

THIAGO FURTADO DE OLIVEIRA

**ÍNDICE DE SUFICIÊNCIA DE NITROGÊNIO COMO FERRAMENTA PARA
ADUBAÇÃO À TAXA VARIADA DO TOMATE**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2017

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

T

O48i
2017
Oliveira, Thiago Furtado de, 1987-
Índice de suficiência de nitrogênio como ferramenta para
adubação à taxa variada do tomate / Thiago Furtado de Oliveira. -
Viçosa, MG, 2017.
x, 53 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Francisco de Assis de Carvalho Pinto.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Referências bibliográficas: f. 46-53.

1. Tomate - Nutrição. 2. Fertilizantes nitrogenados. 3. Tomate -
Efeito do nitrogênio. 4. Agricultura de precisão. I. Universidade
Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Agrícola. Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. II. Título.

CDD 22. ed. 635.6424


THIAGO FURTADO DE OLIVEIRA

**ÍNDICE DE SUFICIÊNCIA DE NITROGÊNIO COMO FERRAMENTA
PARA ADUBAÇÃO À TAXA VARIADA DO TOMATE**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*

APROVADA: 20 de dezembro de 2017.


Geice Paula Villibor


Derly José Henriques da Silva
(Coorientador)


Francisco de Assis de Carvalho Pinto
(Orientador)

AGRADECIMENTOS

Ao professor Francisco de Assis de Carvalho Pinto, por sua orientação, dedicação, ensinamentos e confiança.

Ao professor Derly José Henriques da Silva, pela co-orientação, disponibilidade e atenção.

A Universidade Federal de Viçosa, e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, pela oportunidade e todo aprendizado proporcionado.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de estudos.

Ao Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Viçosa pela concessão da área experimental.

Aos meus pais, Maria Aparecida Furtado e Amaro Bezerra de Oliveira, pela confiança, apoio, carinho e amor incondicional.

A minha esposa Daniele de Barros Gomes Furtado, pelo companheirismo, compreensão, alegria, apoio incondicional e ajuda com o experimento, sem a qual toda jornada seria mais difícil.

A minha filha Alice, que ainda dentro da barriga já me inspira e motiva a tornar o mundo um lugar melhor.

Aos funcionários da UEPE Horta Velha, por toda ajuda na condução do experimento e receptividade.

Ao Jamilton Lopes, por toda ajuda e paciência durante as análises de qualidade do fruto necessárias para este estudo.

Aos amigos do Laboratório de Mecanização Agrícola, pelos bons momentos de alegria e descontração, sempre dispostos a ajudar no que preciso fosse.

Ao doutorando e amigo Fábio Delazari, pelo aprendizado e ajuda com condução do experimento

Ao estagiário e amigo Pedro Bouças, por sua disponibilidade e ajuda com a condução do experimento, por muitas vezes durante o final de semana.

BIOGRAFIA

THIAGO FURTADO DE OLIVEIRA, filho de Amaro Bezerra de Oliveira e Maria Aparecida Furtado, nasceu em 21 de julho de 1987 em Cataguases, MG.

Em julho de 2015, graduou-se Engenheiro Agrícola e Ambiental pela Universidade Federal de Viçosa.

Em agosto de 2015, iniciou curso de Mestrado em Engenharia Agrícola, na área de concentração de Agricultura de Precisão, na Universidade Federal de Viçosa.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABELAS	viii
RESUMO	ix
ABSTRACT	x
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivo geral	3
1.2 Objetivos Específicos	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 Adubação nitrogenada no tomate.....	4
2.2 Adubação a taxa variável	4
2.3 Radiômetro SPAD-502	6
2.4 Resposta espectral das culturas	7
2.5 Índices de vegetação	9
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	13
3.1 Caracterização do Experimento	13
3.2 Adubação do tomate	15
3.3 Delineamento experimental e análises estatísticas	17
3.4 Obtenção da leitura SPAD e Resposta Espectral	18
3.5 Produtividade das plantas	21
3.5.1 Produtividade de frutos grandes (PFG), médios (PFM) e pequenos (PFP).....	21
3.5.2 Produtividade de frutos comerciais (PFC).....	22
3.5.3 Produtividade de frutos defeituosos (PFD)	22
3.5.4 Produtividade total (PT)	23
3.6 Qualidade do Fruto	23
3.6.1 Cor dos frutos	23

3.6.2	Sólidos Solúveis (SS) dos frutos	24
3.6.3	Acidez total (pH) dos frutos	24
3.6.4	Acidez titulável (AT) dos frutos	24
3.6.5	Sabor dos frutos	25
3.7	Fator parcial de produtividade do nitrogênio (PFP _N)	25
3.8	Análise foliar.....	26
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
4.1	Resposta espectral.....	35
4.2	Produtividade	40
4.3	Qualidade do fruto	41
4.4	Fator parcial de produtividade do nitrogênio (PFP _N)	42
5	CONCLUSÃO.....	45
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Comportamento espectral das folhas de coníferas e plantas de folhas largas. FONTE: CÁRDENAS <i>et al.</i> , 2015 modificado.	8
Figura 2 – Experimento instalado no interior do Ambiente Protegido, Viçosa-MG, 2017.....	13
Figura 3 - Bandejas semeadas e vasos com as plantas no momento do transplântio.	15
Figura 4 – Delineamento em blocos casualizados utilizado no experimento.....	18
Figura 5 – Leituras espectrais sendo realizadas utilizando a <i>plant probe</i> , (a); locais utilizados para leitura da resposta espectral das folhas (b).	20
Figura 6 – Obtenção dos valores SPAD das folhas do tomateiro.....	20
Figura 7 - Defeitos encontrados nos frutos de tomate. (a) podridão apical; (b) deformação; (c) fruto rachado; (d) fruto aberto.	23
Figura 8 – Posicionamento do colorímetro para aquisição das coordenadas de cor Lab (Fonte: MINOLTA).	24
Figura 9 - Temperaturas diurnas, noturnas e temperatura ideal.	27
Figura 10 - Radiação solar durante o ciclo e limite trófico para o tomate.	28
Figura 11 - Valores SPAD e NSI entre os tratamentos NSI _{SPAD} e Referência e fertirrigações realizadas.	29
Figura 12 - Valores do NDVI e NSI entre os tratamentos NSI _{NDVI} e Referência e Referência e fertirrigações realizadas.....	30
Figura 13 - Valores do GNDVI e NSI entre os tratamentos NSI _{GNDVI} e Referência e Referência e fertirrigações realizadas.	31
Figura 14 - Valores do MCARI e NSI entre os tratamentos NSI _{MCARI} e Referência e Referência e fertirrigações realizadas.	32
Figura 15 - Valores do PSSRa e NSI entre os tratamentos NSI _{PSSRa} e Referência e Referência e fertirrigações realizadas.....	33
Figura 16 - Folha apresentando sintomas provocados por geminivirus (clorose localizada e enrugamento do folíolo) e detalhe da mosca branca, vetor do vírus sobre folha infectada.....	34
Figura 17 - Total acumulado de nitrogênio aplicado ao longo do ciclo da cultura para cada tratamento.	34
Figura 18 – Média dos espectros obtidos em diferentes datas ao longo do ciclo.....	35
Figura 19 - Sintomas visuais da deficiência de nutrientes nas folhas no 50º DAT.	36
Figura 20 – Correlação e linha de tendência entre os valores SPAD e reflectância nos comprimentos de onda azul (acima) e vermelho(abaixo).....	37

Figura 21 - Comportamento espectral da 4ª folha completamente expandida ao longo do ciclo por tratamento..... 39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Pigmentos associados à transferência de energia para o processo fotossintético.....	9
Tabela 2 - Propriedades químicas do solo utilizados no experimento	14
Tabela 3 - Granulometria do solo utilizados no experimento	14
Tabela 4 – Distribuição dos fertilizantes ao longo do ciclo do tomate.....	16
Tabela 5 - Data da aquisição dos espectros e valores SPAD.....	19
Tabela 6 - Classificação dos frutos de tomate oblongo por tamanho	22
Tabela 7 - Resultado da análise foliar para macronutrientes realizado no 50° DAT.....	28
Tabela 8 - Resultado da análise foliar para micronutrientes realizado no 50° DAT	29
Tabela 9 – Valores de F e p-valores entre os tratamentos para as variáveis de produtividade	40
Tabela 10 – Média de produtividade dos tratamentos.....	40
Tabela 11 – Valores de F e p-valores entre os tratamentos para as variáveis de qualidade dos frutos.....	41
Tabela 12 – Resultado das análises de qualidade dos frutos de tomate	41
Tabela 13 - ANOVA para o fator parcial de produtividade do nitrogênio.....	42
Tabela 14 – Comparação entre as médias do PFP _N para os tratamentos.....	43

RESUMO

OLIVEIRA, Thiago Furtado, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, dezembro de 2017. **Índice de suficiência de nitrogênio como ferramenta para adubação à taxa variada do tomate.** Orientador: Francisco de Assis de Carvalho Pinto. Coorientadores: Derly José Henriques da Silva e Fernando França da Cunha.

