nutritional Management.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1:** Mapa de localização das fazendas em estudo. 15
- Figura 2:** Gráfico do relacionamento da CHMR de se ter a produtividade relativa P50% ou maior ($\geq 45,85$ sc/ha) em função do NDVI obtidos na época de amostragem foliar padrão em lavouras irrigadas de café arábica. 20
- Figura 3:** Frequências relativas (FR%) dos talhões nas faixas de suficiência do índice de vegetação NDVI obtidos na época de amostragem padrão em lavouras irrigadas de café arábica, nas mesorregiões do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba e Noroeste de Minas, Minas Gerais, com base no método da CHMR aplicado a produtividade relativa em $\text{sc}\cdot\text{ha}^{-1}(\%)$ 22
- Figura 4:** Frequências relativas (FR%) dos talhões nas faixas de suficiência de teores de nutrientes em folhas coletadas na época de amostragem padrão em lavouras irrigadas de café arábica, nas mesorregiões do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba e Noroeste de Minas, Minas Gerais, com base no método da CHMR aplicado ao índice NDVI. 26
- Figura 5:** Gráfico do relacionamento da CHMR de se ter a produtividade relativa P50% ou maior ($\geq 50,89$ sc/ha) em função do NDVI obtidos na fase 1 de amostragem foliar em lavouras irrigadas de café arábica. 29
- Figura 6:** Frequências relativas (FR%) dos talhões nas faixas de suficiência do índice de vegetação NDVI obtidos na fase 1 de amostragem foliar em lavouras irrigadas de café arábica, nas mesorregiões do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba e Noroeste de Minas, Minas Gerais, com base no método da CHMR aplicado a produtividade relativa em $\text{sc}\cdot\text{ha}^{-1}(\%)$ 30
- Figura 7:** Frequências relativas (FR%) dos talhões nas faixas de suficiência de teores de nutrientes em folhas coletadas na fase 1 de amostragem foliar em lavouras irrigadas de café arábica, nas mesorregiões do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba e Noroeste de Minas, Minas Gerais, com base no método da CHMR aplicado ao índice NDVI. 33
- Figura 8:** Frequências relativas (FR%) dos talhões nas Faixas de suficiência dos valores e teores dos atributos químicos do solo na camada de 0 - 10 cm em lavouras irrigadas de café arábica, nas mesorregiões do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba e Noroeste de Minas, Minas Gerais, com base no método da CHMR aplicado ao índice NDVI obtido na época padrão de amostragem foliar. 38
- Figura 9:** Frequências relativas (FR%) dos talhões nas Faixas de suficiência dos valores e teores dos atributos químicos do solo na camada de 10 - 20 cm em lavouras irrigadas de café arábica, nas mesorregiões do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba e Noroeste de Minas, Minas Gerais, com base no método da CHMR aplicado ao índice NDVI obtido na época padrão de amostragem foliar. 42

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1:** Características do sensor multiespectral do satélite Sentinel-2. 17
- Tabela 2:** Equação ajustada para a Chance Matemática Relativa da produtividade relativa em $sc.ha^{-1}(y, \%)$ em função do índice de vegetação NDVI (x) em lavouras irrigadas de café arábica. 20
- Tabela 3:** Faixas de suficiência do índice de vegetação NDVI obtidos na época de amostragem padrão em lavouras irrigadas de café arábica, nas mesorregiões do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba e Noroeste de Minas, Minas Gerais, com base no método da CHMR aplicado a produtividade relativa em $sc.ha^{-1}(\%)$ 21
- Tabela 4:** Equações ajustadas para a CHMR do NDVI (y) em função dos teores foliares dos nutrientes (x) para folhas coletadas na época de amostragem padrão em lavouras irrigadas de café arábica. 23
- Tabela 5:** Faixas de suficiência¹ de teores² de nutrientes em folhas coletadas na época de amostragem padrão em lavouras irrigadas de café arábica, nas mesorregiões do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba e Noroeste de Minas, Minas Gerais, com base no método da CHMR aplicado ao índice NDVI. 24
- Tabela 6:** Faixas adequadas (Suficiente + Alta) de teores de macro e micronutrientes em folhas de cafeeiro, recomendadas por diferentes autores em comparação ao proposto por este estudo. 27
- Tabela 7:** Equação ajustada para a Chance Matemática Relativa da produtividade relativa em $sc.ha^{-1}(y, \%)$ em função do índice de vegetação NDVI (x) obtido na fase 1 de amostragem foliar em lavouras irrigadas de café arábica. 29
- Tabela 8:** Faixas de suficiência do índice de vegetação NDVI obtidos na época de amostragem correspondente a fase 1 em talhões de café arábica, nas mesorregiões do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba e Noroeste de Minas, Minas Gerais, com base no método da CHMR aplicado a produtividade Relativa de $sc.ha^{-1}(\%)$ e respectivas frequências relativas (FR%) dos talhões. 30
- Tabela 9:** Equações ajustadas para a CHMR do NDVI (y) em função de teores foliares de nutrientes (x) para folhas coletadas em amostragem na fase 1 em talhões de café arábica. 31
- Tabela 10:** Faixas de suficiência¹ de teores² de nutrientes em folhas coletadas na época de amostragem correspondente a fase 1 em lavouras irrigadas de café arábica, nas mesorregiões do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba e Noroeste de Minas, Minas Gerais, com base no método da CHMR aplicado ao índice NDVI e respectivas frequências relativas (FR%) dos talhões. . 32
- Tabela 11:** Equações ajustadas para a CHMR do NDVI (y) obtido na época de amostragem foliar padrão em função de atributos químicos do solo (x) na profundidade de 0 - 10 cm em talhões de café arábica. 35
- Tabela 12:** Faixas de suficiência¹ de teores² de atributos químicos do solo na camada de 0 - 10 cm em lavouras irrigadas de café arábica, nas mesorregiões do Triângulo Mineiro/Alto

Paranaíba e Noroeste de Minas, Minas Gerais, com base no método da CHMR aplicado ao índice NDVI obtido na época padrão de amostragem foliar..... 36

Tabela 13: Equações ajustadas para a CHMR do NDVI (y) obtido na época de amostragem foliar padrão em função de atributos químicos do solo (x) na profundidade de 10 - 20 cm em lavouras irrigadas de café arábica..... 40

Tabela 14: Faixas de suficiência¹ de teores² de atributos químicos do solo na camada de 10 - 20 cm em lavouras irrigadas de café arábica, nas mesorregiões do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba e Noroeste de Minas, Minas Gerais, com base no método da CHMR aplicado ao índice NDVI obtido na época padrão de amostragem foliar..... 41

Tabela 15: Faixas adequadas de teores dos atributos químicos do solo para a profundidade de 0 - 20 cm, recomendada por diferentes autores em comparação ao proposto por este estudo. 44

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUÇÃO..... | 11 |
| 2. MATERIAL E MÉTODOS | 15 |
| 2.1. Caracterização da área de estudo | 15 |
| 2.2. Obtenção e processamento das imagens espectrais | 16 |
| 2.3. Processamento do banco de dados e cálculo do NDVI..... | 17 |
| 2.4. Relacionamento do NDVI com a produtividade e com os teores foliares de nutrientes | 18 |
| 3. RESULTADO E DISCUSSÃO | 20 |
| 3.1. Relacionamento da Produtividade com o NDVI obtido na Fase 2 (“chumbinho”, amostragem Padrão)..... | 20 |
| 3.2. Relacionamento do NDVI com os Teores Foliares de Nutrientes obtidos na Fase 2 (“chumbinho”, amostragem Padrão) | 22 |
| 3.3 Relacionamento da Produtividade com o NDVI e do NDVI com os Teores Foliares de Nutrientes obtidos na Fase 1 | 29 |
| 3.4 Relacionamento do NDVI com os atributos químicos do solo | 34 |
| 4. CONCLUSÕES..... | 46 |
| REFERÊNCIAS..... | 47 |

1. INTRODUÇÃO

O cafeeiro é uma planta de origem africana, da província de Kaffa na Etiópia, onde há relatos de que um pastor observou alteração no comportamento de suas cabras após o consumo do fruto. Entretanto, o primeiro cultivo comercial de café foi registrado no Iêmen, região da Arábia, sendo posteriormente propagado para o restante do mundo (Beltrão, 2018; ICO, 2020). Atualmente existem diversas espécies de *Coffea* conhecidas, no entanto as principais cultivadas são as espécies *Coffea Arábica* (café arábica) e a *Coffea canephora* (café robusta) por apresentarem características comerciais desejáveis.

No Brasil o café foi introduzido no século 18, sendo a primeira muda de café trazida da Guiana francesa para Belém do Pará em 1727, tendo sido rapidamente disseminada pelo país devido as condições climáticas favoráveis (Rodrigues *et al.*, 2015; Beltrão, 2018). O café é um dos produtos básicos mais valiosos em alguns países em desenvolvimento, gerando milhões de empregos em toda a sua cadeia produtiva (ICO, 2020). Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2020a) a produção mundial de café na safra de 2019/2020 foi de aproximadamente 176,085 milhões de sacas de 60 quilos, sendo que 101,800 milhões de sacas foram de café arábica e 74,285 milhões de sacas de café robusta, com movimentação monetária de cerca de US\$ 17 bilhões. Atualmente o café é uma bebida utilizada majoritariamente como estimulante, sendo uma das bebidas mais consumidas mundialmente (Loftfield *et al.*, 2018; Tverdal *et al.*, 2020).

O Brasil apresenta papel de destaque na produção mundial de café, sendo o maior produtor de café Arábica (47, 8 milhões de sacas) e o segundo maior produtor de café Conillon (20,1 milhões de sacas) (CONAB, 2020a). A cafeicultura brasileira abrange uma área cultivada de 2,16 milhões de hectares, nos estados de Minas Gerais, Espírito Santo, São Paulo, Bahia, Rondônia, Paraná, Rio de Janeiro, Goiás e Mato Grosso (CONAB, 2020b), tornando-se assim uma cultura importante para o agronegócio brasileiro.

Dentre os estados produtores, Minas Gerais merece destaque uma vez que é o maior produtor de café arábica, produzindo cerca de 34,34 milhões de sacas de 60 quilos, que representam cerca de 70 % da produção da nacional (CONAB, 2020b). A produção é distribuída por todas as regiões do estado, com as regiões Sul e Centro-Oeste produzindo juntas 19,15 milhões de sacas, as regiões da Zona da Mata, Rio Doce e Central produzindo juntas 8,79 milhões de sacas, as regiões do Triângulo, Alto Paranaíba e Noroeste com 6 milhões de sacas e as regiões Norte, Jequitinhonha e Mucuri com 0,70 milhões de sacas (CONAB, 2020b).

As regiões do Triângulo, Alto Paranaíba e Noroeste de Minas, apresentam vantagem em relação as outras regiões produtoras, uma vez que possuem predominância do bioma cerrado. O Bioma Cerrado apresenta uma condição climática favorável a produção de cafés de alta qualidade devido as suas estações climáticas bem definidas (verão quente e úmido e inverno ameno e seco), enquanto as outras regiões são influenciadas pelas massas oceânicas, situação que pode favorecer a fermentação do fruto reduzindo assim a sua qualidade (Fernandes *et al.*, 2012).

Essas condições climáticas favoráveis e a agricultura moderna praticada neste bioma, possibilitam ao cerrado alcançar maiores produtividades em relação à média nacional (Fernandes *et al.*, 2012). De acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2020b) o cerrado brasileiro apresentou uma produtividade de 37,35 sacas ha⁻¹, enquanto que a média nacional foi 32,18 sacas ha⁻¹.

O cafeeiro é uma planta perene, apresentando assim uma grande exigência nutricional, sendo o período reprodutivo considerado o de maior requerimento de nutrientes pelas plantas (Laviola, 2004). Dentre os macronutrientes o N e K são os mais requeridos pelo o cafeeiro, sendo importantes nas fases de formação, florescimento e enchimento dos grãos, em seguida vem Ca e Mg e os menos exigidos são P e S (Novais & Mello, 2007; Martinez & Neves, 2015). Já os micronutrientes mais exigidos são B, Cu, Fe, Mn e Zn, sendo Zn e B os mais limitantes devido a deficiência destes nutrientes em solos com intemperismo elevado (Malavolta, E 1993; Sousa, 2016).

Para que se possa obter um melhor manejo nutricional da cultura faz-se necessário a utilização de outras técnicas aliadas com a análise de solo, uma vez que um teor de nutriente obtido através da análise química do solo pode não representar a quantidade real que a planta irá absorver, além de não levar em considerações outros fatores importantes para o desenvolvimento vegetal (Cantarutti *et al.*, 2007; Meurer, 2007). Neste sentido, a análise do tecido foliar vem sendo utilizada em conjunto com a análise do solo para que seja possível realizar um manejo nutricional mais eficiente via adubação, tendo em vista que a análise foliar tem a capacidade de diagnosticar o status nutricional da planta, sendo capaz de fornecer dados sobre deficiência, suficiência ou toxidez de algum nutriente (Kurihara *et al.*, 2005; Sousa, 2016), permitindo uma análise mais apurada da situação nutricional da planta.

Na cultura do café existem diversos trabalhos utilizando a análise foliar visando o monitoramento nutricional da cultura, buscando utilizar a análise foliar para melhorar a recomendação de adubação (Sousa, 2016) e a avaliação tanto no aspecto quantitativo (grau de balanço) utilizando os índices balanceados de Kenworthy (índices KW) quanto no aspecto

qualitativo (grau de equilíbrio) utilizando os índices DRIS do estado nutricional da cultura do cafeeiro no estado de Minas Gerais (Farnezi *et al.*, 2009; Silva *et al.*, 2011; Mendonça, 2016).

Outra técnica que vem sendo cada vez mais utilizada na agricultura é o sensoriamento remoto (SR), esta técnica pode ser definida, de forma básica, como a tecnologia que possibilita a obtenção de informações de um alvo, através da análise de dados obtidos por um equipamento sem que haja o contato físico com o mesmo (Corti *et al.*, 2018; Yan *et al.*, 2018).

O SR vem tornando-se uma técnica com grande potencial para monitoramento agrícola visando a obtenção de parâmetros biofísicos que possibilitam a estimativa da produção e estado nutricional das culturas, de uma forma rápida e confiável (Formaggio & Sanches, 2017; Maia, 2019). Neste contexto, as imagens de satélites se tornaram um recurso de grande importância para o desenvolvimento da agricultura, uma vez que permite o monitoramento de grandes áreas de forma rápida e de baixo custo, áreas de difícil acessibilidade, além de não destruir a amostra de estudo (Jensen & Epiphanyo, 2009; Silva, 2020).

Esta técnica baseia-se na interação da Radiação Eletromagnética (REM) com o alvo do estudo, e para compreendermos essa interação entre REM com a vegetação, faz-se necessário a observação das propriedades ópticas das folhas, tendo em vista que a folha é o principal órgão da planta que exerce influência sobre a REM (Ponzoni *et al.*, 2007). A morfologia, a estrutura interna e a composição química da folha serão responsáveis pelo seu comportamento espectral, proporcionando um comportamento específico para cada cultura (Pertille, 2019).

Uma folha sadia apresenta uma baixa refletância no comprimento de onda 0,4 a 0,7 μm região espectral do visível, devido a absorção da REM pelos pigmentos presentes, principalmente a clorofila que corresponde a cerca de 65% da absorção (Pertille, 2019). No comprimento de onda 0,7 a 1,3 μm região espectral infravermelho próximo (NIR) há um aumento na reflexão da REM incidente sobre a folha devido a refração e reflexões no seu interior, já no comprimento de onda 1,3 a 2,6 μm região espectral do infravermelho Médio há uma redução na reflexão da REM devido a sua absorção pela água presente na folha (Silva, 2020).

Cada espécie possui um padrão espectral específico referente a coloração da sua folha e a deficiência nutricional pode influenciar em sua resposta espectral, (Samborski *et al.*, 2009; Netto *et al.*, 2019). Neste sentido, visando o monitoramento nutricional das plantas, a utilização do sensoriamento remoto pode se tornar uma ferramenta útil. Atualmente na agricultura diversos índices de vegetação têm sido utilizados como indicadores da biomassa, estado nutricional e produtividade das culturas, sendo estes índices obtidos com a utilização de técnicas do sensoriamento remoto (Reznick, 2017).

Os índices de Vegetação (IV) podem ser obtidos através da soma, subtração ou qualquer outro tipo de combinação linear envolvendo duas ou mais bandas espectrais, estes índices visam explorar as propriedades espectrais da vegetação principalmente no comprimento de onda na região do visível e NIR (Ahamed *et al.*, 2011; Giovos *et al.*, 2021). Com o aumento da resolução e disponibilidade de bandas espectrais os IV estão sendo cada vez mais utilizados na agricultura uma vez que possuem relação com parâmetros biofísicos das plantas, podendo ser utilizados como indicadores da cobertura vegetal, produção de biomassa, além de serem úteis para a avaliação de incidência de pragas e doenças nas culturas (Mahlein *et al.*, 2010; Romero *et al.*, 2018).

Na atualidade, um dos índices de vegetação mais utilizados é o NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), ou seja, o Índice da Vegetação por Diferença Normalizada, sendo este índice embasado na diferença de absorção do dossel da planta nos comprimentos de onda do vermelho e do infravermelho próximo (Julien *et al.*, 2011). Alguns trabalhos tem sido realizados utilizando o NDVI com indicadores de produtividade, biomassa e manejo nutricional das culturas (Moges *et al.*, 2005; Rissini *et al.*, 2015; Silva *et al.*, 2015; Teixeira, 2018; Netto *et al.*, 2019).

Para avaliação nutricional da cultura o método da Chance Matemática Relativa (CHMR), tem se tornando uma boa alternativa para a obtenção de valores de referência. Este método baseia-se em faixas de suficiências, onde ocorre uma classificação em ordem decrescente dos teores de um determinado nutriente e o seu relacionamento com a produtividade das lavouras amostradas (Serra *et al.*, 2010). Este método tem sido aplicado em diversos trabalhos para a diagnose nutricional das culturas da soja (Urano *et al.*, 2007), do arroz irrigado (Wadt *et al.*, 2013), do algodoeiro (Serra *et al.*, 2010) e da cana-de-açúcar (Santos *et al.*, 2013).

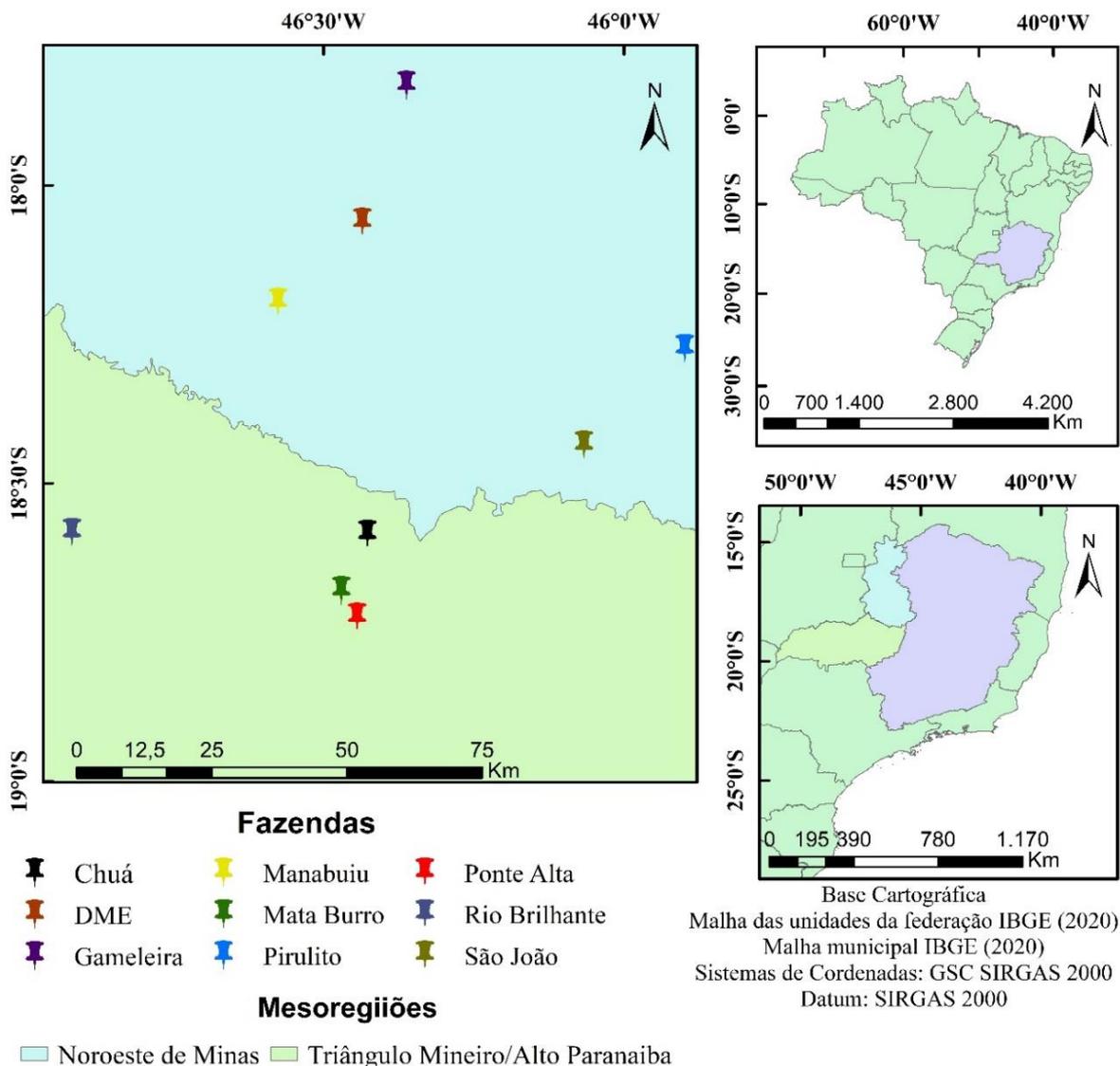
Neste contexto, a utilização de Índices de vegetação associados ao método da chance matemática relativa pode ser uma alternativa viável para obtenção de modelos preditivos da produtividade e para o manejo nutricional das culturas, tornando-se uma ferramenta muito útil para o melhor desenvolvimento da agricultura. Assim sendo, este trabalho tem por objetivo relacionar o NDVI com a produtividade, teores foliares de nutrientes e atributos da fertilidade do solo em lavouras irrigadas de café arábica, visando subsidiar o manejo nutricional da cultura.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Caracterização da área de estudo

A pesquisa foi elaborada a partir de um banco de dados contendo nove fazendas produtoras de café arábica (*Coffea Arábica*) com área aproximada de 3,7 mil hectares, sendo empregado um manejo altamente tecnificado da cultura, realizando-se irrigação com a utilização de pivô central, boa suplementação nutricional, além de um elevado controle de pragas e doenças. As fazendas estão localizadas em sete municípios inseridos nas mesorregiões do Triângulo Mineiro/ Alto Paranaíba e Noroeste de Minas (Figura 1), onde há a predominância do bioma Cerrado.

Figura 1: Mapa de localização das fazendas em estudo.



Os municípios apresentam clima tropical com pluviosidade maior no verão que no inverno, sendo classificado, segundo Köppen e Geiger, como Aw. A precipitação média anual varia de 1165 mm a 1312 mm, tendo o mês de julho apresentado a menor pluviosidade média variando de 4 a 6 mm e o mês de dezembro apresentado a maior pluviosidade média variando de 238 a 268 mm. A temperatura média anual varia de 21,5 °C a 24,0 °C, sendo que os meses de junho e julho apresentam a menor temperatura média variando de 18,8 °C a 21,4 °C e com o mês de outubro apresentando a maior temperatura média, variando de 23,6 °C e 26,5 °C (Climate-Date.Org, 2021).

Os solos predominantes no cerrado de Minas são os Latossolos. Na região do Triângulo Mineiro há a o domínio dos Latossolos Vermelhos. Nesta região o relevo plano, as coberturas sedimentares proveniente da bacia do Paraná, as temperaturas e o regime pluviométrico do clima tropical quente úmido e semiúmido favorecem o processo de latossolização, já na região noroeste de minas há a predominância dos Latossolos Vermelhos-Amarelos entremeados aos Latossolos Vermelhos (Da Silva *et al.*, 2018).

2.2. Obtenção e processamento das imagens espectrais

As sequencias temporais das imagens foram obtidas através dos sites do USGS Earth Explorer da NASA e Copernicus Open Access Hub, com as correções atmosférica, sendo selecionadas as imagens do satélite Sentinel-2.

O satélite Sentinel-2 possui o sensor multiespectral MSI com 13 bandas espectrais, com resolução radiométrica de 12 bits por pixel, variando o comprimento de onda de 443 a 2190 nm e com a largura de faixa imageada de 290 km e uma resolução temporal de 10 dias (Tabela 1).

Tabela 1: Características do sensor multiespectral do satélite Sentinel-2.

| Resolução Espacial (m) | Banda | Nome | Comprimento de Onda central (nm) |
|-------------------------------|--------------|-----------------------------|---|
| 10 m | B02 | Blue (Azul) | 490 |
| | B03 | Green (Verde) | 560 |
| | B04 | Red (Vermelho) | 665 |
| | B08 | NIR (Infravermelho Próximo) | 842 |
| 20 m | B05 | Red Edge 1 | 705 |
| | B06 | Red Edge 2 | 740 |
| | B07 | Red Edge 3 | 783 |
| | B08A | Red Edge 4 | 865 |
| | B11 | SWIR 1 | 1610 |
| | B12 | SWIR 2 | 2190 |
| 60 m | B01 | Aerossol | 443 |
| | B09 | Water Vapor | 940 |
| | B10 | Cirrus | 1375 |

Fonte: ENGESAT (2021a).

Foram selecionadas as imagens mais próximas das datas de amostragem foliar da cultura, descartando-se imagens com alta presença de nuvens, evitando assim interferência em fatores importantes as repostas espectrais da vegetação. Para a obtenção dos índices de vegetação das imagens obtidas pelo Sentinel-2, foram utilizadas as bandas 4 e 8. As imagens obtidas foram cortadas de acordo com o tamanho das fazendas em estudos utilizando o programa ArcGis 10.1, através das coordenadas geográficas de cada parcela, em seguida os teores de nutrientes obtidos por meio da análise foliar foram plotados relacionando-os com as informações da tabela de atributo obtidas no ArcGis.

2.3. Processamento do banco de dados e cálculo do NDVI

O banco de dados foi estruturado levando em consideração o período compreendido entre os anos safras de 2015/2016 a 2018/2019 selecionando as seguintes informações: nome da fazenda, identificação do talhão, variedade, idade, densidade populacional, tipo de solo, ano de plantio, data de coleta foliar e produtividade do talhão no ano safra. Após a estruturação do banco de dados foram excluídos os dados discrepantes e talhões sem identificações.

Após a organização os dados foram separados em fases levando em consideração a época de amostragem padrão utilizada para o manejo da cultura de café arábica, sendo divididos em 2 fases: fase 1(F1) com amostragem foliar realizada nos meses de (maio, junho e julho) a primeira amostragem no ano safra, antecedendo a amostragem considerada padrão, fase 2 (F2) com

amostragem foliar realizada nos meses de (novembro e dezembro) a segunda amostragem no ano safra sendo considerada a amostragem padrão para a cultura do café.

O cálculo para obtenção do NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) foi realizado utilizando-se os dados obtidos através das bandas espectrais das imagens de satélite, sendo este índice amplamente utilizado em diversos trabalhos, em diferentes escalas com diversas culturas agrícolas, apresentando uma ótima utilidade para avaliação da vegetação, de acordo com a cobertura vegetal. O NDVI foi proposto por Rouse (1974) onde o comportamento espectral da cultura é normalizado para cada pixel da imagem para o intervalo de -1 a +1, onde, quanto mais próximo de 1 representa uma maior atividade vegetativa, com lavouras mais saudáveis e maior cobertura vegetal, enquanto que valores negativos ou mais próximos do zero indicam áreas com solo nu, água, edificações onde há pouca ou a ausência de vegetação. O NDVI foi obtido utilizando as faixas de comprimento de onda do Infravermelho próximo e Vermelho através da Equação 1:

Equação 1:

$$NDVI = \frac{(\rho_{IVP} - \rho_V)}{(\rho_{IVP} + \rho_V)}$$

Sendo: ρ_{IVP} = Refletância no infravermelho próximo
 ρ_V = Refletância no vermelho

2.4. Relacionamento do NDVI com a produtividade e com os teores foliares de nutrientes

Com os valores de produtividade de cada talhão de café presente no banco de dados, foi então calculado a produtividade relativa para cada um dos talhões, através da equação 2.

Equação 2:

$$Produtividade\ Relativa\ (\%) = \left(\frac{Produtividade\ da\ lavoura}{Maior\ produtividade\ da\ Fase} \right) \times 100$$

A relação do NDVI com a produtividade e os teores foliares dos nutrientes foi obtida através do uso do método da chance matemática relativa (CHMR), proposto por Fernandes (2010), sendo um aperfeiçoamento do método da chance matemática (CHM) proposto por Wadt *et al.* (1998), este método integra a frequência de lavouras de altas produtividades, e a produtividade

destas lavouras dentro de uma classe específica da variável em estudo baseando-se na esperança matemática e tendo como pressuposto o fato de que em grandes populações a frequência observada se aproxima da probabilidade, o maior valor de CHM assim obtido é tomado como 100% sendo os demais proporcionalizados ao maior valor.

Primeiramente utilizou-se o método CHMR para relacionar as produtividades relativas das lavouras em função do NDVI, com intuito de se obter a faixa de valores de NDVI que maximiza a chance matemática de se alcançar as produtividades relativas maiores que o percentil 50 % das produtividades relativas obtidas (NDVI alvo). Em seguida utilizou-se o método CHMR para relacionar o NDVI em função do teor foliar de cada nutriente, de modo a obter uma classe de teores de nutrientes que maximaliza a chance matemática de se obter o NDVI alvo.

Obteve-se a CHMR de cada classe através da divisão da CMH da classe pelo maior valor de CHM obtido. Posteriormente com auxílio do programa Curve Expert relacionou-se os valores de CMHR ao NDVI médio de cada classe por meio de equações de regressão. Através das equações ajustadas foram obtidas as faixas de suficiência dos valores de NDVI e teores foliares de nutriente para cada relacionamento que possibilitou a obtenção dos valores de CHMR estimados de cada relacionamento.

LF: Limitante por falta ($CHMR < 70 \%$);

TS: Tendência a suficiente ($70 \% \leq CHMR < 90 \%$);

S: Suficiente ($90 \% \leq CHMR \leq 100 \%$),

A: Alto ($100 \% \geq CHMR > 90 \%$, à direita);

TE: Tendência a excessivo ($90 \% \geq CHMR > 70 \%$, à direita);

E: Excessivo ($CHMR < 70 \%$, à direita).

Foram também calculadas as frequências relativas (em %) de talhões em cada faixa de suficiência.

Para os relacionamentos com os atributos da fertilidade do solo da camada de 0 - 10 cm (pH H₂O, matéria orgânica, P (resina), K, Ca²⁺, Mg²⁺, S, Cu, Fe, Zn, Mn, B, saturação por bases (V), e de 10 - 20 cm (os mesmos, exceto os micronutrientes), procedeu-se de modo semelhante ao feito para os teores foliares dos nutrientes. Assim, o método CHMR foi utilizado para relacionar o NDVI com cada um desses atributos, de modo de modo a obter a classe de valores do atributo que maximaliza a chance matemática de se obter o NDVI alvo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

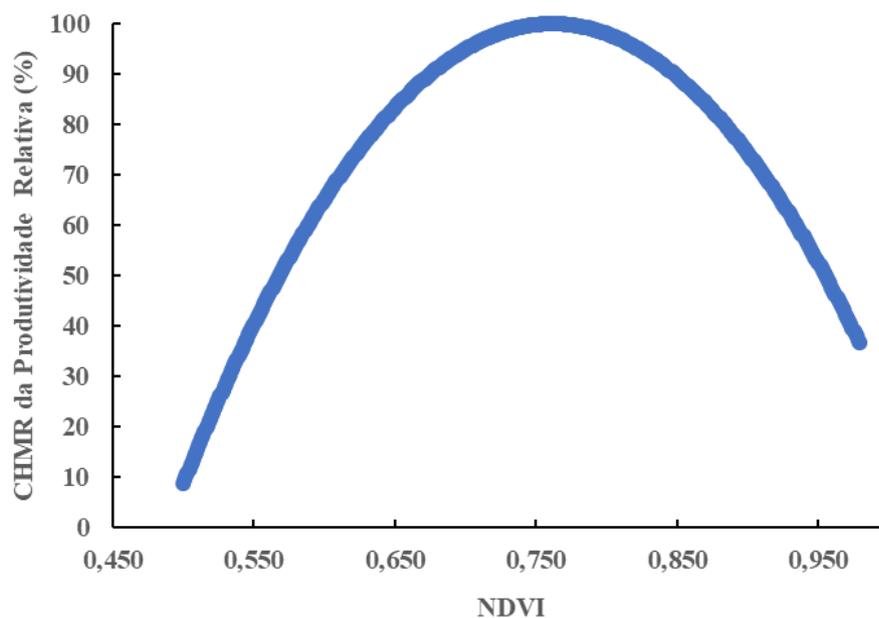
3.1. Relacionamento da Produtividade com o NDVI obtido na Fase 2 (“chumbinho”, amostragem Padrão)

A tabela 2 apresenta a equação ajustada para a chance matemática relativa (CHMR) da produtividade relativa dos talhões de café arábica em relação ao índice de vegetação NDVI. Esta relação foi significativa apresentando comportamento quadrático, com crescimento na faixa do NDVI entre 0,500 (CHMR estimado = 8,86 %) e 0,782 (CHMR estimado = 100%) e posterior decréscimo até o valor de NDVI de 0,997 (CHMR estimado = 30,30 %), sendo que a faixa de NDVI que corresponde a no mínimo 90% da CHMR estimada está entre 0,750 a 0,813 (Figura 2)

Tabela 2: Equação ajustada para a Chance Matemática Relativa da produtividade relativa em sc.ha^{-1} (y, %) em função do índice de vegetação NDVI (x) em lavouras irrigadas de café arábica.

| | Equação | R |
|------|-------------------------------------|-------|
| NDVI | $y = -526,96 + 1589,8x - 1044,1x^2$ | 0,843 |

Figura 2: Gráfico do relacionamento da CHMR de se ter a produtividade relativa P50% ou maior ($\geq 45,85 \text{ sc/ha}$) em função do NDVI obtidos na época de amostragem foliar padrão em lavouras irrigadas de café arábica.