A cultura do tomate está dentre as mais exigentes em adubação nitrogenada. A elevada mobilidade que este elemento possui no solo pode representar risco ao meio ambiente, uma vez que a aplicação de nitrogênio de forma excessiva resulta em perdas por lixiviação, que além de contaminar águas subterrâneas reduz a eficiência no seu uso. Portanto, o objetivo deste estudo foi avaliar metodologia para recomendação da adubação nitrogenada do tomate tutorado com a taxa variada de fertilizante com base no comportamento espectral das folhas. Os tratamentos consistiram de uma parcela de referência (dose de 300 kg.ha⁻¹) e cinco tratamentos que tiveram o Índice de Suficiência de Nitrogênio (NSI) calculados com os índices espectrais NDVI, GNDVI, MCARI, PSSRa e o valor SPAD obtido com um medidor de clorofila Minolta SPAD-502. A dose total foi dividida semanalmente ao longo do ciclo e os tratamentos receberam ou não nitrogênio com base no NSI calculado para cada índice. O experimento foi conduzido em blocos casualizados, com seis repetições. As respostas espectrais e valores SPAD das folhas foram obtidas aos 29º, 36º, 44º, 50º, 69º, 77º, 97º e 105º dias após o transplântio. A produtividade foi avaliada levando-se em consideração a classificação dos frutos quanto ao calibre (pequenos, médios e grandes) e viabilidade dos frutos (comerciais e defeituosos). Também foram avaliados os descritores de qualidade cor, sólidos solúveis (SS), acidez total (pH), acidez titulável (AT) e sabor (SS/AT). Todos os índices avaliados levaram a uma redução significativa no nitrogênio aplicado durante o ciclo, com exceção do MCARI, que resultou em quantidade nitrogênio semelhante a referência. Os índices NDVI, GNDVI, PSSRa e valor SPAD apresentaram redução do total de nitrogênio aplicado, variando de 25,2% a 43,8%, sem redução significativa na produtividade ou qualidade dos frutos. A produtividade de frutos comerciais variou de 2332,9 a 2773,8 g.planta⁻¹ entre os tratamentos. Dentre os tratamentos aplicados, somente o NDVI e valor SPAD apresentaram melhoria significativa no fator parcial de produtividade do nitrogênio.

ABSTRACT

OLIVEIRA, Thiago Furtado, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, December, 2017. **Nitrogen sufficiency index as a tool for tomato variable rate fertilization.** Adviser: Francisco de Assis de Carvalho Pinto. Co-advisers Derly José Henriques da Silva and Fernando França da Cunha.

The tomato crop is among the most demanding in nitrogen fertilization. The high mobility that this element presents in the soil can represent a risk to the environment, since the application of nitrogen excessively results in leachate losses, which in addition to contaminating groundwater reduces the efficiency in its use. Therefore, the objective of this study was evaluate the methodology for the recommendation of the nitrogen fertilization for the tanned tomatoes with dose at a varied rate of fertilizer based on the spectral behavior of the leaves. The treatments consisted of a reference plot (300 kg.ha⁻¹ dose) and five treatments that had the Nitrogen Sufficiency Index (NSI) calculated with the spectral indices NDVI, GNDVI, MCARI, PSSRa and the SPAD value obtained with a Minolta SPAD-502 chlorophyll meter. The total dose was divided weekly over the course of the cycle and the treatments received or not received NSI based on the NSI calculated for each index. The experiment was conducted in a randomized block design with six replicates. The spectral responses and leaf SPAD values were obtained at 29°, 36°, 44°, 50°, 69°, 77°, 97° and 105° days after transplanting. The productivity was evaluated according to the size of the fruits (small, medium and large) and fruit viability (commercial and defective). The descriptors of quality, color, soluble solids (SS), total acidity (pH), titratable acidity (AT) and flavor (SS/AT) were also evaluated. All indices evaluated led to a significant reduction in nitrogen applied during the cycle, with the exception of MCARI, which resulted in similar nitrogen reference amount. The NDVI, GNDVI, PSSRa and SPAD values showed a reduction of the total nitrogen applied, varying from 25.2% to 43.8%, without significant reduction in fruit productivity or quality. The yield of commercial fruits ranged from 2332.9 to 2773.8 g.plant⁻¹ among treatments. Among the applied treatments, only NDVI and SPAD value showed a significant improvement in the partial factor of nitrogen productivity.

1 INTRODUÇÃO

O tomate é um fruto amplamente consumido de diversas formas, e um constituinte importante para uma dieta saudável. O consumo regular de tomate pode ser associado a redução nos riscos de várias formas de câncer e doenças cardíacas (GIOVANNUCCI, 1999; RAO, 2002; CHANG e LIU, 2007).

A produção mundial deste fruto vem apresentando constante crescimento, batendo recorde de produção em 2014 com mais de 170 milhões de toneladas. Comparando a evolução na produção de 1994 a 2014, observa-se um crescimento na produção da ordem de 105,4%, com um aumento de 59,8% da área cultivada o que resulta em um aumento na produtividade da cultura na dimensão de 28%. Quando observamos o mercado nacional, o ganho na produção é menos pronunciado, porém é, em sua maior parcela, impulsionado pelo aumento na produtividade. A produção nacional subiu de 2,68 milhões de toneladas em 1994 para 4,30 milhões de toneladas em 2014, com um aumento 3,9% na área cultivada, ou seja, a produtividade nacional cresceu 54% nos últimos 20 anos (FAOSTAT, 2017). Este aumento na produtividade é consequência do melhoramento genético e técnicas de cultivo mais adequadas.

Dentre as olerícolas de interesse no estado de Minas Gerais, o tomate está entre as mais exigentes em adubação nitrogenada, com doses recomendadas que podem chegar a 400 kg/ha para o caso do tomate tutorado, dependendo do tipo de solo (RIBEIRO, GUIMARÃES e ALVAREZ, 1999).

O nitrogênio (N) é um macro nutriente que afeta diretamente o ciclo do tomate. Sua escassez está relacionada com redução do crescimento, da produção (SAINJU, SINGH e WHITEHEAD, 2000) e senescência antecipada das folhas. O excesso pode aumentar o vigor da planta, estendendo seu ciclo, causando atraso na colheita (GIANQUINTO *et al.*, 2011). O N utilizado na agricultura, em grande parte apresenta elevada reatividade, sendo altamente móvel na biosfera. Seu excesso na forma de NO_3 pode ser lixiviado e/ou escoado pela água das chuvas ou irrigação excessiva (ROBERTSON e VITOUSEK, 2009) e representa risco de contaminação dos reservatórios de água subterrâneos e cursos d'água (WOOD *et al.* 1993; HABOUDANE *et al.*, 2002; GIANQUINTO *et al.*, 2011). Perdas também podem ocorrer na forma gasosa, com liberação de dióxido de nitrogênio (NO_2) e óxidos reativos (NO_x) produzido pelo processo de nitrificação e desnitrificação, e volatilização da amônia (NH_3) (ROBERTSON e VITOUSEK, 2009).

O N é frequentemente aplicado no pré-plantio, no plantio e de modo mais recente durante o crescimento da cultura, porém a absorção de N pelas culturas depende de fatores que influenciam o seu desenvolvimento, tal como radiação, temperatura e disponibilidade de água. Portanto, visando minimizar as perdas de N e reduzir custos, a adubação nitrogenada deve ser fornecida nos momentos em que as plantas mais necessitam, o que pode variar com seu estágio de desenvolvimento. Esta estratégia é conhecida como ‘otimização dinâmica do fornecimento de N (dynamic optimization of N supply)’ e pode ser estabelecida através da aplicação a taxa variada (GIANQUINTO *et al.*, 2011).

O N é constituinte fundamental das clorofilas a e b, sendo que diversos autores comprovaram a relação entre a concentração de clorofila e N em diferentes espécies de plantas (VOS e BOM, 1993; YODER e PETTIGREW-CROSBY, 1995; BARET, HOULÈS e GUÉRIF, 2007; CLEVERS e GITELSON, 2013). Esta relação é explicada pelo fato que 50% a 70% do N total das folhas são integrantes de enzimas que estão associadas aos cloroplastos (QUADROS *et al.*, 2010).

Dentro do espectro visível (400-700nm) da radiação eletromagnética, as clorofilas apresentam picos de absorção nos comprimentos de onda azul e vermelho (455 e 642 nm para clorofila a e 429 e 659 nm para clorofila b COMAR e ZSCHEILE, 1942). Possuir mais de um pico de absorção possibilita a diferenciação das clorofilas de outros pigmentos foliares como os carotenoides e outros componentes não fotossintetizantes, por mais que o pigmento possua máxima absorção em comprimento de onda concomitante com um dos picos de absorção da clorofila, o outro pico torna possível sua diferenciação (WU *et al.*, 2008; SADAVA *et al.*, 2011). Fatos que tornam o comportamento espectral das plantas uma ferramenta de grande valia para agricultura de precisão, possibilitando identificação indireta do estresse resultante da falta do N.

Nos últimos anos, diversos estudos foram conduzidos com finalidade de identificar o estado nutricional do N no tomateiro de forma não destrutiva, porém existe uma carência de trabalhos relacionados a aplicação do N a taxa variada, principalmente quando a cultura de interesse é o tomate tutorado. O instituto Potash & Phosphate Institute (PPI), em boletim sobre manejo da fertilização a sitio-especifico, apresenta diretrizes para recomendação de N a taxa variável em milho e trigo baseando-se nas leituras realizadas com o medidor portátil de clorofila foliar, conhecido como SPAD. O método é fundamentado na comparação de leituras realizadas com SPAD em uma parcela referência (que recebe a dose máxima de N, possuindo dimensões reduzidas e localizada próxima às parcelas que se deseja realizar o manejo) com os valores SPAD da área a ser

adubada. Tal comparação é realizada por intermédio do índice de suficiência de nitrogênio (NSI), sendo que, quando o índice assume valores abaixo de 95% o N deve ser corrigido, ou poderá levar a redução na produtividade (FRANCIS e PIEKIELEK). Levando em consideração que a parcela de referência e as parcelas alvo estão nas mesmas condições edafoclimáticas, é esperado que a referência alcance o máximo potencial de absorção de N para tais condições e irá agir como indicador para o N necessário às outras parcelas. O presente estudo visa abordar tal metodologia na cultura do tomate, utilizando, além dos valores de SPAD, valores de índices de vegetação espectrais sabidamente relacionados com o teor de clorofila.