Observou-se alta correlação entre o NDVI e a produtividade relativa sendo observado um R de 0,843. A correlação entre o NDVI e a produtividade foi observada em diversos trabalhos realizados em culturas como Trigo (Naser *et al.*, 2020), Milho (Peralta *et al.*, 2016) e cana-de-açúcar (Fernandes *et al.*, 2011; Mulianga *et al.*, 2013). Nogueira *et al.* (2018) avaliando a relação da produtividade com índices de vegetação obtidos através de imagens do satélite Landsat-8 para a cultura do café observou a existência de correlação entre o NDVI e a produtividade, obtendo-se um coeficiente de determinação (R^2) de 0,62 no ano de baixa produtividade e 0,89 no ano de alta produtividade das lavouras.

Desta forma podemos observar que o método da CHMR foi eficaz no relacionamento da produtividade relativa (%) em função do NDVI para a cultura do café arábica, possibilitando a obtenção das faixas de suficiência para os talhões estudados (Tabela 3).

Tabela 3: Faixas de suficiência do índice de vegetação NDVI obtidos na época de amostragem padrão em lavouras irrigadas de café arábica, nas mesorregiões do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba e Noroeste de Minas, Minas Gerais, com base no método da CHMR aplicado a produtividade relativa em $sc.ha^{-1}(\%)$.

| | LF: <70% | TS: 70 a 90% | S: 90 a 100% | A: 100 a 90% | TE: 90 a 70% | E: <70% |
|------|----------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------|
| NDVI | < 0,714 | 0,714 - 0,750 | 0,750 - 0,782 | 0,782 - 0,813 | 0,813 - 0,839 | ≥ 0,839 |

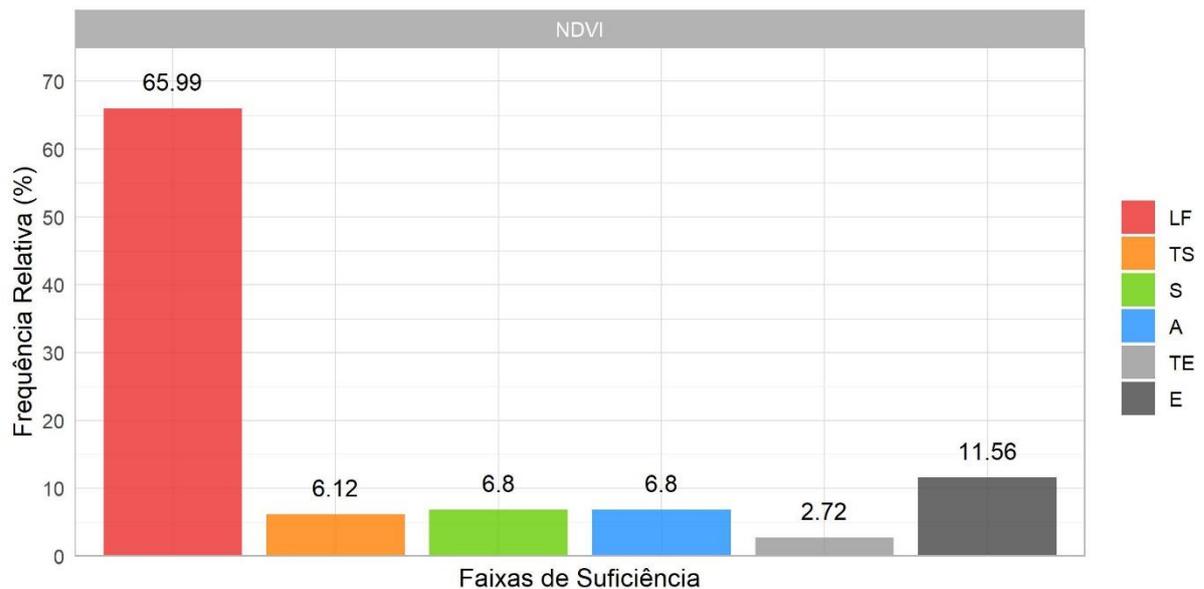
LF: Limitante por falta (CHMR <70%); **TS:** Tendência a suficiente (70%≤CHMR < 90%); **S:** Suficiente (90%≤CHMR≤100%), **A:** Alto (100%> CHMR ≥90%. à direita); **TE:** Tendência a excessivo (90% > CHMR ≥70%, à direita); **E:** Excessivo (CHMR <70%, à direita).

Os valores FR expostos na figura 3 mostram que 14,28 % (somatório dos valores das FR para as faixas TE + E) dos talhões estudados apresentam valores de NDVI maiores que a faixa adequada, já a soma das faixas (LF + TS) corresponde a 72,11 %, demonstrando que a maioria dos talhões apresentam valores de NDVI inferiores a faixa adequada, o que pode estar limitando a produtividade, considerando as faixas (S + A) que compreende 13,60 % dos talhões estudados, observamos que menos de 20 % dos talhões encontram-se na faixa considerada adequada.

O NDVI tem grande relação com o crescimento e produtividade das culturas, tendo em vista que este índice reflete tanto uma propriedade extensiva da planta (o Índice área foliar (IAF) quanto uma propriedade intensiva (qualidade da folha), considerando a qualidade da folha temos que nos atentar a dois fatores importantes, o conteúdo de água presente e a sua qualidade nutricional (Teixeira, 2018). Neste sentido alguns trabalhos têm demonstrado que a utilização de outros parâmetros além do IAF tem melhorado a capacidade preditiva dos modelos, segundo (Lourenço, 2012) houve um aumento de 30% na capacidade preditiva do modelo de regressão

múltipla para a produtividade da madeira na cultura do eucalipto ao incluir-se além do IAF, os teores foliares dos nutrientes e o conteúdo relativo de água na folha.

Figura 3: Frequências relativas (FR%) dos talhões nas faixas de suficiência do índice de vegetação NDVI obtidos na época de amostragem padrão em lavouras irrigadas de café arábica, nas mesorregiões do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba e Noroeste de Minas, Minas Gerais, com base no método da CHMR aplicado a produtividade relativa em $sc.ha^{-1}(\%)$.



LF: Limitante por falta; **TS:** Tendência a suficiente; **S:** Suficiente; **A:** Alto; **TE:** Tendência a excessivo; **E:** Excessivo.

Neste contexto buscou-se neste trabalho avaliar o relacionamento do NDVI em função dos teores foliares dos nutrientes para a cultura do café.

3.2. Relacionamento do NDVI com os Teores Foliares de Nutrientes obtidos na Fase 2 (“chumbinho”, amostragem Padrão)

O relacionamento entre o NDVI e os teores foliares de nutrientes, pelo método da CHMR possibilitou a obtenção das equações ajustadas para cada relacionamento (Tabela 4). Podemos observar que para todos os nutrientes obteve-se um bom ajuste demonstrando uma alta correlação positiva entre CHMR do NDVI e os teores dos macros e micronutrientes, tendo em vista os valores elevados de R que foram obtidos.

Tabela 4: Equações ajustadas para a CHMR do NDVI (y) em função dos teores foliares dos nutrientes (x) para folhas coletadas na época de amostragem padrão em lavouras irrigadas de café arábica.

| Nutrientes ¹ | Equação | R |
|-------------------------|--|-------|
| N | $y = -2167,7 + 140,42x - 2,1826x^2$ | 0,844 |
| P | $y = -2655,8 + 4584,4x - 1911,3x^2$ | 0,967 |
| K | $y = 93,2092 * \exp((-20,3762-x)^2) / (2 * 6,7447^2)$ | 0,942 |
| Ca | $y = 134,2 + 52,821x - 3,0418x^2$ | 0,907 |
| Mg | $y = 654,4226 + (-120,5373x) + (-1704,5876/x^2)$ | 0,969 |
| S | $y = 1477,3708 + (-540,3671x) + (-1320,0748/x^2)$ | 0,974 |
| Cu | $y = -190,35 + 51,655x - 2,3392x^2$ | 0,974 |
| Fe | $y = \exp(28,1884 + (-326,7149/x) + (-4,4439 \ln(x)))$ | 0,983 |
| Zn | $y = 1 / (0,2789 + (-0,0308x) + (0,00088x^2))$ | 0,999 |
| Mn | $y = 102,7558 * \exp((-108,9233-x)^2) / (2 * 48,5057^2)$ | 0,905 |
| B | $y = 99,3897 * \exp((-38,8647-x)^2) / (2 * 8,5668^2)$ | 0,917 |

¹ Macronutrientes expressos em (g/kg) e micronutrientes em (mg/kg).

A obtenção de curvas com R variando entre 0,844 e 0,996 demonstram a efetividade do método da CHMR para relacionar o NDVI com os teores foliares dos nutrientes, assim com as equações ajustadas foi possível obter as faixas de suficiência para os macros e micronutrientes (Tabela 5) e suas respectivas FR (Figura 4).

Para o N a FR nas faixas (LF + TS) mostram que cerca 36,06 % dos talhões de café arábica possuem teores abaixo de 29,90 g.kg⁻¹ o que causaria limitação do NDVI pela falta de N. Em contrapartida nas faixas (TE + E) mostram cerca de 21,77 % dos talhões apresentam teores de N acima de 33,92 g.kg⁻¹ o que poderia acarretar em limitação do NDVI em virtude de desequilíbrios entre outros nutrientes. Já as faixas (S + A) que representam cerca de 42,18 % dos talhões apresentam teores de N dentro da faixa adequada.

O N é o nutriente mais requerido na cultura do Café, tendo interferência no desenvolvimento e produtividade da cultura, este nutriente exerce diversas funções na planta, participando de processos bioquímicos, uma vez que é componente de muitos compostos orgânicos como as enzimas, coenzimas e ácidos nucleicos, tendo importante participação nos processos fisiológicos da planta (Muñoz-Huerta *et al.*, 2013). Além disto, o N é componente da clorofila

pigmento que tem grande influência no comportamento espectral da cultura e, consequentemente, interfere nos valores de NDVI. Diversos trabalhos na literatura têm mostrado uma alta correlação entre N e o NDVI em culturas como o trigo (Hassan *et al.*, 2019), arroz (Jiang *et al.*, 2021) e cana-de-açúcar (Molin *et al.*, 2010).

Para a cultura do café Solis-Pino *et al.* (2021) estudando a correlação do conteúdo de clorofila foliar do café arábica com os índices de vegetação obtidos de imagens multiespectrais, constatou uma alta correlação entre o NDVI e a clorofila foliar, obtendo uma correlação de $\rho=0,87$ com a clorofila a (Chl a) e $\rho=0,90$ para a clorofila B (Chl B).

Putra & Soni, (2018) em estudo buscando avaliar clorofila a e b, carotenoide e nitrogênio em plantações de café robusta usando uma câmera digital, observou que o NDVI apresentou coeficiente de determinação (R^2) de 0,779 para a estimativa de N a nível de plantas e 0,689 a nível de folhas, sendo o mesmo recomendado para estimar nível de nitrogênio das plantas de folhas largas como o café robusta.

Tabela 5: Faixas de suficiência¹ de teores² de nutrientes em folhas coletadas na época de amostragem padrão em lavouras irrigadas de café arábica, nas mesorregiões do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba e Noroeste de Minas, Minas Gerais, com base no método da CHMR aplicado ao índice NDVI.

| Nutrientes | LF: < 70% | TS: 70 a 90% | S: 90 a 100% | A: 100 a 90% | TE: 90 a 70% | E: <70% |
|------------|-----------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------|
| N | < 28,59 | 28,59 - 29,90 | 29,90 - 31,81 | 31,81 - 33,92 | 33,92 - 35,57 | ≥ 35,57 |
| P | < 1,09 | 1,09 - 1,13 | 1,13 - 1,20 | 1,20 - 1,27 | 1,27 - 1,31 | ≥ 1,31 |
| K | < 14,67 | 14,67 - 17,28 | 17,28 - 20,31 | 20,31 - 23,49 | 23,49 - 26,10 | ≥ 26,10 |
| Ca | < 6,52 | 6,52 - 7,44 | 7,44 - 8,63 | 8,63 - 9,97 | 9,97 - 11,18 | ≥ 11,18 |
| Mg | < 2,43 | 2,43 - 2,67 | 2,67 - 3,05 | 3,05 - 3,51 | 3,51 - 3,90 | ≥ 3,90 |
| S | < 1,47 | 1,47 - 1,56 | 1,56 - 1,70 | 1,70 - 1,86 | 1,86 - 1,98 | ≥ 1,98 |
| Cu | < 8,4 | 8,4 - 9,6 | 9,6 - 11,0 | 11,0 - 12,4 | 12,4 - 13,6 | ≥ 13,6 |
| Fe | < 50,5 | 50,5 - 59,6 | 59,6 - 73,2 | 73,2 - 92,2 | 92,2 - 113,0 | ≥ 113,0 |
| Zn | < 15,3 | 15,3 - 16,4 | 16,4 - 17,5 | 17,5 - 18,6 | 18,6 - 19,7 | ≥ 19,7 |
| Mn | < 68,0 | 68,0 - 86,7 | 86,7 - 108,5 | 108,5 - 131,2 | 131,2 - 149,9 | ≥ 149,9 |
| B | < 31,7 | 31,7 - 35,0 | 35,0 - 38,9 | 38,9 - 42,8 | 42,8 - 46,2 | ≥ 46,2 |

¹ LF: Limitante por falta (CHMR <70%); TS: Tendência a suficiente (70%≤CHMR < 90%); S: Suficiente (90%≤CHMR≤100%), A: Alto (100%> CHMR ≥90%, à direita); TE: Tendência a excessivo (90% > CHMR ≥70%, à direita); E: Excessivo (CHMR <70%, à direita).

² Macronutrientes expressos em (g/kg) e micronutrientes em (mg/kg).

Os valores da FR (%) para o K nos indicam que 6,12 % dos talhões apresentam teores menores que 17,28 g.kg⁻¹ contribuindo para valores de NDVI fora da faixa adequada. Porém

considerando a soma das FR's que possibilitam o NDVI estar dentro da faixa adequada obtemos 52,39 %, o que indica que mais de 50 % dos talhões de café estão dentro desta faixa. Já com o somatório das faixas (TE + E) cerca de 41,50 % dos talhões apresentam teores acima de 23,49 g.kg⁻¹ o que poderia estar ocasionando limitação do NDVI.

O K apresenta grande importância para a nutrição do cafeeiro sendo o segundo mais requerido pela planta, apresentando grande influência na fotossíntese, respiração e transporte de seiva. Este nutriente é translocado em grandes quantidades das folhas para os frutos além disto ele auxilia na regulação da abertura estomática interferindo na perda de água da cultura (Mesquita *et al.*, 2016).

Alguns autores tem obtido relação entre o NDVI e o K, Navarro (2012) observou correlação entre o NDVI e K em diferentes estádios de desenvolvimento da soja, já Guo *et al.* (2017) utilizando IV's para quantificar o K em macieiras obteve um valor R² de 0,77 para um modelo utilizando o NDVI. Entretanto para a cultura do café arábica não foi encontrado nenhum trabalho na literatura utilizando o NDVI para quantificar o teor foliar de K.