1.1 Objetivo geral

Avaliar metodologia para recomendação da adubação nitrogenada do tomate tutorado com taxa variada de fertilizante baseado no comportamento espectral das folhas.

1.2 Objetivos Específicos

- Avaliar a eficiência dos índices de vegetação espectrais NDVI, GNDVI, MCARI e PSSRa e unidades SPAD de um radiômetro portátil, como parâmetros para recomendação da adubação nitrogenada a taxa variada no tomate tutorado;
- Avaliar a resposta da produtividade da cultura, do sabor e do tamanho dos frutos para os diferentes índices de vegetação e unidades SPAD;
- Caracterizar a resposta espectral das folhas do tomate sob diferentes status de N.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Adubação nitrogenada no tomate

O nitrogênio (N) é parte integrante de vitaminas, proteínas, enzimas e das clorofilas, participando diretamente da absorção da luz, sendo fundamental para o processo de fotossíntese. Sua deficiência fará com que não ocorra a utilização da luz de forma eficiente, prejudicando inclusive a absorção de nutrientes (POTAFOS, 1996). No tomate, a deficiência de N implica em redução do crescimento e concentração de N nos tecidos enquanto aumenta a concentração de compostos secundários como o ácido fenólico e flavonoides (LABART *et al.*, 2015).

A deficiência de N está relacionada com redução do crescimento vegetativo, matéria seca das raízes, caules e frutos, número de folhas, área foliar, florescimento e produtividade. Seu excesso provoca alterações fisiológicas como excessivo crescimento vegetativo, prolonga o período vegetativo, atrasa a maturação dos frutos e cria condições favoráveis ao ataque de patógenos, além de representar um risco ao meio ambiente pela contaminação das águas subterrâneas e superficiais (FERREIRA *et al.*, 2003; GIANQUINTOA *et al.*, 2011; HAN, *et al.*, 2014).

A qualidade do fruto também é influenciada pela disponibilidade de N, podendo alterar significativamente os sólidos solúveis (SS), açúcares totais, teor de caroteno, licopeno e acidez titulável do fruto (KUSCU *et al.*, 2014). Com altas doses de N observa-se menores valores de pH, e maiores teores de açúcares totais e acidez titulável. Entretanto, as doses comumente empregadas na agricultura em diversos países poderiam ser reduzidas sem efeito significativo na qualidade final do fruto (MAY e GONZALES, 1994; RAVINDER *et al.*, 2001; LE BOT, JEANNEQUIN e FABRE, 2001).

2.2 Adubação a taxa variável

Na adubação a taxa variável, os insumos necessários ao desenvolvimento da cultura são fornecidos levando em consideração a variabilidade espacial e temporal de características que se relacionam a necessidade de determinado insumo (SAWYER, 1994; BASSO *et al.*, 2016).

Diferentes métodos podem ser utilizados para acessar o estado nutricional da cultura e assim possibilitar a sincronia entre a exigência de N da cultura e o N fornecido. Estes métodos se dividem basicamente em 2 grupos, diretos e indiretos.

Dentre os métodos diretos mais comumente utilizados, podemos destacar o índice de nutrição de nitrogênio (NNI) e a análise da seiva. O NNI é baseado na relação entre concentração de N foliar e biomassa, que é comparada com uma curva padrão, indicando se há ou não condição de N limitante a planta. O NNI é um processo demorado e oneroso quando pretende-se levar em conta a variabilidade espacial. A análise de seiva parte do princípio da quantificação do nitrato presente na seiva dos tecidos vegetais, e requer equipamentos especiais e esforço para conservação, extração, diluição e mensuração da amostra. Ambos os métodos são destrutivos no que diz respeito a amostra e difíceis de aplicar em larga escala, inviabilizando seu uso para aplicação a taxa variável do N.

Os métodos indiretos buscam acessar características que se relacionam com o N; são processos não destrutivos e, em sua maioria, mais viáveis de serem aplicados em larga escala. Dentre os quais podemos destacar o uso do clorofilômetro SPAD, as medidas de reflectância que englobam os índices espectrais, Duralex (TREMBLAY, FALLON e ZIADI, 2011), GreenSeeker (MOLIN et al., 2010; ALI et al., 2015), Crop Circle (SHAVER, KHOSLA e WESTFALL, 2011; CAO *et al.*, 2013) e CropSpec (SUDDUTH, KITCHEN e DRUMMOND, 2010). Todos os métodos baseados no comportamento espectral da cultura.

Para elucidar o benefício que a aplicação a taxa variável pode proporcionar é preciso compreender a dinâmica do nitrogênio nos solos e a forma com que a dose de N geralmente é recomendada.

O N total presente nos solos, em sua grande maioria (aproximadamente 90%), encontra-se na fração orgânica, indisponível para absorção pelas plantas. Aos poucos a matéria orgânica é mineralizada, liberando o N em forma nítrica e amoniacal, em média, de 2% a 5% do N orgânico é mineralizado a cada ano. Apesar de estarem disponíveis para absorção, as formas nítricas e amoniacal possuem elevada mobilidade, fazendo com que baixas quantidades estejam presentes nos solos (D'ANDRÉA *et al.*, 2004), portanto há a necessidade da complementação com N na forma mineral para que as culturas possam expressar plenamente seu potencial produtivo.

Geralmente, o potencial produtivo da cultura norteia a quantidade de N a ser aplicado ao longo do ciclo, onde a produtividade esperada define a quantidade de fertilizante a ser utilizada. Porém, o potencial produtivo pode variar consideravelmente

de um ciclo para o outro, pois depende de fatores bióticos e abióticos como a temperatura e umidade relativa do ar, temperatura do solo, quantidade de chuvas, radiação, ataque de pragas, etc (SOLARI, 2006).

A elevada mobilidade e a grande exigência nutricional por parte das culturas, faz com que as formas minerais do N não sejam capazes de se manter no solo por longos períodos de tempo. Deste modo, não há efeito residual prolongado da fertilização nitrogenada (GUILHERME, VALE e GUEDES, 1995).

A eficiência no uso do N depende de fatores que minimizem as perdas, portanto a sincronia entre N fornecido e N exigido pela cultura é fundamental (TREMBLAY, FALLON e ZIADI, 2011). Assim, fica evidente o impacto na eficiência do uso do N que a adubação nitrogenada a taxa variada pode trazer quando leva em consideração a alteração no potencial produtivo resultante das condições edafoclimáticas do local.

2.3 Radiômetro SPAD-502

O radiômetro SPAD utiliza a diferença de densidade ótica de dois comprimentos de onda para determinar a quantidade relativa de clorofila, o valor de saída (valor SPAD) está relacionado com o teor nitrogênio foliar (MINOLTA, 2009).

Entre os primeiros estudos que serviram de base para o desenvolvimento do SPAD está o publicado por INADA (1963), que mostrou que a relação da luz transmitida através da folha nos picos de maior (670nm) e menor (750nm) atenuação do espectro, pode ser utilizada como indicativo da concentração de clorofila, posteriormente, com o aperfeiçoamento o SPAD, passou a utilizar os comprimentos de onda de 650nm e 940nm (WOOD, REEVES e HIMELRICK, 1993).

O SPAD utiliza dois diodos emissores de luz nos comprimentos de 650 nm e 940 nm (SPAD-502) e dois fotodiodos receptores que mensuram a transmissão através da folha. De acordo com a lei de Beer, a absorvância no comprimento de onda de 650nm é proporcional as concentrações de clorofila a e b e também é proporcional ao comprimento do caminho percorrido pela radiação no interior da folha. A transmitância do infravermelho próximo (940 nm) é utilizada para contabilizar as diferenças no comprimento do percurso da radiação. O valor da leitura do radiômetro, conhecido como unidade SPAD, é um parâmetro adimensional obtido com base na equação 1. O fato das folhas das plantas não cumprirem alguns pressupostos da lei de Beer torna os valores

SPAD relativos, sendo necessário a calibração empírica dos valores SPAD para determinação do teor de clorofila (HUNT JR. e DAUGHTRY, 2014).

$$SPAD = k \log_{10} \left(\frac{T_{940}}{T_{650}} \right) \quad (1)$$

em que:

k – coeficiente de calibração;

T₆₅₀ – transmitância no comprimento de onda de 650 nm;

T₉₄₀ – transmitância no comprimento de onda de 940 nm.

Desde a década de 80, diversos trabalhos vêm sendo publicados comprovando a relação existente entre os valores de SPAD e o conteúdo de clorofila das folhas em culturas como o tomate, trigo, milho, beterraba, cevada, algodão, uva, soja, café, citrus, entre outras com coeficiente de determinação (R²) variando de 0,77 a 0,97 (TENGA, MARIE e ORMROD, 1989; NETTO *et al.*, 2005; JIFON, SYVERTSEN e WHALEY, 2005; FRITSCHI e RAY, 2007; STEELE, GITELSON e RUNDQUIST, 2008; BRITO *et al.*, 2011; DELEGIDO *et al.*, 2011).

2.4 Resposta espectral das culturas

A resposta espectral das folhas é dependente de fatores como características da superfície, espessura, conteúdo de pigmentos e estrutura interna da folha. Em plantas de diferentes espécies podem ser observados comportamento espectral levemente diferentes entre si, mas possuem um padrão comum em certos comprimentos de onda (THORP e TIAN, 2004). Na Figura 1 é mostrada a porcentagem refletida da radiação em função do comprimento de onda (400 a 2500nm) para dois tipos de folhas. Nos comprimentos de onda do visível (VIS), compreendido entre 400nm e 700nm, a reflectância fica geralmente abaixo de 10%, com pico localizado próximo a 550nm, correspondente ao verde. Este comportamento ocorre devido aos pigmentos foliares, que possuem picos de absorção da radiação dentro do espectro visível, como é o caso das clorofilas, carotenos e xantofilas (Tabela 1).