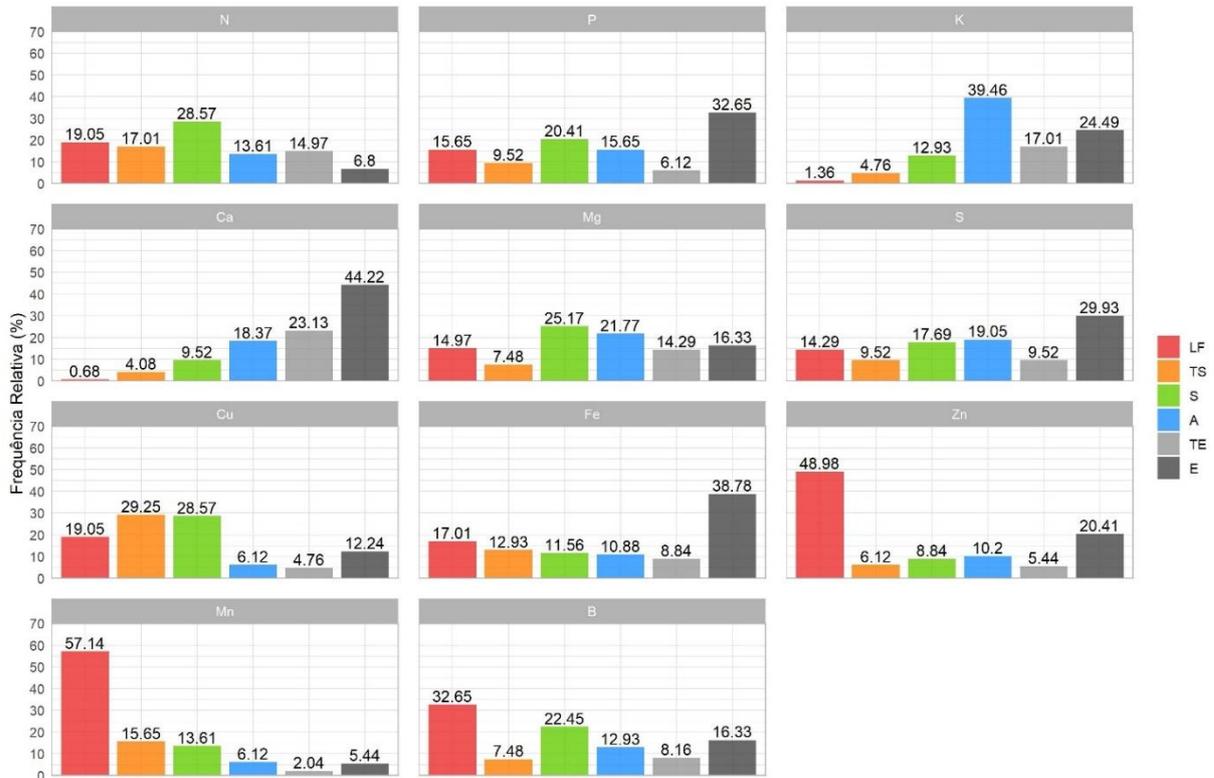
Cerca de 25,17 % dos talhões apresentam teores de P abaixo de 1,13 g.kg⁻¹ podendo haver limitações dos valores de NDVI. Já a soma das FR's dos teores de P que contribuem para que o NDVI esteja na faixa adequada (S + A) corresponde a cerca de 36,06 % dos talhões avaliados. Em contrapartida a maior porcentagem dos talhões, cerca 38,77 %, estão concentrados nas faixas (TE + E) com teores de P acima da faixa adequando considerando os valores de NDVI.

Para o Ca observa-se que a maioria dos talhões apresenta teores acima da faixa adequada levando em consideração o NDVI, a soma da FR's representa cerca de 67,35 % dos talhões. Por outro lado apenas 4,76 %, dos talhões apresentaram teores menores que 7,44 g.kg⁻¹ estando abaixo da faixa adequada. Já a faixa adequada (S + A) compreende cerca 27,89 % dos talhões.

O P é mais requerido na formação da lavoura de café sendo importante para o desenvolvimento radicular e a formação do lenho da cultura, já o Ca além de favorecer o crescimento radicular, também é importante na retenção de folhas, formação de proteínas, desenvolvimento de gemas e maturação dos frutos (Mesquita *et al.*, 2016).

O relacionamento da CHMR do NDVI em função dos teores foliares de Mg demonstra que apenas 22,45 % dos talhões apresentam teores inferiores a faixa adequada, enquanto a soma das faixas (TE + E) nos mostram que 30,62 % dos talhões estão acima da faixa adequada o que poderia acarretar em limitação de NDVI por excesso de Mg. Já as FR's das faixas (S + A) correspondem a 46,94 % o que mostra que quase 50 % dos talhões de café estão na faixa adequada.

Figura 4: Frequências relativas (FR%) dos talhões nas faixas de suficiência de teores de nutrientes em folhas coletadas na época de amostragem padrão em lavouras irrigadas de café arábica, nas mesorregiões do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba e Noroeste de Minas, Minas Gerais, com base no método da CHMR aplicado ao índice NDVI.



LF: Limitante por falta; **TS:** Tendência a suficiente; **S:** Suficiente; **A:** Alto; **TE:** Tendência a excessivo; **E:** Excessivo.

Para o S observamos que 42,04 % dos talhões possuem teores superiores a $1,86 \text{ g.kg}^{-1}$ estando assim acima da faixa adequada, já o somatório das faixas (S + A) corresponde a cerca de 36,62 % dos talhões de café, enquanto cerca 21,35 % dos talhões estão abaixo da faixa adequada levando em consideração os valores de NDVI.

Para a cultura do café o Mg tem diversas funções, principalmente na fotossíntese por ser um dos constituintes da clorofila, já o S apresenta funções estruturais em proteínas e compõem alguns aminoácidos participando de funções metabólicas na planta, além disso é importante para a síntese de clorofila e desenvolvimento de raízes (Mesquita *et al.*, 2016).

Para os micronutrientes Cu, Fe, Zn, Mn e B o somatório das FR's nas faixas (S + A) foram 34,69 %, 22,44 %, 19,04 %, 19,73 %, 35,38 % respectivamente, porcentagens que correspondem aos talhões em que os teores de nutrientes estão dentro da faixa adequada baseando-se nos valores de NDVI.

Para as faixas (LF + TS) as FR's obtidas foram relativamente altas, 48,30 %, 29,94 %, 55,10 %, 72,79 %, 40,13 % para Cu, Fe, Zn, Mn e B respectivamente, estes talhões apresentaram teores inferiores a faixa adequada o que poderia estar limitando o NDVI por deficiência nutricional da cultura.

Nas faixas (TE + E) as FR's foram 17,00 %, 47,62 %, 25,85 %, 7,48 %, 24,49 %, para Cu, Fe, Zn, Mn e B respectivamente, porcentagem dos talhões que apresentam teores de nutricionais acima da faixa adequada podendo causar desequilíbrio nutricional a cultura.

Dentre os micronutrientes o B e o Zn, apesar de serem absorvidos em pequenas quantidades, são os que causam maior limitação na produção da cultura do café. O B age na divisão celular, regulando a síntese das paredes celulares, já o Zn apresenta papel importante no pegamento da florada e nos tamanhos dos frutos (Mesquita *et al.*, 2016).

Com a obtenção dos teores de nutrientes correspondentes às faixas de suficiência, podemos comparar os resultados obtidos neste estudo com outros valores obtidos em diferentes trabalhos presentes na literatura. A faixa adequada (S + A) dos teores de N, K e S encontradas neste trabalho corrobora com os teores obtidos pelos demais autores (Tabela 6). Entretanto Para o Zn os teores da faixa adequada foram superiores aos obtidos por Malavolta, (1993), porém são semelhantes para os demais autores.

Tabela 6: Faixas adequadas (Suficiente + Alta) de teores de macro e micronutrientes em folhas de cafeeiro, recomendadas por diferentes autores em comparação ao proposto por este estudo.

| Nutrientes | Autores | | | | | Presente Trabalho |
|--------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-------------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| -----g.kg ⁻¹ ----- | | | | | | |
| N | 27,00 - 32,00 | 29,00 - 32,00 | 30,00 - 35,00 | 28,70 - 37,60 | 28,55 - 36,42 | 29,90 - 33,92 |
| P | 1,50 - 2,00 | 1,60 - 1,90 | 1,20 - 2,00 | 1,20 - 2,00 | 1,07 - 1,96 | 1,13 - 1,27 |
| K | 19,00 - 24,00 | 22,00 - 25,00 | 18,00 - 25,00 | 20,00 - 29,10 | 20,87 - 31,46 | 17,28 - 23,49 |
| Ca | 10,00 - 14,00 | 13,00 - 15,00 | 10,00 - 15,00 | 9,90 - 14,00 | 9,87 - 14,90 | 7,44 - 9,97 |
| Mg | 3,10 - 3,60 | 4,00 - 4,50 | 3,50 - 5,00 | 2,90 - 5,10 | 3,86 - 6,35 | 2,67 - 3,51 |
| S | 1,50 - 2,00 | 1,50 - 2,00 | 1,50 - 2,00 | 1,05 - 1,70 | 1,08 - 2,16 | 1,56 - 1,86 |
| -----mg.kg ⁻¹ ----- | | | | | | |
| Cu | 8,0 - 16,0 | 11,0 - 14,0 | 10,0 - 50,0 | 14,6 - 32,9 | 10,6 - 26,7 | 9,6 - 12,4 |
| Fe | 90,0 - 180,0 | 100,0 - 130,0 | 100,0 - 200,0 | 52,5 - 127,3 | 30,8 - 62,8 | 59,6 - 92,2 |
| Zn | 8,0 - 16,0 | 15,0 - 20,0 | 10,0 - 20,0 | 7,4 - 20,6 | 12,0 - 31,9 | 16,4 - 18,6 |
| Mn | 120,0 - 210,0 | 80,0 - 100,0 | 50,0 - 100,0 | 106,1 - 223,3 | 133,3 - 376,6 | 86,7 - 131,2 |
| B | 59,0 - 60,0 | 50,0 - 60,0 | 40,0 - 80,0 | 37,8 - 64,8 | 38,1 - 100,9 | 35,0 - 43,8 |

Fontes: 1. Malavolta, (1993); 2. Malavolta *et al.* (1997); 3. Matiello (1997); 4. Martinez *et al.* (2003); 5. Mendonça (2016).

Para alguns nutrientes a faixa adequada obtida foi menor do que as obtidas por alguns autores: Para o Mg a faixa obtida foi menor que a sugerida por Malavolta *et al.* (1997) e Mendonça (2016), entretanto foi semelhante aos demais autores, enquanto para o P e B as faixas obtidas foram menores que as observadas Malavolta 1993, Malavolta 1997, porém corrobora com os resultados dos demais autores.

O Cu apresentou uma faixa adequada menor somente da faixa encontrada por Martinez *et al.* (2003), já o Ca a faixa obtida foi menor que a sugerida por Malavolta *et al.* (1997); Matiello, (1997) e Malavolta, (1993), entretanto é semelhante aos demais autores. Para o Mn a faixa adequada obtida foi menor que a faixa observada por Mendonça 2016, porém semelhante aos demais autores.

De maneira geral as faixas de teores de nutrientes foliares obtidos utilizando o método da CHMR demonstrou grande similaridade com os trabalhos presentes na literatura, exemplificando a capacidade do método de prever as faixas de suficiência em lavouras comerciais, possibilitando sua utilização para o manejo nutricional adequado da cultura do café arábica.

A amostragem padrão atualmente utilizada para diagnose nutricional do cafeeiro, é realizada geralmente entre os meses de novembro e janeiro sendo a coleta realizada antes do início da expansão rápida dos frutos, denominada época do chumbinho, isto ocorre pois neste período a demanda nutricional pelos frutos do café ainda é baixa, resultando em uma menor oscilação dos teores de nutrientes presentes nas folhas (Laviola, 2004).

Entretanto alguns trabalhos realizados utilizando o sensoriamento remoto visando obter estimativas da produtividade tem observado uma maior relação com a fase anterior a época do chumbinho. De Azevedo Silva *et al.* (2021) utilizando imagens do Landsat-8 para estimativas de produtividade para café arábica, concluiu que a melhor época para estimar a produtividade de café arábica com irrigação por pivô central foram os meses de julho e setembro. Resultados semelhantes foram observados por Nogueira *et al.* (2018) onde os meses de julho e agosto obtiveram maior correlação com a produtividade, e Bernardes *et al.* (2012) que obteve maior correlação do NDVI com a produtividade nos meses de agosto e setembro.

Neste contexto, buscou-se neste estudo analisar o relacionamento da Produtividade Relativa em função do NDVI e o NDVI em função dos teores foliares dos nutrientes, considerando as amostragens na fase 1.

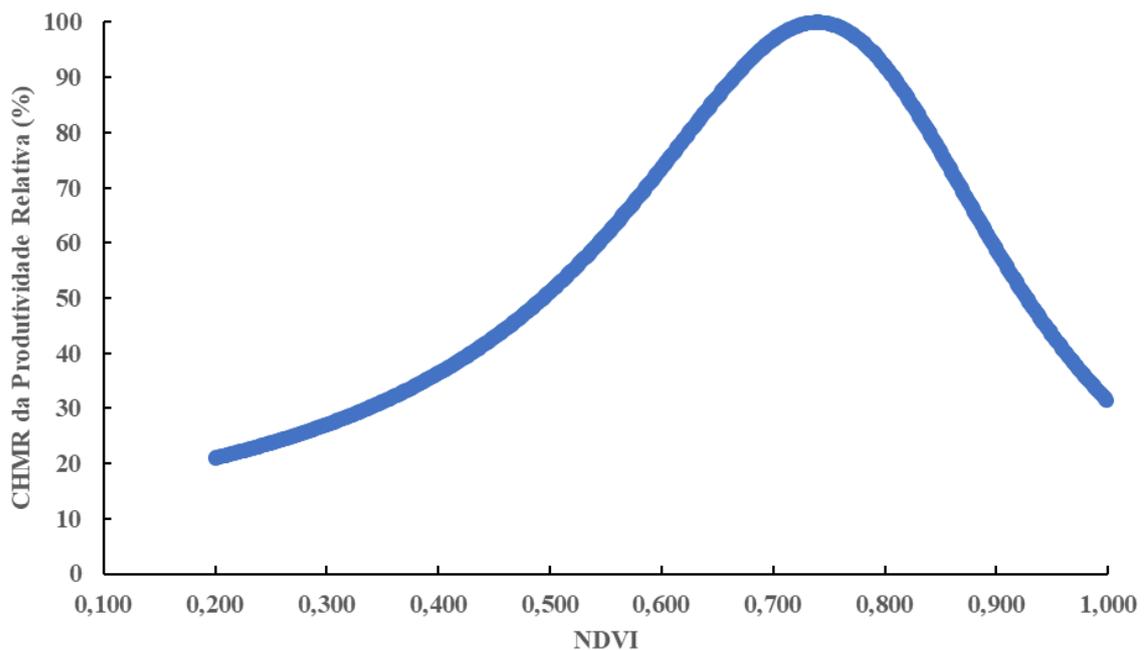
3.3. Relacionamento da Produtividade com o NDVI e do NDVI com os Teores Foliare de Nutrientes obtidos na Fase 1

A utilização do método da CHMR possibilitou a obtenção da equação ajustada do relacionamento da produtividade relativa em função do NDVI (Tabela 7) na fase 1. Este relacionamento foi significativo apresentando um crescimento na faixa do NDVI de 0,300 (CHMR estimado = 27,07 %) a 0,738 (CHMR estimado = 100%) com subsequente decréscimo até o valor de NDVI de 0,999 (CHMR estimado = 33,44 %), sendo que a faixa de NDVI entre 0,665 a 0,808 corresponde a no mínimo 90% da CHMR estimada (Figura 5).

Tabela 7: Equação ajustada para a Chance Matemática Relativa da produtividade relativa em $sc.ha^{-1}(y, \%)$ em função do índice de vegetação NDVI (x) obtido na fase 1 de amostragem foliar em lavouras irrigadas de café arábica.

| | Equação | R |
|------|--|-------|
| NDVI | $y = (12,6989 - 8,2888x) / (1 - 2,4171x + 1,57254x^2)$ | 0,854 |

Figura 5: Gráfico do relacionamento da CHMR de se ter a produtividade relativa P50% ou maior ($\geq 50,89 sc/ha$) em função do NDVI obtidos na fase 1 de amostragem foliar em lavouras irrigadas de café arábica.