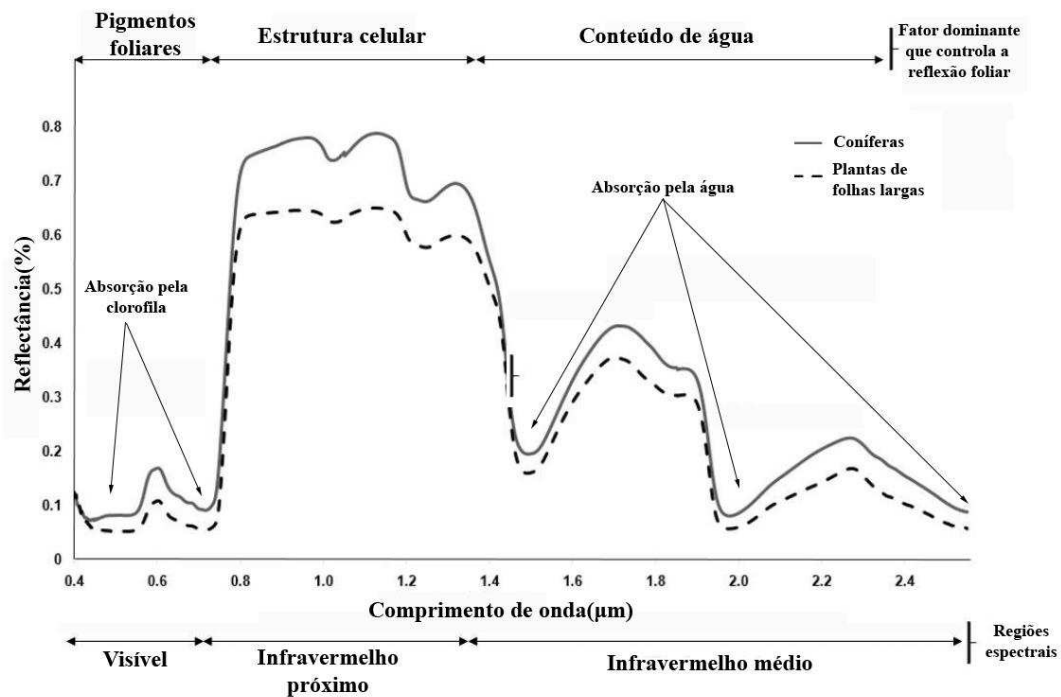


Figura 1 - Comportamento espectral das folhas de coníferas e plantas de folhas largas. FONTE: CÁRDENAS *et al.*, 2015 modificado.

Na região do infravermelho próximo (NIR) (700nm a 1300nm) o comportamento espectral é influenciado pelas estruturas celulares internas das folhas. Ao chegar no mesófilo foliar a radiação sofre múltiplas refrações e reflexões, propiciadas pela diferença entre os índices de refração do ar e das paredes celulósicas hidratadas. Geralmente ocorre a reflexão de aproximadamente 50% da radiação nessa faixa, sendo que a absorção assume valores menores que 15%. A água pode contribuir de forma indireta na resposta espectral. No infravermelho médio (1300 a 3000nm) ocorre redução da energia eletromagnética refletida devido a água em estado líquido na folha, absorções máximas são observadas nos comprimentos de onda de 1400nm, 1900nm e 2500nm (Figura 1) (MOREIRA, 2011).

Tabela 1 - Pigmentos associados à transferência de energia para o processo fotossintético

Pigmentos	Picos de absorção da radiação eletromagnética	Ocorrência
Clorofila a	430 e 660	Todas as plantas superiores
Clorofila b	453 e 643	Plantas superiores e algas verdes
α - Caroteno	420, 440 e 470	Plantas superiores e algumas algas
β - Caroteno	425, 450 e 480	Todas as plantas superiores
Xantofila	Lutol	Plantas superiores e algumas algas
	Violaxanto	Plantas superiores

FONTE: MOREIRA, 2011.

A resposta espectral do dossel pode ser alterada por fatores morfológicos como o índice de área foliar (IAF) e a forma com que as folhas estão distribuídas no dossel. Estas características impactam a forma como o infravermelho próximo é refletido, um maior IAF está relacionado com maior reflexão no NIR (CARTER, 1991; MOREIRA, 2011). A idade da planta é outro fator que tem impacto na resposta espectral, folhas em senescência onde ocorre a degradação dos pigmentos foliares, quando comparadas a folhas jovens, apresentam maior reflexão no espectro visível e no infravermelho médio e queda no NIR (MOREIRA, 2011). Folhas com maior conteúdo de água geralmente refletem o espectro como um todo de forma mais atenuada, seu impacto nas regiões VIS e NIR ocorre de forma indireta, pois o estresse hídrico pode alterar os pigmentos e estruturas das folhas (WAHID *et al.*, 2007). A deficiência nutricional tal como a do N que está relacionada diretamente com a pigmentação foliar provoca uma redução na fração de energia absorvida no VIS, principalmente nos comprimentos de onda próximos ao vermelho (picos de absorção das clorofilas a e b) e aumento na energia absorvida no NIR (SCHLEMMER *et al.*, 2005).

2.5 Índices de vegetação

Índices de vegetação são obtidos através de operações matemáticas utilizando um ou mais comprimentos de ondas (ou bandas espectrais fornecidas por sensores orbitais). Criados, entre outros fins, para reduzir o trabalho na análise de dados obtidos por sensores orbitais ressaltando a diferença entre vegetação e solo, possibilitando a extração da característica de interesse com o menor número de bandas possível. Reduzem a dimensão das informações multiespectrais e apresentam alta correlação com parâmetros agrônômicos (WIEGAND *et al.*, 1991; MOREIRA, 2011).

O NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) proposto por ROUSE *et al.* (1974), está entre os índices de vegetação mais amplamente utilizados e estudados. Baseado na diferença normalizada nos comprimentos de onda do vermelho visível (600nm a 700nm) e do NIR (800nm a 1100nm), calculado pela equação (2). Estudos comprovam sua relação com características agronômicas da cultura, como LAI, concentração de clorofila (HUNT *et al.*, 2013), biomassa (TIAN *et al.*, 2016), produtividade e radiação fotossinteticamente ativa (PAR) absorvida (WIEGAND *et al.*, 1991).

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (2)$$

onde:

NIR – reflectância nos comprimentos de onda do infravermelho próximo;

RED – reflectância nos comprimentos de onda do vermelho.

O NDVI possui limitações como a potencial interferência da reflectância do solo quando o dossel possui pouca densidade e a tendência de saturação do NDVI na estimativa do teor de clorofila quando o dossel atinge valores de LAI acima de dois ou três (THENKABAIL, SMITH e PAUW, 2000).

Tendo em vista que o NDVI apresenta tendência de saturação para valores elevados de concentração de clorofila, GITELSON, KAUFMAN e MERZLYAK (1996) propuseram o GNDVI (*green normalized difference vegetation index*), baseando-se em estudos anteriores que comprovaram a maior sensibilidade a concentração de clorofila no comprimento de onda 550nm quando comparado a outros comprimentos de onda onde ocorre a máxima absorção da radiação pelos pigmentos fotossintetizantes, incluindo o vermelho (670nm). O GNDVI é calculado segundo a equação (3). O GNDVI também mostra correlação com outras características agronômicas das culturas como o LAI (HUNT *et al.*, 2010), biomassa (MOGE *et al.*, 2004; INOUE *et al.*, 2015), produtividade e N absorvido pela cultura (MOGE *et al.*, 2004).

$$GNDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{green}}{\rho_{NIR} + \rho_{green}} \quad (3)$$

onde:

ρ_{green} – reflectância no comprimento de onda do verde (550nm).

O MCARI (*Modified Chlorophyll Absorption in Reflectance Index*), proposto por DAUGHTRY *et al.* (2000) como modificação do CARI (*Chlorophyll Absorption in Reflectance Index*), utiliza a relação entre o comprimento de onda de maior absorção da clorofila *a* e os comprimentos de onda de 550nm e 700nm para minimizar o efeito conjunto da reflectância do solo e dos materiais não fotossintetizantes, é definido segundo equação (4). O CARI foi desenvolvido com intensão de reduzir a variabilidade na radiação fotossinteticamente ativa provocada pela presença de materiais não fotossintetizantes (e.g. β -caroteno e xantofilas). Utiliza comprimentos de onda de mínima absorção dos pigmentos fotossintetizantes (centrados em 550nm e 700nm) em conjunto com o comprimento de onda de maior absorção da clorofila *a* (aproximadamente 670nm). O comprimento de onda de 700nm é adotado por ser o limiar entre a porção do espectro dominada pela absorção dos pigmentos e o começo da porção *red edge* onde as características estruturais da vegetação definem o comportamento espectral (KIM *et al.*, 1994)

$$MCARI = [(\rho_{700} - \rho_{670}) - 0.2 \times (\rho_{700} - \rho_{550})] \times \frac{\rho_{700}}{\rho_{670}} \quad (4)$$

onde:

ρ_{700} – reflectância no comprimento de onda de 700nm;

ρ_{670} – reflectância no comprimento de onda de 670nm;

ρ_{550} – reflectância no comprimento de onda de 550nm.

Desenvolvido especificamente para responder a variações na clorofila *a*, o índice $PSSR_a$ (*pigment-specific simple ratio*), proposto por BLACKBURN (1998), apresentou boa correlação com a concentração de clorofila por unidade de massa tanto a nível foliar quanto a nível de dossel. O $PSSR_a$ utiliza a razão entre o NIR 800nm e o comprimento de onda de máxima absorção da clorofila *a* 680nm como mostra a equação (5). De fato, há uma correlação positiva entre os valores do $PSSR_a$ e valores SPAD, o índice também mostrou correlação positiva com a biomassa seca em todos os estágios vegetativos do trigo, com queda de correlação no estágio de enchimento dos grãos (BABAR *et al.*, 2006).

$$PSSR_a = \frac{\rho_{800}}{\rho_{680}} \quad (5)$$

onde:

ρ_{800} — reflectância no comprimento de onda de 800nm;

ρ_{680} — reflectância no comprimento de onda de 680nm;

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização do Experimento

O experimento foi realizado na Unidade de Ensino Pesquisa e Extensão UEPE - Horta Velha, da Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa - MG, dentro de Ambiente Protegido coberto com filme plástico Suncover AV Blue 120 μm de espessura (Figura 2), situada na latitude 20°45'S, na longitude 42°50'W e altitude de 648m, nos períodos de fevereiro a agosto de 2017.



Figura 2 – Experimento instalado no interior do Ambiente Protegido, Viçosa-MG, 2017.

Os vasos utilizados possuíam 30cm de diâmetro e volume de 10 litros. O solo utilizado para preenchimento dos vasos foi composto de 75% terra de barranco e 25% areia, resultando em uma classificação textural franco-argilo-arenoso. As características físico químicas do solo são mostradas nas

Tabela 2 e Tabela 3.

Tabela 2 - Propriedades químicas do solo utilizados no experimento

Propriedades Químicas		
pH_{H2O}	5,3	
P	4,9	mg/dm ³
K	60,0	
Ca²⁺	0,4	cmol _c /dm ³
Mg²⁺	0,1	
Al³⁺	0,0	
H + Al	2,0	
SB	0,7	
CTC (t)	0,7	
CTC (T)	2,7	
V	25,0	%
M	0,0	
MO	1,1	dag/kg
P-rem	13,7	mg/L
Zn	1,1	mg/dm ³
Fe	96,5	
Mn	28,2	
Cu	1,3	
B	0,0	
S	12,3	

pH em água KCl e CaCl₂ – relação 1:2,5; P, Na, K, Fe, Zn, Mn, Cu – Extrator de Mehlich 1; Ca, Mg, Al extraído com KCl 0,1 mol/L; B extraído com água quente; S extraído com fosfato monocálcio em ácido acético; MO oxidação Na₂Cr₂O₇ 4N + H₂SO₄ 10N.

Tabela 3 - Granulometria do solo utilizados no experimento

Propriedades Físicas		
Areia	Silte	Argila
----- % -----		
28,0	6,0	66,0

As mudas foram produzidas em Ambiente Protegido da própria UEPE, utilizando bandejas de PET contendo 128 células preenchidas com substrato Carolina Padrão (Carolina Soil do Brasil) (Figura 3). O transplântio foi realizado quando as mudas

possuíam de três a quatro pares de folhas, em 19 de fevereiro. Foi utilizado a variedade de tomate de mesa Santa Cruz híbrido Santyno F1 devido a sua elevada resistência ao TYLCV (geminivírus), TSWV (vira-cabeça) e a nematoides. O espaçamento entre os centros dos vasos adotado foi de 30 cm entre os vasos da mesma linha e 100 cm entre linhas, resultando em uma população de 33.333 pl ha⁻¹. Os tratos culturais como capina, desbrota, tutoramento, fertirrigação, controle de pragas e doenças foram feitos semanalmente.



Figura 3 - Bandejas semeadas e vasos com as plantas no momento do transplântio.

3.2 Adubação do tomate

A adubação foi realizada com base no resultado da análise de solos e recomendação da 5ª Aproximação para corretivos e fertilizantes em Minas Gerais (RIBEIRO *et al.*, 1999) para o tomate tutorado, sendo recomendado 300kg ha⁻¹ de N, 900 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 600 kg ha⁻¹ K₂O. Antes do transplântio, o pH foi corrigido com dose equivalente 1,954 t ha⁻¹ de calcário dolomítico (PRNT=76%), elevando-se a saturação por base para 80%. O parcelamento da dose foi realizado semanalmente com base em proposição feita por ALVARENGA (2004), modificado para tornar possível a fertilização com zero N (Tabela 4), sem que houvesse alteração nos demais macronutrientes, utilizando os fertilizantes hidrossolúveis disponíveis (MAP, MKP, nitrato de potássio, sulfato de potássio). Os tratamentos receberam o equivalente a 4 kg ha⁻¹ de B e 2 kg ha⁻¹ de Zn ao longo das semanas 6 a 13 após o transplântio e 20 kg ha⁻¹ de Mg ao longo das semanas 1 a 15 após transplântio.

Tabela 4 – Distribuição dos fertilizantes ao longo do ciclo do tomate

Semana	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Mg	B	Zn
	kg ha ⁻¹					
1	0	78,3	0			
2	0,9	2,7	1,8			
3	0,9	2,7	1,8			
4	0,9	2,7	1,8			
5	1,5	4,5	3			
6	2,4	10,8	4,8			
7	3,9	11,7	7,8			
8	37,2	103,5	74,4			
9	37,2	103,5	74,4	20		
10	37,2	103,5	74,4		4	2
11	37,2	82,8	74,4			
12	37,2	62,1	74,4			
13	29,7	62,1	59,4			
14	22,2	62,1	44,4			
15	18,6	62,1	37,2			
16	18,6	62,1	37,2			
17	14,7	62,1	29,4			
18	0	20,7	0			
19	0	0	0			

N – nitrogênio; P₂O₅ – pentóxido de fósforo; K₂O – óxido de potássio; Mg – magnésio; B – boro; Zn – zinco.

Os tratamentos consistiram em uma parcela de referência que recebeu 100% do N, conforme Tabela 4, e cinco técnicas diferentes para recomendação de N em doses com taxa variada, baseadas no NSI calculado semanalmente para cada tratamento. Os valores de NSI foram calculados segundo a equação (6), exceto para o NSI_{MCARI} pois a relação entre o índice MCARI e a concentração de clorofila é inversa, para este caso, foi utilizado o inverso da equação (6), os valores utilizados foram as médias dos índices nos seis blocos. Quando a média do NSI era menor que 0,95, o tratamento recebia a dose de N prevista para semana, caso contrário, a fertirrigação era realizada sem o N. Sendo os tratamentos a taxa variada foram fundados nos seguintes índices:

- NSI_{SPAD} – teor relativo de clorofila, SPAD;
- NSI_{NDVI} – Normalized Difference Vegetation Index banda estreita, NDVI_n;
- NSI_{GNDVI} – Green Normalized Difference Vegetation Index, GNDVI;
- NSI_{MCARI} – Modified Chlorophyll Absorption Ratio Index, MCARI;
- NSI_{PSSRa} – Pigment Specific Simple Ratio (clorofila a) PSSR_a.

$$NSI = \frac{\text{Valor do índice no tratamento que se deseja fertilizar}}{\text{Valor do índice no tratamento com fertilização N adequada}} \quad (6)$$

Semanalmente os fertilizantes eram pesados utilizando uma balança Semi-Analítica Shimadzu BL 3200H com precisão 0,01g e diluídos para formar as soluções concentrada com e sem N (respeitando a compatibilidade entre fertilizantes), atendendo os valores mostrados na Tabela 4. Para evitar que um volume excessivo provocasse a percolação da água através do volume de terra contido nos vasos, a solução concentrada foi diluída de forma que um litro fosse correspondente a dose semanal de fertilizante para cada vaso. Previamente a salinidade da água utilizada para fertirrigação era testada, com o total de sais por planta previsto para semana diluído em um litro, caso sua condutividade elétrica ultrapasse 2,5 dS m⁻¹, valor de salinidade do solo a partir qual há perdas de produtividade no tomate (MAYNARD e HOCHMUTH, 2007), a fertirrigação era realizada mais de uma vez por semana, diluindo a solução afim de reduzir a salinidade da água para valores abaixo de 2,5 dS m⁻¹.

O volume de um litro foi aplicado individualmente em cada planta do tratamento de forma aleatória até que todas as plantas recebessem a dose. Este processo foi realizado separadamente para os tratamentos que receberam N e para os que não receberam N, sendo os utensílios lavados antes da troca de tratamentos.

3.3 Delineamento experimental e análises estatísticas

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos casualizados, com seis tratamentos (Ref, NSI_{SPAD}, NSI_{NDVI}, NSI_{GNDVI}, NSI_{MCARI}, NSI_{PSSRa}) e seis repetições. As parcelas foram compostas por seis vasos, sendo que os dois vasos das extremidades foram considerados como bordadura não sendo analisados durante a condução do experimento (Figura 4).

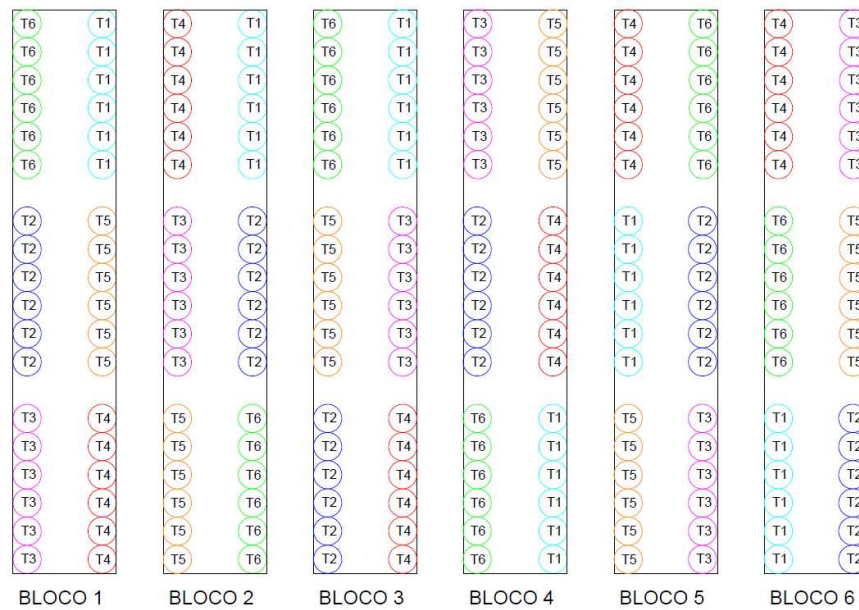


Figura 4 – Delineamento em blocos casualizados utilizado no experimento.