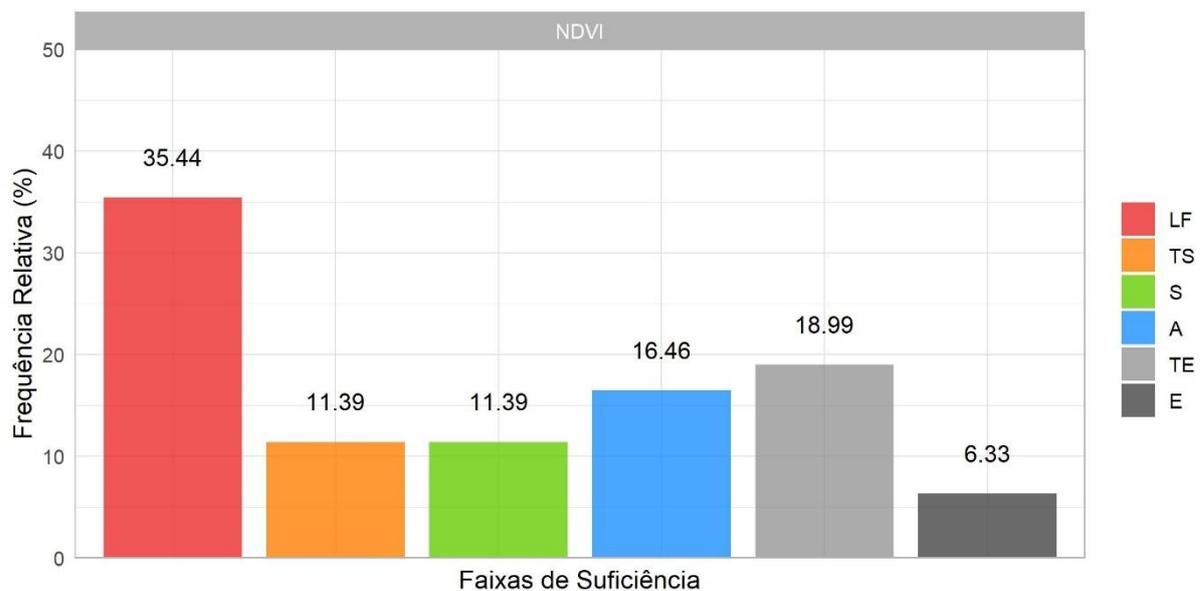
A obtenção da curva do relacionamento da produtividade relativa em função do NDVI permitiu a elaboração das faixas de suficiência (Tabela 8) e a obtenção das frequências relativas (Figura 6), o somatório das faixas (LF + TS) corresponde a 46,83 % mostrando que cerca de 40 % dos talhões apresentam valores de NDVI abaixo da faixa adequada, o que pode ser limitante para a produtividade dos talhões. Já a soma das faixas (TE + E) nos mostra que 25,32 % dos talhões possuem valores de NDVI superiores a faixa adequada, enquanto a soma das faixas (S + A) corresponde a 27,85 % representando os talhões de café que possuem valores dentro da faixa adequada.

Tabela 8: Faixas de suficiência do índice de vegetação NDVI obtidos na época de amostragem correspondente a fase 1 em talhões de café arábica, nas mesorregiões do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba e Noroeste de Minas, Minas Gerais, com base no método da CHMR aplicado a produtividade Relativa de $sc.ha^{-1}(\%)$ e respectivas frequências relativas (FR%) dos talhões.

| | LF: <70% | TS: 70 a 90% | S: 90 a 100% | A: 100 a 90% | TE: 90 a 70% | E: <70% |
|------|----------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------------|
| NDVI | < 0,586 | 0,586 - 0,665 | 0,665 - 0,738 | 0,738 - 0,808 | 0,808 - 0,869 | $\geq 0,869$ |

LF: Limitante por falta (CHMR <70%); **TS:** Tendência a suficiente (70% \leq CHMR < 90%); **S:** Suficiente (90% \leq CHMR \leq 100%), **A:** Alto (100% $>$ CHMR \geq 90%. à direita); **TE:** Tendência a excessivo (90% $>$ CHMR \geq 70%, à direita); **E:** Excessivo (CHMR <70%, à direita).

Figura 6: Frequências relativas (FR%) dos talhões nas faixas de suficiência do índice de vegetação NDVI obtidos na fase 1 de amostragem foliar em lavouras irrigadas de café arábica, nas mesorregiões do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba e Noroeste de Minas, Minas Gerais, com base no método da CHMR aplicado a produtividade relativa em $sc.ha^{-1}(\%)$



LF: Limitante por falta; **TS:** Tendência a suficiente; **S:** Suficiente; **A:** Alto; **TE:** Tendência a excessivo; **E:** Excessivo.

Comparando as fases de amostragem podemos observar que na fase 1 houve uma melhor distribuição dos talhões dentro das faixas de suficiência, em relação a fase 2, tendo em vista que houve uma redução da FR de talhões na faixa de LF na fase 1 em relação a fase 2 (Figura 3 e 6), proporcionando uma redução dos talhões com valores de NDVI abaixo da faixa adequada. Houve um aumento da FR relativa na faixa adequada na fase 1 em relação a fase 2 com as FR obtidas de 27,85 % e 13,60 % respectivamente, o mesmo pode ser observado para os talhões acima da faixa adequada com a fase 1 apresentando 25,32 % e a fase 2 14,28 % dos talhões.

Para o relacionamento entre o NDVI e os teores foliares de nutrientes, o método da CHMR possibilitou a obtenção das equações ajustadas para cada relacionamento (Tabela 9), para todos os nutrientes obteve-se uma correlação positiva satisfatória, tendo em vista que os R variando obtidos variou de 0,706 e 0,981 demonstrando a efetividade do método da CHMR para relacionar o NDVI com os teores foliares dos nutrientes.

Tabela 9: Equações ajustadas para a CHMR do NDVI (y) em função de teores foliares de nutrientes (x) para folhas coletadas em amostragem na fase 1 em talhões de café arábica.

| Nutrientes ¹ | Equação | R |
|-------------------------|--|-------|
| N | $y = 90,3801 * \exp((- (37,6462 - x)^2) / (2 * 5,0188^2))$ | 0,901 |
| P | $y = 75,1668 * \exp((- (1,2089 - x)^2) / (2 * 0,2337^2))$ | 0,728 |
| K | $y = 93,0386 * \exp((- (25,6960 - x)^2) / (2 * 5,7859^2))$ | 0,863 |
| Ca | $y = 108,6700 * \exp((- (13,1681 - x)^2) / (2 * 7,1268^2))$ | 0,977 |
| Mg | $y = 87,8875 * \exp((- (3,6148 - x)^2) / (2 * 0,6364^2))$ | 0,947 |
| S | $y = 67,3693 * \exp((- (1,6029 - x)^2) / (2 * 0,4110^2))$ | 0,706 |
| Cu | $y = 7,5300 * (0,93075^x) * (x^{1,2586})$ | 0,793 |
| Fe | $y = 69,9619 * \exp((- (104,4107 - x)^2) / (2 * 31,6536^2))$ | 0,803 |
| Zn | $y = 118,1764 * \exp((- (24,0820 - x)^2) / (2 * 8,7177^2))$ | 0,975 |
| Mn | $y = 94,7718 * \exp((- (112,8910 - x)^2) / (2 * 58,2794^2))$ | 0,903 |
| B | $y = 125,3140 * \exp((- (49,2675 - x)^2) / (2 * 11,9567^2))$ | 0,981 |

¹ Macronutrientes expressos em (g/kg) e micronutrientes em (mg/kg).

Com as equações ajustadas foi possível obter as faixas de suficiência para os nutrientes (Tabela 10), sendo calculada as FR's para cada um dos macros e micronutrientes (Figura 7). Observou-se para o N que cerca de 82,28 % dos talhões possuem teores abaixo da faixa adequada o que poderia estar limitando o NDVI por deficiência de N, enquanto apenas 1,27 % dos talhões apresentam teores de N acima desta faixa, já 16,44 % apresentam valores dentro da faixa considerada adequada. Para o P 51,90 % dos talhões apresentaram teores acima da faixa adequada, 34,18 % apresentaram teores dentro da faixa ideal e apenas 13,92 % dos talhões possuem teores de P abaixo da faixa adequada podendo limitar o NDVI pela deficiência de P.

O relacionamento da CHMR do NDVI em função dos teores foliares de K nos mostram que 82,28 % dos talhões possuem os teores abaixo da faixa adequada, 7,59 % dos talhões encontram-se dentro desta faixa, e apenas 10,13 % possuem teores acima da faixa adequada o que poderia estar limitando o NDVI por excesso de K, causando desequilíbrio nutricional. Já para o Ca a maioria dos talhões apresentam teores dentro da faixa adequada representando 56,96 %, 41,77 % apresentam teores acima desta faixa, e somente 1,27 % dos talhões apresentam teores de Ca inferiores a faixa adequada podendo limitar o NDVI por deficiência de Ca.

Tabela 10: Faixas de suficiência¹ de teores² de nutrientes em folhas coletadas na época de amostragem correspondente a fase 1 em lavouras irrigadas de café arábica, nas mesorregiões do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba e Noroeste de Minas, Minas Gerais, com base no método da CHMR aplicado ao índice NDVI e respectivas frequências relativas (FR%) dos talhões.

| Nutrientes | LF: < 70% | TS: 70 a 90% | S: 90 a 100% | A: 100 a 90% | TE: 90 a 70% | E: <70 % |
|------------|-----------|---------------|---------------|---------------|---------------|----------|
| N | < 33,41 | 33,41 - 35,35 | 35,35 - 37,60 | 37,60 - 39,95 | 39,95 - 41,89 | ≥ 41,89 |
| P | < 1,02 | 1,02 - 1,11 | 1,11 - 1,21 | 1,21 - 1,32 | 1,32 - 1,41 | ≥ 1,41 |
| K | < 20,81 | 20,81 - 23,04 | 23,04 - 25,64 | 25,64 - 28,36 | 28,36 - 30,59 | ≥ 30,59 |
| Ca | < 7,15 | 7,15 - 9,90 | 9,90 - 13,10 | 13,10 - 16,44 | 16,44 - 19,19 | ≥ 19,19 |
| Mg | < 3,08 | 3,08 - 3,33 | 3,33 - 3,61 | 3,61 - 3,91 | 3,91 - 4,16 | ≥ 4,16 |
| S | < 1,26 | 1,26 - 1,42 | 1,42 - 1,60 | 1,60 - 1,80 | 1,80 - 1,95 | ≥ 1,95 |
| Cu | < 7,5 | 7,5 - 11,4 | 11,4 - 17,4 | 17,4 - 25,8 | 25,8 - 34,3 | ≥ 34,3 |
| Fe | < 77,7 | 77,7 - 89,9 | 89,9 - 104,1 | 104,1 - 118,9 | 118,9 - 131,2 | ≥ 131,2 |
| Zn | < 16,8 | 16,8 - 20,1 | 20,1 - 23,9 | 23,9 - 28,1 | 28,1 - 31,5 | ≥ 31,5 |
| Mn | < 63,7 | 63,7 - 86,1 | 86,1 - 112,3 | 112,3 - 139,6 | 139,6 - 162,1 | ≥ 162,1 |
| B | < 39,2 | 39,2 - 43,8 | 43,8 - 49,2 | 49,2 - 54,8 | 54,8 - 59,4 | ≥ 59,4 |

¹ LF: Limitante por falta (CHMR <70%); TS: Tendência a suficiente (70%≤CHMR < 90%); S: Suficiente (90%≤CHMR≤100%), A: Alto (100%> CHMR ≥90%, à direita); TE: Tendência a excessivo (90% > CHMR ≥70%, à direita); E: Excessivo (CHMR <70%, à direita).

² Macronutrientes expressos em (g/kg) e micronutrientes em (mg/kg).

Para o Mg 43,03 % dos talhões possuem teores acima da faixa ideal, 30,37 % dos talhões apresentam teores de Mg inferiores a faixa adequada, podendo causar limitações por deficiência e 26,58 % dos talhões possuem teores dentro da faixa ideal, levando em consideração o NDVI. Os valores da FR (%) para o S, mostram que 20,26 % dos talhões podem estar limitando o NDVI por possuírem teores menores que a faixa adequada, enquanto 45,57 % possuem teores dentro desta faixa e cerca de 34,18 % apresentam teores superiores a faixa ideal.

Figura 7: Frequências relativas (FR%) dos talhões nas faixas de suficiência de teores de nutrientes em folhas coletadas na fase 1 de amostragem foliar em lavouras irrigadas de café arábica, nas mesorregiões do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba e Noroeste de Minas, Minas Gerais, com base no método da CHMR aplicado ao índice NDVI.



LF: Limitante por falta; **TS:** Tendência a suficiente; **S:** Suficiente; **A:** Alto; **TE:** Tendência a excessivo; **E:** Excessivo.

Para os micronutrientes Cu, Fe, Zn, Mn e B a soma dos talhões que apresentam teores abaixo da faixa ideal correspondem a 22,78 %, 2,54 %, 18,99 %, 17,72 % e 13,92 % respectivamente, já para os talhões com teores dentro da faixa adequada o somatório das FR's correspondem a 31,65 %, 5,06 %, 12,66 %, 34,16 %, 18,99 % para Cu, Fe, Zn, Mn e B respectivamente, enquanto para Cu, Fe, Zn, Mn e B o somatório dos talhões que apresentam teores de nutrientes acima da faixa ideal foram 45,57 %, 92,40 %, 68,36 %, 40,10 %, 67,09 %, respectivamente, podendo causar desequilíbrio nutricional na cultura.

Observando as faixas de suficiência com teores considerados adequados, temos que a faixa considerada adequada para a fase 1 (Tabela 8) foram maiores para os nutrientes N, K, Ca, Mg, Fe, Zn e B em relação as faixas de teores adequados obtida na fase 2 (Tabela 5), enquanto que para os nutrientes P, S, Cu e Mn as faixas de teores adequadas foram maior na fase 2 em comparação a fase 1, essa variação ocorre devido a mudança de concentração dos nutrientes na folha durante o ciclo da cultura. Para os nutrientes N, K, Ca, Mg, Fe, Zn e B há um decréscimo na concentração dos teores foliares dos nutrientes no período compreendido entre o florescimento e o fim da fase de chumbinho, enquanto que para P, S, Cu e Mn há uma aumento na concentração dos teores de nutrientes foliares neste período (Laviola, 2007).

Assim podemos constatar que o método da CHMR foi efetivo para relacionar a produtividade relativa em função do NDVI e o NDVI em função dos teores de nutrientes foliares obtidos na fase 1 de amostragem permitindo ao produtor a utilização desta época de amostragem para avaliação do estado nutricional da cultura do café, possibilitando uma avaliação precoce dentro do ano safra do estado nutricional da lavoura melhorando a tomada de decisão para um melhor manejo nutricional.

Deste modo buscando alternativas para auxiliar no manejo nutricional da cultura do café, buscou-se avaliar o relacionamento do NDVI obtido na época de amostragem padrão com os atributos químicos do solo.

3.4. Relacionamento do NDVI com os atributos químicos do solo

A utilização do método da CHMR permitiu a obtenção de equações de regressão ajustadas para o relacionamento do NDVI das lavouras na fase 2 (“chumbinho”) em função dos atributos químicos do solo na profundidade de 0 - 10 cm (Tabela 11). Analisando os resultados obtidos notamos que houve uma alta correlação positiva entre a CHMR do NDVI e os atributos, observando um bom ajuste levando consideração os valores de R obtidos.

A utilização do método da CHMR mostrou eficácia para o relacionamento do NDVI com os atributos químicos do solo na profundidade de 0 - 10 cm, uma vez que os valores de R obtidos variaram de 0,858 a 0,996, permitindo a elaboração das faixas de suficiência para os atributos químicos do solo (Tabela 12) e suas respectivas Frequências Relativa (FR) (Figura 8).

Observando o somatório das frequências relativas para o pH do solo na camada de 0 - 10 cm nota-se que 25,85 % dos talhões apresentam valores de pH abaixo da faixa considerada adequada, podendo limitar os valores de NDVI pela acidez do solo, já os talhões que apresentam valores de pH superior a faixa ideal, corresponde a apenas 14,29 % do total, enquanto 59,86 % apresentam valores de pH dentro da faixa adequada considerando o NDVI.

Tabela 11: Equações ajustadas para a CHMR do NDVI (y) obtido na época de amostragem foliar padrão em função de atributos químicos do solo (x) na profundidade de 0 - 10 cm em talhões de café arábica.

| Atributos químicos ¹ | Equação | R |
|---------------------------------|--|-------|
| pH | $y = -1748,9005 + 610,0855x + (-50,2587x^2)$ | 0,994 |
| MO | $y = \exp(27,2398 + (-116,4822/x) + (-5,6390\ln(x)))$ | 0,858 |
| P | $y = 19,795*(0,97837^x)*(x^{0,650324})$ | 0,940 |
| K | $y = (0,18258 + 27,42268x) / (1 + (-0,46730x) + 0,14660x^2)$ | 0,920 |
| Ca | $y = (-6,75120 + 0,64241x) / (1 + (-0,04128x) + 0,00053x^2)$ | 0,949 |
| Mg | $y = 1 / (0,08050 + (-0,00738x) + 0,00019x^2)$ | 0,984 |
| S | $y = \exp(12,13928 + (-28,72477) / x + (-2,09841\ln(x)))$ | 0,977 |
| Cu | $y = \exp(5,04584 + (-0,49024/x) + (-0,55886\ln(x)))$ | 0,981 |
| Fe | $y = -19,02721 + 7,59903x + (-0,11410x^2)$ | 0,996 |
| Zn | $y = 700,10565*(0,90420^x)*(x^{0,53629})$ | 0,948 |
| B | $y = 168,31709 + (-91,11650x) + (-6,34710/x^2)$ | 0,910 |
| V | $y = -746,55138 + 26,95506x + (-0,21464x^2)$ | 0,901 |

¹: pH: em H₂O; MO: (Matéria Orgânica) expressa em dag/kg; Ca e Mg: em cmol_c/dm³; P, K, S, Cu, Fe, Zn e B: em mg/dm³ e V (Saturação por bases): em %.