A normalidade dos dados foi testada utilizando o teste de Lilliefors, para igualdade das variâncias utilizou-se o teste de Bartlett. As análises foram realizadas através da análise de variância (ANOVA) e teste Tukey a 5% de probabilidade para comparação das médias. Todos os procedimentos foram realizados no R.

3.4 Obtenção da leitura SPAD e Resposta Espectral

As leituras foram realizadas nas datas mostradas na Tabela 5, no período da manhã entre 7:00 e 12:00 horas. Em cada repetição foram avaliadas as quatro plantas do centro, descartando-se uma planta de cada extremidade (bordadura). Tendo em vista que o N possui boa mobilidade nas plantas, sua deficiência tende a ser mais sensível em folhas velhas devido ao transporte desse nutriente para as partes mais jovens (MALAVOLTA *et al.*, 1997), dessa maneira, as leituras foram realizadas na 4ª folha completamente expandida e saudável.

Tabela 5 - Data da aquisição dos espectros e valores SPAD

Data	DAT (SAF)
20/03	29 (4 ^a)
27/03	36 (5 ^a)
04/04	44 (6 ^a)
10/04	50 (7 ^a)
29/04	69 (10 ^a)
07/05	77 (11 ^a)
27/05	97 (14 ^a)
04/06	105 (15 ^a)

DAT – dias após o transplântio;
 SAT – semanas após o transplântio.

O período de estabelecimento das plantas nos vasos durou três semanas, neste período não foram obtidos os espectros de reflectância nem os valores SPAD devido a pequena área foliar. Os tratamentos começaram a ser aplicados a partir de 29^o DAT.

Nas datas 37^o, 52^o, 61^o, 88^o DAT e do 113^o DAT em diante não foi possível realizar as leituras devido a problemas, tais como o mau funcionamento do equipamento, correção na fertirrigação e ataque por geminivirus, impedindo a aquisição dos dados espectrais e valores SPAD, neste período os tratamentos não foram aplicados, sendo todos os tratamentos adubados com doses de N iguais a parcela Referência.

As reflectâncias espectrais das folhas foram obtidas com o espectroradiômetro ASD FieldSpec® HandHeld 2™, sensível aos comprimentos de onda compreendidos entre 325 e 1075 nm, com resolução de 1 nm, com a ponta de prova para medidas de contato “plant probe” capaz de captar a reflectância de um ponto com 10 mm de diâmetro (Figura 5). Antes de realizar a medições, a lâmpada permaneceu acesa por noventa minutos, afim de estabilizar o espectro de radiação emitido. Imediatamente antes de realizar as leituras iniciais e a cada trinta minutos foram realizadas a calibração do instrumento utilizando como referência o Spectralon® SRS-99. As medidas foram realizadas de forma aleatória entre os blocos, tomando dois pontos da 4^a folha completamente expandida, evitando a nervura central dos folíolos. Dessa maneira, o valor de cada repetição foi a média dos oito espectros. Devido aos extremos ruidosos das medições espectrais, foram utilizadas as informações da faixa que vai 450 a 900 nm.



(a)



(b)

Figura 5 – Leituras espectrais sendo realizadas utilizando a *plant probe*, (a); locais utilizados para leitura da resposta espectral das folhas (b).

As leituras SPAD foram realizadas nas mesmas folhas e pontos utilizados para obter a resposta espectral, utilizando o medidor de clorofila Minolta SPAD-502. Em cada folha foram realizadas seis leituras, assim para cada repetição foi considerado o valor médio das vinte e quatro leituras realizadas nas quatro plantas (Figura 6).



Figura 6 – Obtenção dos valores SPAD das folhas do tomateiro.

Os índices espectrais foram calculados utilizando os espectros obtidos com FieldSpec® HandHeld 2™ de acordo com as equações abaixo.

$$NDVI = \frac{\rho_{800} - \rho_{680}}{\rho_{800} + \rho_{680}} \quad (7)$$

$$GNDVI = \frac{\rho_{801} - \rho_{550}}{\rho_{801} + \rho_{550}} \quad (8)$$

$$MCARI = [(\rho_{700} - \rho_{670}) - 0.2 * (\rho_{700} - \rho_{550})] * \left(\frac{\rho_{700}}{\rho_{670}}\right) \quad (4)$$

$$PSSR_a = \frac{\rho_{800}}{\rho_{680}} \quad (5)$$

em que:

ρ_{800} – reflectância no comprimento de onda de 800nm;

ρ_{680} – reflectância no comprimento de onda de 680nm;

ρ_{801} – reflectância no comprimento de onda de 801nm;

ρ_{550} – reflectância no comprimento de onda de 550nm;

ρ_{700} – reflectância no comprimento de onda de 700nm;

ρ_{670} – reflectância no comprimento de onda de 670nm.

3.5 Produtividade das plantas

Foram utilizadas as quatro plantas centrais de cada repetição para realizar a colheita dos frutos. Os frutos foram colhidos semanalmente a partir da 12ª SAT até a 25ª SAT, classificados quanto ao tamanho, de acordo com norma divulgada na portaria nº85 de 2002 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA, 2002) e pesados.

Os valores de produção utilizados nas equações a seguir foram referentes a soma das colheitas semanais.

3.5.1 Produtividade de frutos grandes (PFG), médios (PFM) e pequenos (PFP)

Os frutos, previamente classificados por tamanho do diâmetro transversal de acordo com a Tabela 6, foram pesados em uma balança Semi-Analítica Shimadzu BL 3200H. A produtividade de cada parcela foi calculada segundo equação (9).

Tabela 6 - Classificação dos frutos de tomate oblongo por tamanho

Classe	(MDT) (mm)
Defeituosos	Menor que 40
Pequeno	Maior que 40 até 50
Médio	Maior que 50 até 60
Grande	Maior que 60

MDT – maior diâmetro transversal.

FONTE: MAPA, 2002 modificado.

$$PFX = \frac{\text{Produção Frutos } X(g)}{N^{\circ} \text{ de plantas } (pl)} \quad (9)$$

em que:

X – peso por classe de tamanho dos frutos (conforme Tabela 6), grandes (G), médios (M) e pequenos (P) em gramas.

3.5.2 Produtividade de frutos comerciais (PFC)

Por frutos comerciais, entende-se os frutos pequenos, médios e grandes que não apresentem defeitos. A produtividade de frutos comerciais foi calculada de acordo com a equação (10).

$$PFC = \frac{\text{Produção Frutos Comerciais}(g)}{N^{\circ} \text{ de plantas } (pl)} \quad (10)$$

3.5.3 Produtividade de frutos defeituosos (PFD)

Os frutos defeituosos são os que apresentam MDT menor que 40 mm, podridão apical, deformidade do fruto, fruto aberto, etc. (Figura 7). A produtividade de frutos defeituosos foi calculada do acordo com a equação (11).

$$PFD = \frac{\text{Produção Frutos Defeituosos}(g)}{N^{\circ} \text{ de plantas } (pl)} \quad (11)$$



(a)



(c)



(b)



(d)

Figura 7 - Defeitos encontrados nos frutos de tomate. (a) podridão apical; (b) deformação; (c) fruto rachado; (d) fruto aberto.

3.5.4 Produtividade total (PT)

A produtividade total em g.pl^{-1} é o somatório da produção de frutos comerciais (PFC) com a produção de frutos defeituosos (PFD).

3.6 Qualidade do Fruto

Foram coletados três frutos completamente maduros do quarto cacho e levados para o laboratório para análise da cor e firmeza. A seguir, os frutos foram triturados em liquidificador e sua polpa utilizada para as análises de acidez total, acidez titulável, sólidos solúveis (SS) e sabor.

3.6.1 Cor dos frutos

A cor foi caracterizada no sistema CIELab (L = luminosidade, a variação do verde ao vermelho, b variação de azul a amarelo) utilizando o leitor de cor CR-10 Minolta, foram realizadas duas leituras na região equatorial de cada fruto conforme Figura 8.

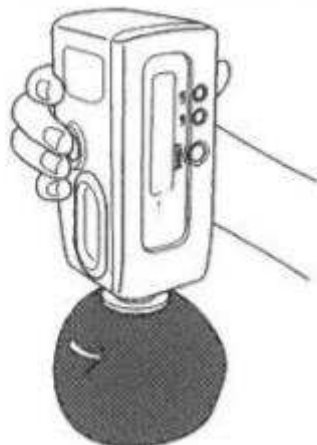


Figura 8 – Posicionamento do colorímetro para aquisição das coordenadas de cor Lab (Fonte: MINOLTA).

3.6.2 Sólidos Solúveis (SS) dos frutos

Os sólidos solúveis foram quantificados com o refratômetro digital Hanna HI96801. A polpa foi misturada e utilizada para análise sem diluição. Foram realizadas duas leituras para cada repetição, e o resultado expresso em °Brix.

3.6.3 Acidez total (pH) dos frutos

O pH da polpa foi obtido com auxílio do pHmetro de Bancada Digimed DM-22 previamente calibrado em solução tampão de pH 4,01 e 6,86. A ponta de prova foi inserida na polpa e realizada duas leituras.

3.6.4 Acidez titulável (AT) dos frutos

Para acidez titulável, uma porção de cinco gramas da polpa foi pesada, colocada em balão volumétrico de 100 mL tendo seu volume completado com água destilada. Foram pipetadas 10 mL da solução do balão volumétrico e colocadas em um Erlenmeyer, adicionou-se duas gotas de fenolftaleína 1% como indicador e a titulação foi realizada com NaOH 0,1 mol L⁻¹. Foram realizadas duas repetições para cada amostra.

A acidez titulável expressa em porcentagem de ácido cítrico foi então calculada utilizando a equação abaixo.

$$AT = \frac{V \times M \times F \times PM}{10 \times P \times n} \quad (12)$$

em que:

AT – acidez titulável expressa em porcentagem de ácido cítrico;

V – volume de NaOH gasto na titulação em mL;

M – molaridade da solução de NaOH mol/L;

F – fator de correção da solução de NaOH;

PM – peso molecular do ácido cítrico (192 g);

P – volume titulado em mL;

n – número de hidrogênios ionizáveis (3 para o ácido cítrico).

3.6.5 Sabor dos frutos

O sabor do fruto foi determinado segundo metodologia proposta por KADER *et al.* (1978a), utilizando a relação entre sólidos solúveis expresso em °Brix e acidez titulável expressa em porcentagem de ácido cítrico equação (13).

$$Sabor = \frac{SS}{AT} \quad (13)$$

em que:

SS – sólidos solúveis;

AT – acidez titulável.

3.7 Fator parcial de produtividade do nitrogênio (PFP_N)

O fator parcial de produtividade expresso em kg de fruto por kg de N aplicado foi calculado com base na equação (14) (FIXEN *et al.*, 2015). Para este fator foi considerado a produtividade total ao final do ciclo, incluindo frutos defeituosos.

$$PFP_N = \frac{Y}{N} \quad (14)$$

em que:

PFP_N – fator parcial de produtividade do nitrogênio em kg_{frutos} kg_{nitrogênio}⁻¹;

Y – produção total dos frutos em kg;

N – dose de nitrogênio aplicada kg.

3.8 Análise foliar

As amostras para análise foliar foram coletadas durante o período de florescimento (no presente estudo, no 50º DAT), segundo metodologia proposta por MALAVOLTA *et al.* (1997), utilizando a quarta folha completamente expandida. As amostras foram enviadas para laboratório para quantificar macro e micronutrientes.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As variáveis climáticas (temperatura e radiação solar) foram obtidas pela estação meteorológica de observação de superfície automática do INMET. (Estação Viçosa – A510) localizada a 1.930 metros de distância da estufa onde o experimento foi instalado.

De acordo com EMBRAPA (1993) o período de floração e frutificação é favorecido por temperaturas diurnas entre 18 e 25 °C e temperaturas noturnas entre 13 e 24 °C. Temperaturas médias acima de 28 °C prejudicam a firmeza dos frutos, podendo deixá-los amarelados em decorrência da inibição da síntese de licopeno.

Durante o período do experimento, a temperatura diurna se manteve dentro do intervalo de 18 a 25 °C durante a maior parte do ciclo, atingindo 28 °C somente no 15º DAT. A temperatura durante as noites se manteve dentro do limite de 13 a 24 °C durante a maior parte do tempo, somente ao final do ciclo atingindo valores abaixo de 13 °C. As temperaturas médias diurna e noturna durante o ciclo foram 21,5 e 16 °C respectivamente e as temperaturas mínimas e máximas observadas foram respectivamente 10 e 28 °C (Figura 9).

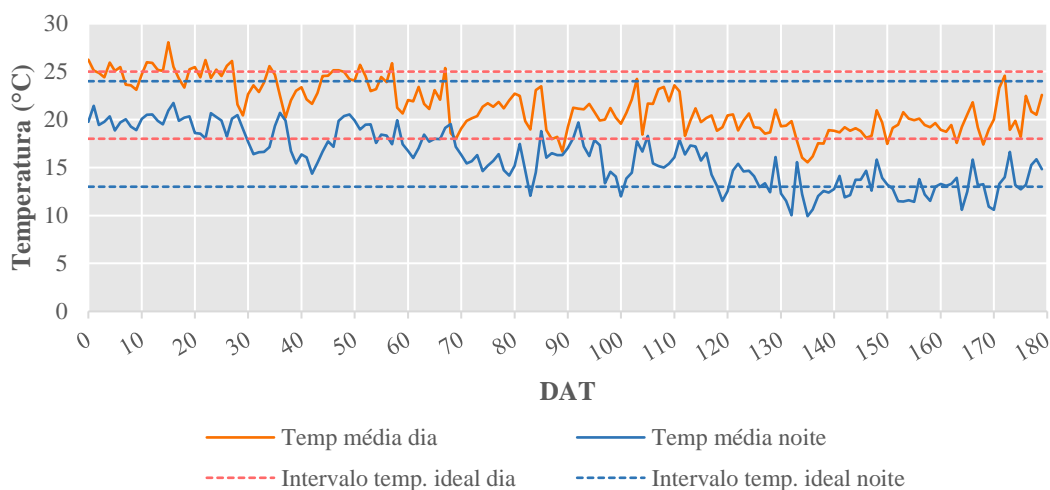


Figura 9 - Temperaturas diurnas, noturnas e temperatura ideal.

De acordo com BECKMANN *et al.* (2006) a cultura somente irá apresentar crescimento e desenvolvimento normais caso a radiação esteja acima limite trófico. Neste limite que segundo ADRIOLO (2000) para o tomate é $8,4 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$, a energia gasta com a respiração se iguala a energia produzida pela fotossíntese.

A radiação durante o ciclo apresentou média igual a 14,03 MJ.m⁻².d⁻¹, se mantendo acima do limite trófico a maior parte do tempo (Figura 10). É importante destacar que o plástico que cobre a estufa apresenta transmissão de 78 % da radiação fotossinteticamente ativa incidente.

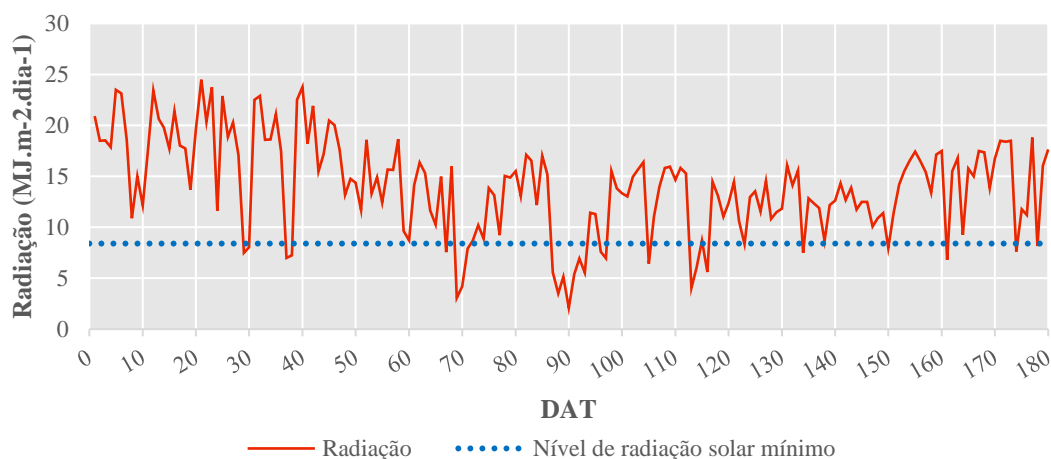


Figura 10 - Radiação solar durante o ciclo e limite trófico para o tomate.

O período compreendido entre o transplântio no 45º DAT houve erro na quantificação dos fertilizantes, implicando em uma quantidade seis vezes menor que o previsto para este período. Este fato levou a uma redução na concentração dos macros e micronutrientes presentes nas folhas, comprovado por análise foliar realizada no 50º DAT (Tabelas Tabela 7 e Tabela 8). Portanto, aos 52º e 61º DAT, os tratamentos não foram aplicados e a quantidade dos fertilizantes foi corrigida, com o déficit distribuído ao longo do restante do ciclo mantendo a dose de referência recomendada.

Tabela 7 - Resultado da análise foliar para macronutrientes realizado no 50º DAT

	N	P	K	Ca ²⁺	Mg ²⁺	S
	dag.kg ⁻¹					
Referência	1,4	0,19	1,32	2,19	0,32	0,62
Tratamentos	1,3	0,2	1,28	2,21	0,33	0,6
Referência*	3	0,35	5	1,4-1,8	0,4	0,3

N – nitrogênio; P – fósforo; K – potássio; Ca²⁺ – cálcio; Mg²⁺ – magnésio; S – enxofre.

*Valores de referência (MALAVOLTA *et al.*, 1997).

Tabela 8 - Resultado da análise foliar para micronutrientes realizado no 50° DAT

	Zn	Fe	Mn	Cu	B
	mg.kg-1				
Referência	8	38	58	6	14
Tratamentos	7	39	67	5	15.2
Referência*	60-70	500-700	250-400	10-15	50-70

Zn – zinco; Fe- ferro; Mn – manganês; Cu – cobre; B – boro.

*Valores de referência (MALAVOLTA *et al.*, 1997).

Do início das medições, do 29° o 44° DAT, houve um decréscimo gradual nos valores do NSI para o tratamento NSI_{SPAD}, possivelmente provocado pela não fertilização com N do tratamento NSI_{SPAD} no 30° DAT, momento em que o NSI apresentou valor 0,97 (Figura 11). Aos 52° e 51° DAT os tratamentos não foram aplicados, e a correção das doses de fertilizantes elevou o N aplicado o que resultou na elevação dos valores de NSI, atingindo aos 70° e 78° DAT valores acima de 1,0. Após o 78° DAT houve uma queda acentuada do NSI, indicando a necessidade de adubação nos 97° e 105° DAT.