A faixa considerada adequada para o pH variou de 5,62 a 6,53 sendo considerado como valor ótimo 6,06, os valores obtidos para a faixa adequada neste estudo estão compreendidos entre as classes “Bom” e “alto” de acordo com a classificação da CFSEMG (Ribeiro *et al.*, 1999), sendo o nível ótimo compreendido dentro da classe denominada “boa”. Entretanto a faixa obtida neste estudo está dentro da faixa de pH de 5,0 e 6,5 que, de acordo com Kupper (1983), permite um bom desenvolvimento da cultura do café.

O somatório das FR's (BA + M) mostram que os talhões que apresentaram teores de MO inferiores a faixa considerada adequada é de apenas 4,76 %, enquanto que na FR (MA) aproximadamente 83,67 % dos talhões, apresentam teores acima da faixa adequada em relação ao NDVI, já o somatório das FR's (B+A) nos mostra que 11,56 % dos talhões apresentaram teores dentro da faixa considerada adequada.

A faixa de teores de MO considerada ideal levando em consideração o NDVI varia de 2,23 a 3,28 dag/kg sendo considerado o nível ótimo 2,67 dag/kg, estes resultados estão abaixo do nível crítico sugerido pela CFSEMG (Ribeiro *et al.*, 1999), seguindo esta classificação a faixa

ideal e nível ótimo obtidas são enquadrados na classe “média” (2,01 a 4,00 dag/kg), cabe destacar que esta classificação proposta pela CFSEMG não é específica para a cultura do café. Entretanto, resultados similares foram obtidos por Malavolta (1986), considerando adequado para a cultura do café a faixa de 2,0 a 3,0 dag/kg de MO em um solo de textura argilosa.

Tabela 12: Faixas de suficiência¹ de teores² de atributos químicos do solo na camada de 0 - 10 cm em lavouras irrigadas de café arábica, nas mesorregiões do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba e Noroeste de Minas, Minas Gerais, com base no método da CHMR aplicado ao índice NDVI obtido na época padrão de amostragem foliar.

| Atributos Químicos | BA: < 70% | M: 70 a 90% | B: 90 a 100% | A: 100 a 90% | MA: < 90% |
|--------------------|-----------|---------------|----------------|-----------------|-----------|
| pH | < 5,29 | 5,29 - 5,62 | 5,62 - 6,06 | 6,06 - 6,53 | ≥ 6,53 |
| MO | < 1,92 | 1,92 - 2,23 | 2,23 - 2,67 | 2,67 - 3,28 | ≥ 3,28 |
| P | < 8,40 | 8,40 - 15,90 | 15,90 - 29,40 | 29,40 - 50,00 | ≥ 50,00 |
| K | < 57,87 | 57,87 - 76,24 | 76,24 - 101,66 | 101,66 - 136,85 | ≥ 136,85 |
| Ca | < 3,75 | 3,75 - 3,86 | 3,86 - 4,46 | 4,46 - 5,22 | ≥ 5,22 |
| Mg | < 1,44 | 1,44 - 1,67 | 1,67 - 1,90 | 1,90 - 2,15 | ≥ 2,15 |
| S | < 8,10 | 8,10 - 10,20 | 10,20 - 13,60 | 13,60 - 19,20 | ≥ 19,20 |
| Cu | < 0,34 | 0,34 - 0,51 | 0,51 - 0,87 | 0,87 - 1,74 | ≥ 1,74 |
| Fe | < 16,50 | 16,50 - 23,60 | 23,60 - 33,10 | 33,10 - 43,10 | ≥ 43,10 |
| Zn | < 1,30 | 1,30 - 2,70 | 2,70 - 5,30 | 5,30 - 9,40 | ≥ 9,40 |
| B | < 0,30 | 0,30 - 0,37 | 0,37 - 0,52 | 0,52 - 0,77 | ≥ 0,77 |
| V | < 51,00 | 51,00 - 56,00 | 56,00 - 62,70 | 62,70 - 69,70 | ≥ 69,70 |

¹BA: Baixa (CHMR < 70%); M: Média (70% ≤ CHMR < 90%); B: Boa (90% ≤ CHMR ≤ 100%), A: Alta (100% > CHMR ≥ 90%, à direita); MA: Muito alta (CHMR < 90%, à direita).

²: pH: em H₂O; MO: (Matéria Orgânica) expressa em dag/kg; Ca e Mg: em cmol./dm³; P, K, S, Cu, Fe, Zn e B: em mg/dm³ e V (Saturação por bases): em %.

Para P no solo e visando a comparação entre os valores obtidos nesse trabalho e os da Comissão de Fertilidade do Solo de MG para a cultura do café, os teores de P-resina foram divididos pelo fator 2,46 (fator proposto por Neves¹ para solos argilosos) e assim convertidos em P-Mehlich-1.

Observando o somatório das FR's para o P do solo na camada de 0 - 10 cm notamos que apenas 6,80 % dos talhões apresentam teores inferiores a faixa considerada adequada, enquanto que aproximadamente 67,35 % dos talhões apresentaram teores de P acima da faixa adequada

¹Prof. Júlio César Lima Neves – Departamento de solos – UFV – (Comunicação pessoal)

levando em consideração o NDVI, já a FR dos talhões que se encontram dentro da faixa ideal corresponde a 25,85 %.

Neste estudo a faixa considerada adequada obtida) para o P foi de 7,83 a 24,63 mg/dm³ tendo como nível ótimo 14,48 mg/dm³, considerando a classificação da CFSEMG (Ribeiro *et al.*, 1999) a faixa de teores adequada obtida abrange as classes “médio” (6,30 a 8,50 mg/dm³), “alta” (8,60 a 13,10 mg/dm³) e “muito alta” (> 13,10 mg/dm³), enquanto que o nível ótimo obtido está inserido na classe “muito alta”, sendo superior ao nível crítico de 9,00 mg/dm³ sugerido por esta classificação.

Para o K observamos que 14,29 % dos talhões apresentam teores acima da faixa considerada adequada podendo causar limitação do NDVI por excesso de K, já a faixa considerada adequada neste estudo compreende cerca 41,50 % dos talhões, enquanto 44,22 % dos talhões estudados apresentam teores inferiores a faixa considerada adequada levando em consideração os valores de NDVI.

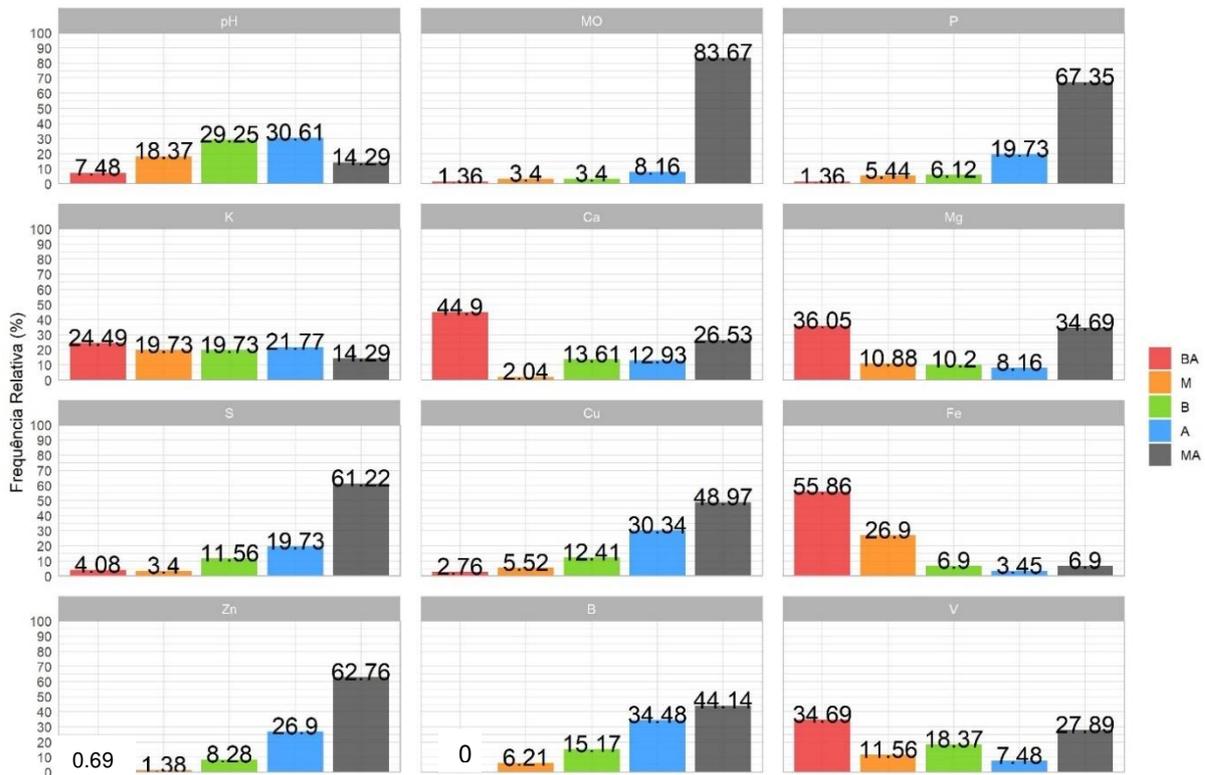
Avaliando as faixas de suficiência obtidas pelo método da CHMR para a profundidade de 0 - 10 cm, obteve-se a faixa a ideal para o K na cultura do café entre 76, 24 e 136, 85 mg/dm³ sendo considerado o nível ótimo 101,66 mg/dm³, este teor ótimo está inserido na classe “médio”, enquanto que faixa de teores ideal obtida neste estudo é abrangida pelas classes “médio” e “alto” segundo a classificação da CFSEMG (Ribeiro *et al.*, 1999) para a cultura do café. Resultados semelhantes foram observados por Silva *et al.* (2001) em estudo realizado em Latossolo Vermelho-Amarelo em cafezais no município de Patrocínio (MG), que estimou uma faixa crítica de 83,9 a 152,6 mg/dm³ de K no solo corresponderia a 90 - 100 % da produção máxima de cafeeiro.

Já Para o Ca e Mg o somatório das FR (BA e M) correspondem a 46,94 % e 46,93 % respectivamente, mostrando que aproximadamente 50 % dos talhões apresentam teores menores do que a faixa considerada ideal, já a FR dos talhões que possuem teores acima do ideal corresponde a 26,54 % para o Ca e 18,36 % para o Mg, o que poderia estar limitando os valores de NDVI por excesso destes nutrientes, enquanto 26,53 % e 34,69 % dos talhões para Ca e Mg ,respectivamente, apresentaram teores dentro da faixa adequada.

Neste estudo a faixa considerada adequada obtida para o Ca foi de 3,86 a 5,22 cmol_c/dm³ tendo como nível ótimo 4,46 cmol_c/dm³, considerando a classificação da CFSEMG (Ribeiro *et al.*, 1999) a faixa de teores adequada obtida abrange as classes “alta” (2,41 a 4,00 cmol_c/dm³) e “muito alta” (> 4,00 cmol_c/dm³), enquanto o nível ótimo está inserido na classe “muito alta”. Para o Mg o nível ótimo obtido foi 1,90 cmol_c/dm³ e uma faixa adequada de 1,67 a 2,15

cmol_c/dm³, os resultados obtidos foram maiores que o nível crítico sugerido por CFSEMG (Ribeiro *et al.*, 1999) sendo enquadrados na classe “muito alta (> 1,50 cmol_c/dm³)”.

Figura 8: Frequências relativas (FR%) dos talhões nas Faixas de suficiência dos valores e teores dos atributos químicos do solo na camada de 0 - 10 cm em lavouras irrigadas de café arábica, nas mesorregiões do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba e Noroeste de Minas, Minas Gerais, com base no método da CHMR aplicado ao índice NDVI obtido na época padrão de amostragem foliar.



BA: Baixa; **M:** Média; **B:** Boa; **A:** Alta; **MA:** Muito alta.

O relacionamento da CHMR do NDVI em função dos teores de S nos mostra que a maioria dos talhões está acima da faixa adequada, cerca de 61,22 %, enquanto apenas 7,48 % possui teores de S inferiores a faixa considerada ideal, já a faixa adequada compreende 31,29 % dos talhões estudados, esta faixa varia de 10,20 a 19,20 mg/dm³ tendo como nível ótimo 13,60 mg/dm³. Tendo em vista que os talhões em estudo apresentam um solo argiloso, a faixa e nível ótimo obtidos são classificados na classe “muito bom” (> 7,5 mg/dm³) de acordo com a CFSEMG (Ribeiro *et al.*, 1999).

Para os micronutrientes Cu, Zn, B e Fe a soma das FR's que representam os talhões com teores menores que a faixa ideal e correspondem a 8,28 %, 2,07 %, 6,21 % e 82,76 % respectivamente, já para os talhões que apresentam teores superiores a faixa adequada a soma

corresponde a 48,97 %, 62,76 %, 44,14 % e 6,90 % para Cu, Zn, B e Fe respectivamente, para os talhões com teores dentro da faixa ideal 42,75 %, 35,18 %, 49,51 % e 10,35 % para Cu, Zn, B e Fe respectivamente.

A faixa adequada obtida varia de 0,51 a 1,74 mg/dm³ para Cu, sendo considerado o nível ótimo o teor de 0,87 mg/dm³, para o Zn a faixa ideal varia de 2,70 a 9,40 mg/dm³, tendo como nível ótimo 5,30 mg/dm³ já para o B a faixa varia de 0,37 a 0,77 mg/dm³ com o teor de 0,52 mg/dm³ considerado como ótimo. Estas faixas ideais destes micronutrientes estão abrangidas pelas classes “média” “alta” e “muito alta” de acordo com a classificação da CFSEMG (Ribeiro *et al.*, 1999) para a cultura do café, sendo os teores ótimos obtidos inseridos na classe de fertilidade médio para o B e Cu e Bom para o Zn.

Para o Fe a faixa adequada obtida variou de 23,60 a 43,10 mg/dm³, tendo como nível ótimo o teor de 33,10 mg/dm³ segundo a classificação da CFSEMG (Ribeiro *et al.*, 1999) o nível ótimo obtido está inserido na classe disponibilidade “bom”, e a faixa adequada abrange as classes “médio” e “bom”, cabendo ressaltar que esta classificação proposta pela CFSEMG, não é específica para cultura do café.

Para a saturação de bases (V) podemos notar que 46,25 % dos talhões apresentam valores de V inferior a faixa adequada, enquanto que em 27,89 % dos talhões os valores de V estão acima da faixa adequada e 25,85 % dos talhões estudados possuem valores de V dentro da faixa ideal levando em consideração os valores de NDVI.

Utilizando o método da CHMR obteve-se uma faixa ideal variando de 56,00 a 69,70 % tendo como nível ótimo de V o valor de 62,70 %, esta faixa obtida enquadra-se nas classes “médio” e “bom” de acordo com a classificação da CFSEMG (Ribeiro *et al.*, 1999), sendo o valor do nível ótimo classificado como “bom” sendo maior que nível crítico de 60 %, sugerido por esta classificação.

Buscando o relacionamento do NDVI com os atributos químicos na camada de 10 - 20 cm, notamos que houve um bom relacionamento considerando que as equações obtidas possuem valores de R satisfatórios variando de 0,798 a 0,993 (Tabela 13) havendo uma variação quando comparados com a camada de 0-10 cm (Tabela 11).

Tabela 13: Equações ajustadas para a CHMR do NDVI (y) obtido na época de amostragem foliar padrão em função de atributos químicos do solo (x) na profundidade de 10 - 20 cm em lavouras irrigadas de café arábica.

| Atributos químicos ¹ | Equação | R |
|---------------------------------|---|-------|
| pH | $y = 1/(0,47496 + (-0,15522x) + (0,01303x^2))$ | 0.798 |
| MO | $y = 378,24175 + (-9,83365x) + (-36332,48685/x^2)$ | 0.887 |
| P | $y = (47,92145 + 0,64166x) / (1 + (-0,10923x) + 0,00635x^2)$ | 0.993 |
| K | $y = 1/(0,07185 + (-0,06374x) + 0,01699x^2)$ | 0.858 |
| Ca | $y = (23,12792 + (-0,07563x)) / (1 + (-0,06369x) + 0,01261x^2)$ | 0.919 |
| Mg | $y = \exp(8,55066 + (-10,72801/x) + (-1,36173\ln(x)))$ | 0.852 |
| S | $y = \exp(18,99118 + (-55,19848/x) + (-3,98407\ln(x)))$ | 0.839 |
| V | $y = (44,12638 + (-0,16041x)) / (1 + (-0,01763x) + 0,00012x^2)$ | 0.971 |

¹: pH: em H₂O; MO: (Matéria Orgânica) expressa em dag/kg; Ca e Mg: em cmol/dm³; P, K e S: em mg/dm³ e V: (Saturação por bases) em %.

A obtenção das equações ajustadas permitiu a obtenção das faixas de suficiência para os atributos químicos do solo para a camada de 10 - 20 cm (Tabela 14) e suas respectivas FR (Figura 9). De maneira geral há uma redução das faixas adequadas e teores ótimos obtidos para os atributos químicos do solo na camada de 10 - 20 cm em relação a camada de 0 - 10 cm, somente para o S observou-se um aumento dos teores da faixa adequada e teor ótimo e para V aumentando a amplitude da faixa considerada ótima e conseqüentemente aumentado o valor ótimo.

Observando as FR's para o pH notamos que 43,54 % dos talhões apresentam valores inferiores as faixas consideradas adequadas, já 36,74 % apresentam valores dentro da faixa ideal, enquanto 19,73 % dos talhões apresentam valores acima da faixa adequada, o que poderia estar limitando os valores de NDVI. Para esta profundidade a faixa ideal varia de 5,23 a 6,29 com o valor ótimo de 5,95, estando dentro da faixa adequada proposta por (Kupper, 1983) para a cultura do café, sendo o nível ótimo classificado como “bom”, seguindo a CFSEMG (Ribeiro *et al.*, 1999)

A redução dos valores de pH com o aumento da profundidade pode estar relacionado com a forma como é realizada calagem, uma vez que o calcário é aplicado na superfície sem que haja sua incorporação fazendo com que a sua ação seja mais proeminente na camada superficial,

favorecendo o aumento da acidez ao longo do perfil do solo. Entretanto o aumento da acidez em profundidade com uma camada mais acida, pode ser benéfico para a cultura permitindo um bom desenvolvimento e conseqüentemente uma boa produção principalmente pela boa disponibilidade dos micronutrientes, tendo em vista que a maior disponibilidade encontra-se em valores de pH 5,0 (Alves, 2012).

Tabela 14: Faixas de suficiência¹ de teores² de atributos químicos do solo na camada de 10 - 20 cm em lavouras irrigadas de café arábica, nas mesorregiões do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba e Noroeste de Minas, Minas Gerais, com base no método da CHMR aplicado ao índice NDVI obtido na época padrão de amostragem foliar.

| Atributos Químicos | BA:< 70% | M: 70 a 90% | B: 90 a 100% | A: 100 a 90% | MA: 90% |
|--------------------|----------|---------------|---------------|---------------|---------|
| pH | < 5,31 | 5,31 - 5,63 | 5,63 - 5,95 | 5,95 - 6,29 | ≥ 6,29 |
| MO | < 1,90 | 1,90 - 2,13 | 2,13 - 2,52 | 2,52 - 3,04 | ≥ 3,04 |
| P | < 3,30 | 3,30 - 6,10 | 6,10 - 9,00 | 9,00 - 12,20 | ≥ 12,20 |
| K | < 51, 61 | 51,61 - 62,56 | 62,56 - 73,12 | 73,12 - 84,46 | ≥ 84,46 |
| Ca | < 1,67 | 1,67 - 2,08 | 2,08 - 2,49 | 2,49 - 2,91 | ≥ 2,91 |
| Mg | < 0,41 | 0,41 - 0,54 | 0,54 - 0,78 | 0,78 - 1,20 | ≥ 1,20 |
| S | < 9,4 | 9,4 - 11,2 | 11,2 - 13,8 | 13,8 - 17,6 | ≥ 17,6 |
| V | < 27,6 | 27,6 - 47,5 | 47,5 - 66,1 | 66,1 - 82,3 | ≥ 82,3 |

¹BA: Baixa (CHMR < 70%); M: Média (70% ≤ CHMR < 90%); B: Boa (90% ≤ CHMR ≤ 100%), A: Alta (100% > CHMR ≥ 90%, à direita); MA: Muito alta (CHMR < 90%, à direita).

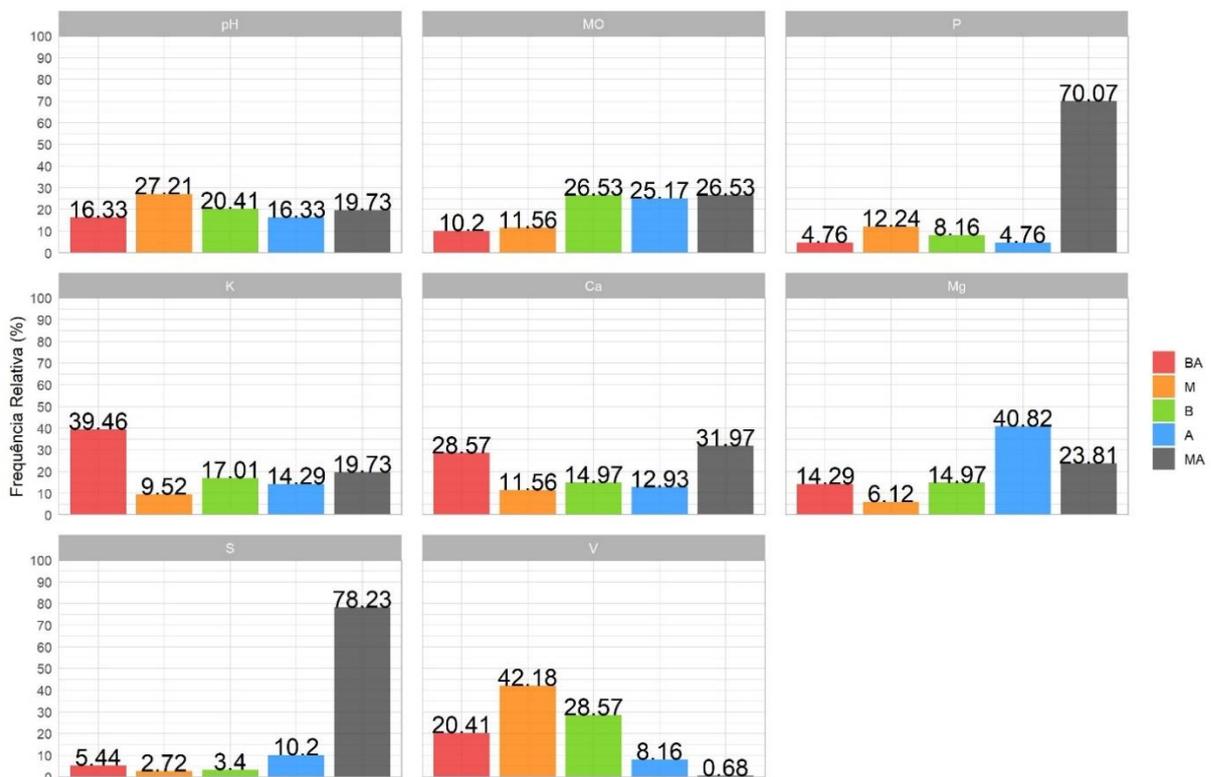
²: pH: em H₂O; MO: (Matéria Orgânica) expressa em dag/kg; Ca e Mg: em cmol_c/dm³; P, K, S em mg/dm³ e V (Saturação por bases): em %.

Para a MO a faixa considerada ideal varia de 2,13 a 3,04 dag/kg, sendo considerado o teor crítico de 2,52 dag/kg, estes teores se enquadram na faixa obtida por Malavolta (1986) para a cultura do café. Observando as FR's constatamos que aproximadamente 26,53 % dos talhões apresentam teores acima de 3,04 dag/kg, em contrapartida 21,76 % dos talhões apresentam teores menores que 2,13 dag/kg o que poderia estar limitando o NDVI, já 51, 70 % dos talhões apresentam teores dentro da faixa considerada adequada levando em consideração os valores de NDVI.

A MO é de extrema importância para o desenvolvimento da cultura, tendo grande influência nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, sendo importante fonte de nutrientes como N, P, S e B, de acordo com Malavolta (1986) a cada 1 dag/kg de MO presente nos solo são liberados cerca de 20 a 30 kg de N por hectare. Entretanto os altos teores de MO podem

ocasionar deficiência dos micronutrientes, principalmente o Cu e Zn que são adsorvidos a MO formando complexos orgânicos estando assim menos disponíveis para a cultura (Alves, 2012).

Figura 9: Frequências relativas (FR%) dos talhões nas Faixas de suficiência dos valores e teores dos atributos químicos do solo na camada de 10 - 20 cm em lavouras irrigadas de café arábica, nas mesorregiões do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba e Noroeste de Minas, Minas Gerais, com base no método da CHMR aplicado ao índice NDVI obtido na época padrão de amostragem foliar.



BA: Baixa; **M:** Média; **B:** Boa; **A:** Alta; **MA:** Muito alta.

O relacionamento da CHMR do NDVI em função dos teores de P na camada de 10 - 20 cm nos mostra que 70,07 % dos talhões apresentam teores acima da faixa considerada adequada, já a soma da FR dos talhões abaixo da faixa ideal corresponde a 17,00 %, enquanto apenas 12,92 % dos talhões apresentam teores dentro da faixa adequada.

A faixa adequada obtida varia de 2,96 a 6,01 mg/dm³ tendo como teor ótimo 4,43 mg/dm³, levando em consideração que os solos da área de estudo possuem textura argilosa, a faixa ideal obtida abrange a classes “muito baixa” e “baixa” seguindo a classificação da CFSEMG (Ribeiro *et al.*, 1999), sendo o teor ótimo classificado como muito baixo. Podemos observar uma grande redução quando comparada com os resultados obtidos para a camada de 0 - 10 cm, tendo em vista que o nível ótimo de P para a profundidade de 0 - 10 cm é 3,27 vezes maior que o nível

ótimo na camada de 10 - 20 cm, demonstrando um acúmulo de P nas camadas superficiais, resultados semelhantes foi observado por Alves (2012) que comparando os teores de P nas camadas de 0 - 5 cm e 5 - 20 cm observou que a camada mais superficial apresentou em média 4,5 vezes mais P.

Para o K a faixa considerada ideal varia de 62,56 a 84,46 mg/dm³ tendo como nível ótimo o teor de 73,12 mg/dm³, estes valores obtidos são classificados como “médio” (60 - 120 mg/dm³) segundo a CFSEMG (Ribeiro *et al.*, 1999), sendo o nível ótimo obtido neste estudo muito semelhante ao teor de 73 mg/dm³ de K encontrado por Alves (2012) como ótimo na camada de 0 - 20 cm para a cultura do café no estado de Minas Gerais. Observando as FR's encontradas notamos que 31,30 % dos talhões apresentaram teores de K dentro da faixa adequada obtida, já 48,98 % apresentam teores inferiores a 62,56 mg/dm³, enquanto apenas 19,73 % apresentam teores acima da faixa ideal.

O somatório das FR's demonstram para o Ca e Mg que 40,13 % e 20,41 % dos talhões, respectivamente, apresentam teores inferiores a faixa ideal levando em consideração o NDVI, enquanto 31,97 % e 23,81 % para Ca e Mg, respectivamente, possuem teores acima da faixa adequada obtida, já a porcentagem de talhões com teores dentro da faixa adequada correspondem a 27,90 % para o Ca e 55,79 % para o Mg.

A faixa considerada ideal para o Ca obtida neste estudo para a camada de 10 -20 cm varia entre 2,08 a 2,91 cmol/dm³ tendo como nível ótimo o teor de 2,49 cmol/dm³, a faixa ideal obtida está inserida nas classe “médio” (1,21 a 2,40 cmol/dm³) e “bom” (2,41 a 4,00 cmol/dm³) seguindo a classificação sugerida pela CFSEMG (Ribeiro *et al.*, 1999) para o desenvolvimentos das culturas, sendo o nível crítico de Ca sugerido (2,40 cmol/dm³) inferior ao nível ótimo obtido neste estudo. Já para o Mg o nível ótimo obtido foi de 0,78 cmol/dm³, tendo como a faixa adequada o teores de 0,54 a 1,20 cmol/dm³, esta faixa obtida é abrangida pelas classe “médio” (0,46 a 0,90 cmol/dm³) e “bom” (0,90 a 1,50 cmol/dm³) sugeridas pela CFSEMG (Ribeiro *et al.*, 1999), sendo o nível ótimo obtido inferior ao nível crítico sugerido de 0,90 cmol/dm³.

Essa classificação sugerida para o Ca e Mg pela CFSEMG não é específica para cultura do café sendo recomendado para a cultura um valor de referência de 3,5 cmol/dm³, para a soma dos dois nutrientes, para o cálculo da calagem utilizando o método de neutralização de Al e elevação dos teores de Ca e Mg. Utilizando os teores considerados ótimos para Ca (2,49 cmol/dm³) e para Mg (0,78 cmol/dm³), obtemos um teor de 3,29 cmol/dm³ valor bem próximo ao sugerido para a elevação dos teores de Ca e Mg para a cultura do café.

Tendo em vista que os talhões em estudo apresentam um solo de textura argilosa, a faixa adequada de 11,20 e 17,60 mg/dm³ e nível ótimo 13,80 mg/dm³ obtidos para o S na profundidade de 10 – 20 cm são classificados na classe “ muito bom” (> 7,5 mg/dm³) de acordo com a CFSEMG (Ribeiro *et al.*, 1999). Observando as FR's nota-se que 78,23 % dos talhões apresentam teores acima da faixa adequada, enquanto 13,60 % apresentam teores dentro da faixa ideal e apenas 8,16 % dos talhões apresentam teores menores que a faixa ideal podendo estar limitando o NDVI por deficiência de S.

Considerando a saturação por bases (V) observamos que 62,59 % dos talhões apresentam teores abaixo da considerada adequado levando em consideração os valores de NDVI, já 36,73 % dos talhões apresentam teores dentro da faixa adequada e apenas 0,68 % apresentam teores acima desta faixa. A faixa adequada obtida varia entre 47,50 e 82,30 %, tendo como valor ótimo 66,10 %, a faixa obtida abrange as classes de “médio” a “muito bom” seguindo a classificação sugerida pela CFSEMG apresentando uma grande variação, entretanto o nível ótimo obtido neste estudo está acima o nível crítico (60,00 %) sugerido por esta classificação para as culturas, favorecendo assim o desenvolvimento e a produção da cultura do café.

Com a obtenção dos teores dos atributos químicos do solo correspondentes às faixas de suficiência, podemos comparar os resultados obtidos neste estudo para a profundidade de 0 - 20 cm, com outros valores sugeridos na literatura para o manejo da cultura. A faixa obtida para o pH é superior a obtida por Alves (2012) entretanto é semelhante a faixa obtida por Ribeiro *et al.* (1999) (Tabela 15).

Tabela 15: Faixas adequadas de teores dos atributos químicos do solo para a profundidade de 0 - 20 cm, recomendada por diferentes autores em comparação ao proposto por este estudo.

| Atributos químicos ¹ | Autores ² | | Presente Trabalho |
|---------------------------------|----------------------|-----------------|-------------------|
| | 1 | 2 | |
| pH | 5,00 - 5,60 | 5,50 - 6,00 | 5,62 - 6,41 |
| MO | 3,20 - 5,00 | 4,01 - 7,00 | 2,18 - 3,16 |
| V | 34,00 - 66,00 | 60,01 - 80,00 | 51,75 - 76,00 |
| P | 0,77 - 18,90 | 8,60 - 13,10 | 5,39 - 15,32 |
| K | 57,00 - 95,00 | 120,00 - 200,00 | 69,40 - 110,65 |
| Ca | 1,90 - 3,40 | 2,41 - 4,00 | 2,97 - 4,06 |
| Mg | 0,90 - 1,20 | 0,91 - 1,50 | 1,10 - 1,67 |
| S | - | 7,00 - 10,30 | 10,70 - 18,40 |

¹: pH: em H₂O; MO: (Matéria Orgânica) expressa em dag/kg; Ca e Mg: em cmol_c/dm³; P e K: em mg/dm³ e V: (Saturação por bases) em %. ²: 1: Alves (2012); 2: Ribeiro *et al.* (1999)

A faixa adequada obtida para a MO neste trabalho foi inferior as faixas obtidas pelos dois autores, para a soma de bases (V), P, Ca e Mg a faixa obtida foi semelhante ao sugerida por ambos autores, já para o K o faixa obtida é semelhante a sugerida por Alves (2012) entretanto é inferior a faixa adequada considerada por Ribeiro *et al.* (1999), para o S podemos observar que o faixa ideal obtida é superior a sugerida por Ribeiro *et al.* (1999).

De maneira geral as faixas de teores dos atributos químicos do solo alcançados empregando o método da CHMR, foram similares com as faixas sugeridas na literatura, ratificando a capacidade do método em ser utilizado para o manejo nutricional adequado da cultura do café arábica.

4. CONCLUSÕES

A utilização do método da Chance Matemática Relativa (CHMR) possibilita o relacionamento do NDVI com a produtividade.

O NDVI associado ao método da Chance Matemática Relativa (CHMR) permite a obtenção das faixas de suficiência para os macros e micronutrientes, condizentes com as faixas obtidas por métodos tradicionais de diagnose foliar.

O NDVI associado ao método da Chance Matemática Relativa (CHMR) permite a obtenção das faixas de suficiência para os atributos da fertilidade do solo para as camadas de 0-10 cm e 10-20 cm, concordantes com as faixas atualmente estabelecidas para o cultivo da cultura do café.

O sensoriamento remoto, com a utilização do NDVI, e sua associação ao Método da Chance Matemática Relativa, é alternativa viável para subsidiar o manejo nutricional da cultura de café arábica.

REFERÊNCIAS

- AHAMED, T. et al. A review of remote sensing methods for biomass feedstock production. **Biomass bioenergy**, v. 35, n. 7, p. 2455-2469, 2011. ISSN 0961-9534.
- ALVES, L. C. **Faixas de suficiência e níveis ótimos de atributos da fertilidade do solo para a cultura do café em Minas Gerais**. 2012. 67 p. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2012.
- BELTRÃO, A. F. Revista Cafeicultura: História Completa Café no Brasil. 2018. Available at: < <https://revistacafeicultura.com.br/index.php?tipo=ler&mat=66568&historia-completa-cafe-no-brasil.html> >. Accessed on: 20 de fevereiro de 2021.
- BERNARDES, T. et al. Monitoring biennial bearing effect on coffee yield using MODIS remote sensing imagery. **Remote Sensing**, v. 4, n. 9, p. 2492-2509, 2012.
- CANTARUTTI, R. B. et al. Avaliação da fertilidade do solo e recomendação de fertilizantes. In: NOVAIS, R. F., ALVAREZ V., V. H., BARROS, N. F., FONTES, R. L. F., CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L (Ed.). **Fertilidade do Solo**. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.769-872.
- CLIMATE-DATA.ORG. 2021. Available at: < <https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/minas-gerais-203/> >. Accessed on: 01 de Março de 2021.
- CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO: Café - Análise Mensal - Junho/Julho 2020a. Available at: < <https://www.conab.gov.br/info-agro/analises-do-mercado-agropecuario-e-extrativista/analises-do-mercado/historico-mensal-de-cafe> >. Accessed on: 19 de fevereiro de 2021.
- CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO: Acompanhamento da safra brasileira de café safra 2020. **Quarto levantamento**, v. 6, n. 4, 2020b. ISSN 2318-7913.
- CORTI, M. et al. Does remote and proximal optical sensing successfully estimate maize variables? A review. **European journal of agronomy**, v. 99, p. 37-50, 2018. ISSN 1161-0301.
- DA SILVA, L. et al. Pedodiversity in the state of Minas Gerais-Brazil. **Caderno de Geografia**, v. 28, n. Especial 1, p. 18-39, 2018. ISSN 2318-2962.
- DE AZEVEDO SILVA, P. A. et al. Coffee yield estimation by Landsat-8 imagery considering shading effects of planting row's orientation in center pivot. **Remote Sensing Applications: Society Environment**, v. 24, p. 100613, 2021. ISSN 2352-9385.
- ENGESAT. Soluções em imagens de satélite e geoprocessamento. **Sentinel-2**, 2021a. Available at: < <http://www.engesat.com.br/sentinel-2/> >. Accessed on: 01 de março de 2021.
- FARNEZI, M. M. D. M.; SILVA, E. D. B.; GUIMARÃES, P. T. G. Diagnóstico nutricional de cafeeiros da região do Alto Jequitinhonha (MG): normas DRIS e faixas críticas de nutrientes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 4, p. 969-978, 2009. ISSN 0100-0683.

FERNANDES, A. L. T. et al. A moderna cafeicultura dos cerrados brasileiros. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 42, n. 2, p. 231-240, 2012. ISSN 1983-4063.

FERNANDES, J. L.; ROCHA, J. V.; LAMPARELLI, R. A. C. Sugarcane yield estimates using time series analysis of spot vegetation images. **Scientia Agricola**, v. 68, p. 139-146, 2011. ISSN 0103-9016.

FERNANDES, L. V. **Normas e determinação de faixas de suficiência para diagnose foliar com base no crescimento relativo de eucalipto**. 2010. 85 p> Dissertação (Mestrado - Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.

FORMAGGIO, A. R.; SANCHES, I. D. A. **Sensoriamento remoto em agricultura**. Ed. 1. São Paulo: Oficina de Textos, 2017. 288 p. ISBN 978-85-7975-277-3.

GIOVOS, R. et al. Remote Sensing Vegetation Indices in Viticulture: A Critical Review. **Agriculture**, v. 11, n. 5, p. 457, 2021.

GUO, X. et al. Hyperspectral Inversion of potassium content in apple leaves based on vegetation index. **Agricultural Sciences**, v. 8, n. 8, p. 825-836, 2017.

HASSAN, M. A. et al. A rapid monitoring of NDVI across the wheat growth cycle for grain yield prediction using a multi-spectral UAV platform. **Plant science**, v. 282, p. 95-103, 2019. ISSN 0168-9452.

ICO. INTERNATIONAL COFFEE ORGANIZATION. A Historia do Café. 2020. Available at: < http://www.ico.org/pt/coffee_storyp.asp >. Accessed on: 19 de fevereiro de 2021.

JENSEN, J. R.; EPIPHANIO, J. C. N. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. Parêntese Editora São José dos Campos, 2009. ISBN 856050706X.

JIANG, R. et al. UAV-based partially sampling system for rapid NDVI mapping in the evaluation of rice nitrogen use efficiency. **Journal of Cleaner Production**, v. 289, p. 125705, 2021. ISSN 0959-6526.

JULIEN, Y.; SOBRINO, J. A.; JIMÉNEZ-MUÑOZ, J.-C. Land use classification from multitemporal Landsat imagery using the Yearly Land Cover Dynamics (YLCD) method. **International Journal of Applied Earth Observation Geoinformation**, v. 13, n. 5, p. 711-720, 2011. ISSN 0303-2434.

KUPPER, A. Fatores climáticos e edáficos na cultura cafeeira. In: (Ed.). **Nutrição e adubação do cafeeiro**. E. Malavolta, T. Yamada & J.A. Guidolin, coord. Inst. Da Potassa & Fosfato (EUA) e Inst. Internacional da Potassa (Suíça). Piracicaba, 1983. p.224 p.

KURIHARA, C. H.; MAEDA, S.; ALVAREZ, V. **Interpretação de resultados de análise foliar**. Colombo; Embrapa Florestas, Dourados, Mato Grosso do Sul: 2005. 42 p. (Documentos, 74).

LAVIOLA, B. **Alocação de fotoassimilados e nutrientes em folhas e frutos de cafeeiro em diferentes altitudes de cultivo**. 2007. 148 p. Tese (Doutorado em Fitotecnia)–Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2007.

LAVIOLA, B. G. **Dinâmica de macronutrientes em folhas, flores e frutos de cafeeiro arábico em três níveis de adubação**. 2004. 111 p. Dissertação (Mestrado - Fitotecnia) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2004.

LOFTFIELD, E. et al. Association of coffee drinking with mortality by genetic variation in caffeine metabolism: findings from the UK Biobank. **AMA internal medicine**, v. 178, n. 8, p. 1086-1097, 2018. ISSN 2168-6106.

LOURENÇO, H. M. **Diagnose nutricional de eucalipto e impacto da disponibilidade de água e nutrientes nos estoques de carbono do povoamento**. 2012. 113 p. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2012.

MAHLEIN, A.-K. et al. Spectral signatures of sugar beet leaves for the detection and differentiation of diseases. **Precision agriculture**, v. 11, n. 4, p. 413-431, 2010. ISSN 1573-1618.

MAIA, F. C. D. O. **Utilização de índices de vegetação para identificação de ambientes de produção de cana-de-açúcar**. 2019. 86 p. Dissertação de Mestrado - Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, Brasília, DF, 2019.

MALAVOLTA, E. Nutricao mineral e adubacao do cafeeiro. Colheitas economicas máximas. **Sao Paulo, Brasil, Ed Ceres**, p. 210 1993.

MALAVOLTA, E. Nutricao mineral e adubacao do cafeeiro. Colheitas economicas máximas. Ed. **Editora Agrônômica Ceres**, 1993.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. D. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. 1997. 319.

MALAVOLTA, E. N. J. R., AB CULTURA DO CAFEIEIRO: FATORES QUE AFETAM A PRODUTIVIDADE. Adubação e calagem para o cafeeiro. In: RENA, A. B.;MALAVOLTA, E., et al (Ed.). **Cultura do cafeeiro: fatores que afetam a produtividade**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisas da Potassa e do Fosfato, 1986. p.p. 136 a 274.

MARTINEZ, H.; NEVES, J. Nutrição Mineral, Calagem, Gessagem e Adubação. In: SAKIYAMA, N. S.;MARTINEZ, H. E. P., et al (Ed.). **Café Arábica do Plantio a Colheita**. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2015. p.64-103.

MARTINEZ, H. E. P.; NEVES, Y. P.; ZABINI, A. V. Produção integrada do cafeeiro: diagnóstico do estado nutricional do cafeeiro. In: ZAMBOLIM, L. (Ed.). **Produção Integrada de Café**. Viçosa: UFV/DFP, 2003. p.p. 397-441.

MATIELLO, J. B. Gosto do meu cafezal. São Paulo. Correção em cafeeiros jovens da Zona da Mata de Minas. In: (Ed.). **CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEIRAS, 23**. Manhuaçu. Anais. Brasília: MAA-PROCAFÉ, 1997, 1997. p.48-50 p. .

MENDONÇA, L. P. **Curvas de resposta potencial e faixas de suficiência nutricional para café arábica em Minas Gerais**. 2016. 67 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2016.

MESQUITA, C. M. D. et al. **Manual do café: manejo de cafezais em produção**. Belo Horizonte: Emater-MG: 2016.

MEURER, E. J. Fatores que influenciam o crescimento e desenvolvimento das plantas. . In: NOVAIS, R. F., ALVAREZ V., V. H., BARROS, N. F., FONTES, e R. L. F., C., R. B.; NEVES, J. C. L., (Ed.). **Fertilidade do Solo**. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo,, 2007. p.65-90.

MOGES, S. et al. Evaluation of green, red, and near infrared bands for predicting winter wheat biomass, nitrogen uptake, and final grain yield. **Journal of plant nutrition**, v. 27, n. 8, p. 1431-1441, 2005. ISSN 0190-4167.

MOLIN, J. P. et al. Capacidade de um sensor ótico em quantificar a resposta da cana-de-açúcar a doses de nitrogênio. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, p. 1345-1349, 2010. ISSN 1415-4366.

MULIANGA, B. et al. Forecasting regional sugarcane yield based on time integral and spatial aggregation of MODIS NDVI. **Remote Sensing**, v. 5, n. 5, p. 2184-2199, 2013.

MUÑOZ-HUERTA, R. F. et al. A review of methods for sensing the nitrogen status in plants: advantages, disadvantages and recent advances. **ensors**, v. 13, n. 8, p. 10823-10843, 2013.

NASER, M. A. et al. Using NDVI to differentiate wheat genotypes productivity under dryland and irrigated conditions. **Remote Sensing**, v. 12, n. 5, p. 824, 2020.

NAVARRO, M. M. **Sensing development of a soybean canopy under P or K nutritional stress**. 2012. 125 p., Theses and Dissertations--Plant and Soil Sciences.

NETTO, P. M. et al. Níveis de adubação no índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) e clorofila de cafeeiros em formação. **X Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil** p. 3, 2019. ISSN 1984-9249.

NOGUEIRA, S.; MOREIRA, M. A.; VOLPATO, M. M. Relationship between coffee crop productivity and vegetation indexes derived from oli/landsat-8 sensor data with and without topographic correction. **Engenharia Agrícola**, v. 38, p. 387-394, 2018. ISSN 0100-6916.

NOVAIS, R. F. D.; MELLO, J. W. V. Relação solo-planta. In: ALVAREZ, V., V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.133-204.

PERALTA, N. R. et al. Mid-season high-resolution satellite imagery for forecasting site-specific corn yield. **Remote Sensing**, v. 8, n. 10, p. 848, 2016.

PERTILLE, C. T. **SENSORIAMENTO REMOTO NO DIAGNÓSTICO DA SANIDADE DE POVOAMENTOS DE Pinus taeda L. ATACADOS POR Sapajus nigritus Kerr (1972)**. 2019. 191 p. Dissertação de Mestrado - Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, SC, 2019.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; KUPLICH, T. M. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação.** São José dos Campos, 2007. 127 p. ISBN 8560507027.

PUTRA, B. T. W.; SONI, P. Enhanced broadband greenness in assessing Chlorophyll a and b, Carotenoid, and Nitrogen in Robusta coffee plantations using a digital camera. **Precision Agriculture**, v. 19, n. 2, p. 238-256, 2018. ISSN 1573-1618.

REZNICK, J. P. K. **Produtividade, qualidade industrial e nutricional na cultura do trigo.** 2017. 64 p. SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO, Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba - PR, 2017.

RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ VIEGAS, V. H. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5. Aproximação.** Vçosa, MG: Comissão de fertilidade do solo do estado de Minas Gerais, 1999. 359 p.

RISSINI, A. L. L.; KAWAKAMI, J.; GENÚ, A. M. Índice de vegetação por diferença normalizada e produtividade de cultivares de trigo submetidas a doses de nitrogênio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 6, p. 1703-1713, 2015. ISSN 0100-0683.

RODRIGUES, H. L.; DIAS, F. D.; DE CARVALHO TEIXEIRA, N. A Origem do Café no Brasil: A Semente Que Veio Para Ficar El origen del cafe en Brasil: La semilla que vino para quedarse. **Revista Pensar Gastronomia**, v. 1, n. 2, 2015.

ROMERO, M. et al. Vineyard water status estimation using multispectral imagery from an UAV platform and machine learning algorithms for irrigation scheduling management. **Computers electronics in agriculture**, v. 147, p. 109-117, 2018. ISSN 0168-1699.

ROUSE, J. Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation. **NASA/GSFC, type III, final report, greenbelt, MD**, v. 371, 1974.

SAMBORSKI, S. M.; TREMBLAY, N.; FALLON, E. Strategies to make use of plant sensors-based diagnostic information for nitrogen recommendations. **Agronomy journal**, v. 101, n. 4, p. 800-816, 2009. ISSN 0002-1962.

SANTOS, E. F. D. et al. Faixas normais de nutrientes em cana-de-açúcar pelos métodos ChM, DRIS e CND e nível crítico pela distribuição normal reduzida. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 6, p. 1651-1658, 2013. ISSN 0100-0683.

SERRA, A. P. et al. Determinação de faixas normais de nutrientes no algodoeiro pelos métodos CHM, CND e DRIS. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 1, p. 105-113, 2010. ISSN 0100-0683.

SILVA, E. et al. Adubação potássica do cafeeiro: produção, faixas críticas de nutrientes no solo e nas folhas. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 25, n. 4, p. 801-811, 2001.

SILVA, L. C. D. et al. Uso do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) na avaliação do desenvolvimento de cafeeiros do sul de Minas Gerais. **IX Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil**, p. 6, 2015.

SILVA, L. C. D. A. **Delineamento de zonas de manejo por imagens suborbitais, orbitais e variáveis de solo**. 2020. 117 p. Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus Cascavel, Cascavel, PR, 2020.

SILVA, S. D. A.; LIMA, J. S. D. S.; QUEIROZ, D. M. D. Spatial variability in nutritional status of arabic coffee based on dris index. **Revista Ceres**, v. 58, n. 2, p. 256-261, 2011. ISSN 0034-737X.

SOLIS-PINO, A.-F. et al. Correlación del contenido de clorofila foliar de la especie Coffea arabica con índices espectrales en imágenes. **Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial**, v. 19, n. 2, p. 57-68, 2021. ISSN 1692-3561.

SOUSA, J. S. **Análise foliar para ajuste da recomendação de adubação do cafeeiro**. 2016. 65 Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2016.

TEIXEIRA, R. O. **NDVI E SUA RELAÇÃO COM PRODUTIVIDADE E ESTADO NUTRICIONAL DA CULTURA DA PALMA DE ÓLEO NO ESTADO DO PARÁ**. 2018. 45 p. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2018.

TVERDAL, A. et al. Coffee consumption and mortality from cardiovascular diseases and total mortality: Does the brewing method matter? **European journal of preventive cardiology**, v. 27, n. 18, p. 1986-1993, 2020. ISSN 2047-4873.

URANO, E. O. M. et al. Determinação de teores ótimos de nutrientes em soja pelos métodos chance matemática, sistema integrado de diagnose e recomendação e diagnose da composição nutricional. **J Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 1, p. 63-72, 2007. ISSN 0100-0683.

WADT, P. et al. Valores de referência para macronutrientes em eucalipto obtidos pelos métodos DRIS e chance matemática. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, n. 4, p. 685-692, 1998. ISSN 0100-0683.

WADT, P. G. S. et al. Padrões nutricionais para lavouras arrozais irrigadas por inundação pelos métodos da CDN chance matemática. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 1, p. 145-156, 2013. ISSN 0100-0683.

YAN, J. et al. A cloud-based remote sensing data production system. **Future Generation Computer Systems**, v. 86, p. 1154-1166, 2018. ISSN 0167-739X.