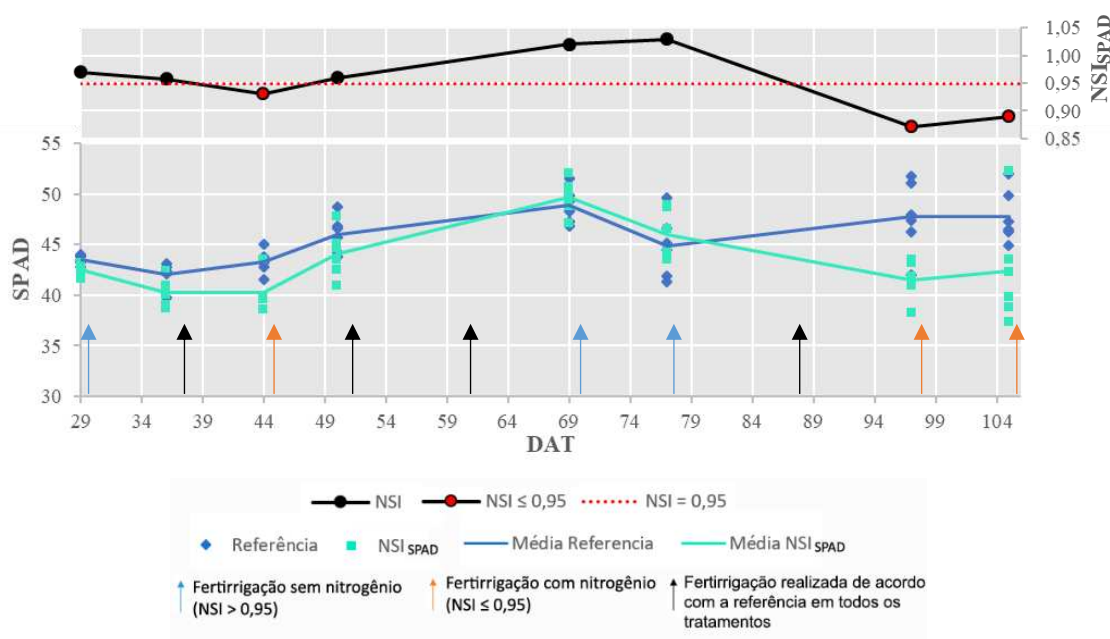


Figura 11 - Valores SPAD e NSI entre os tratamentos NSI_{SPAD} e Referência e fertirrigações realizadas.

Os valores SPAD foram mínimos aos 36° DAT da ordem de 42,1 e 40,3 para a Ref e NSI_{SPAD}, respectivamente. Os maiores valores foram observados 69° DAT iguais a 48,8 para a Ref e 49,7 para o NSI_{SPAD} (Figura 11). Os valores máximos foram compatíveis com os observados por VAUGHN *et al.* (2010) ao testar diferentes substratos para tomates em ambiente protegido, por FERREIRA *et al.* (2006) em cultura de tomate

industrial no ciclo de outono/primavera e próximo aos valores obtidos por PADILLA *et al.* (2015) em tomate de crescimento indeterminado com níveis ideais de nutrição de N.

Apesar do índice NDVI apresentar variações ao longo do ciclo, com os menores valores observados no período de deficiência de nutrientes e se elevar com o aumento da dose de N indicando sua sensibilidade ao N aplicado, o tratamento NSI_{NDVI} não apresentou valores de NSI abaixo de 0,95 em nenhum momento (Figura 12). Os valores máximos de NDVI observados estão dentro da faixa considerada como ideal por PADILLA *et al.* (2015) para o tomate com níveis ideais de nutrição por N.

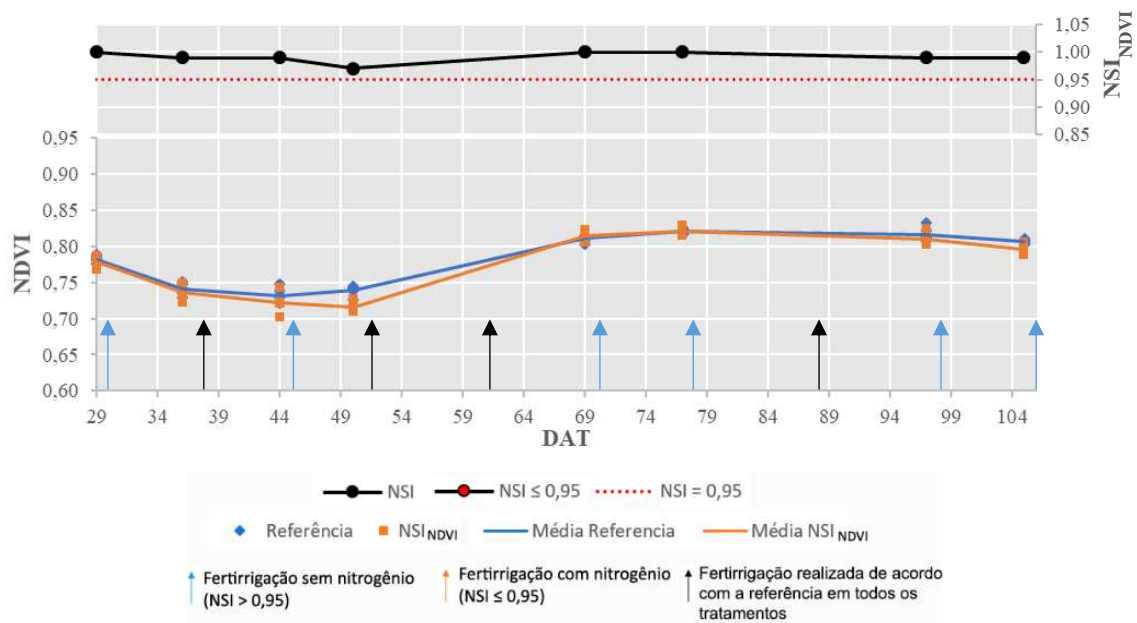


Figura 12 - Valores do NDVI e NSI entre os tratamentos NSI_{NDVI} e Referência e Referência e fertilirrigações realizadas.

O NSI para o tratamento NSI_{GNDVI} apresentou redução progressiva nos valores observados do 29° ao 50° DAT, possivelmente devido as fertilizações realizadas sem N aos 30° e 45° DAT o que levou a uma redução mais acentuada do índice no tratamento NSI_{GNDVI} que na referência. De forma análoga ao ocorrido no começo do ciclo, a queda do NSI abaixo do limiar aos 97° e 105° DAT pode estar relacionada com o período em que o tratamento NSI_{GNDVI} não recebeu N (70° e 78° DAT) (Figura 13).

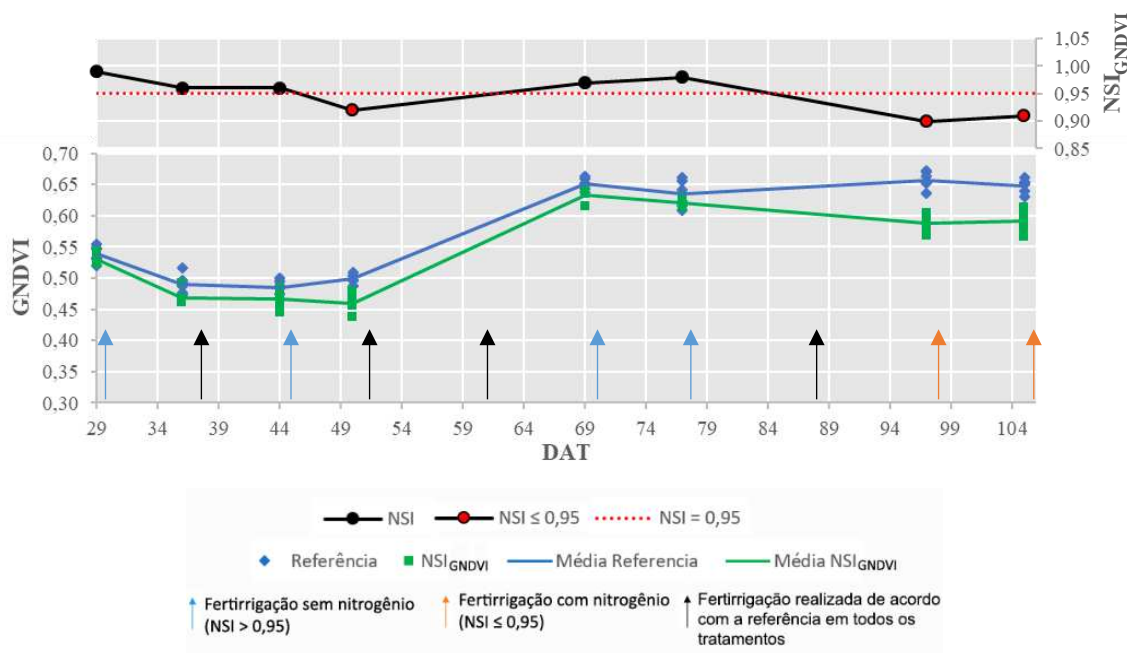


Figura 13 - Valores do GNDVI e NSI entre os tratamentos NSI_{GNDVI} e Referência e Referência e fertilirrigações realizadas.

De forma semelhante ao ocorrido com NDVI, o GNDVI apresentou elevação dos valores aos 69° e 77° DAT devido a correção da adubação. Os valores máximos de GNDVI observados estão dentro da faixa considerada como ideal por PADILLA *et al.* (2015) para o tomate com níveis ideais de nutrição por N (Figura 13).

O índice MCARI apresentou valores de NSI acima de 0,95 somente aos 29° DAT, permanecendo o restante do ciclo com valores abaixo do limiar. A queda do NSI observada no 36° DAT poderia estar associada a fertilização sem N realizada aos 30° DAT, porém comportamento igual foi observado aos 50° DAT no mesmo o tratamento NSI_{MCARI} tendo recebido dose de N idêntica a referência aos 37° e 45° DAT (Figura 14).

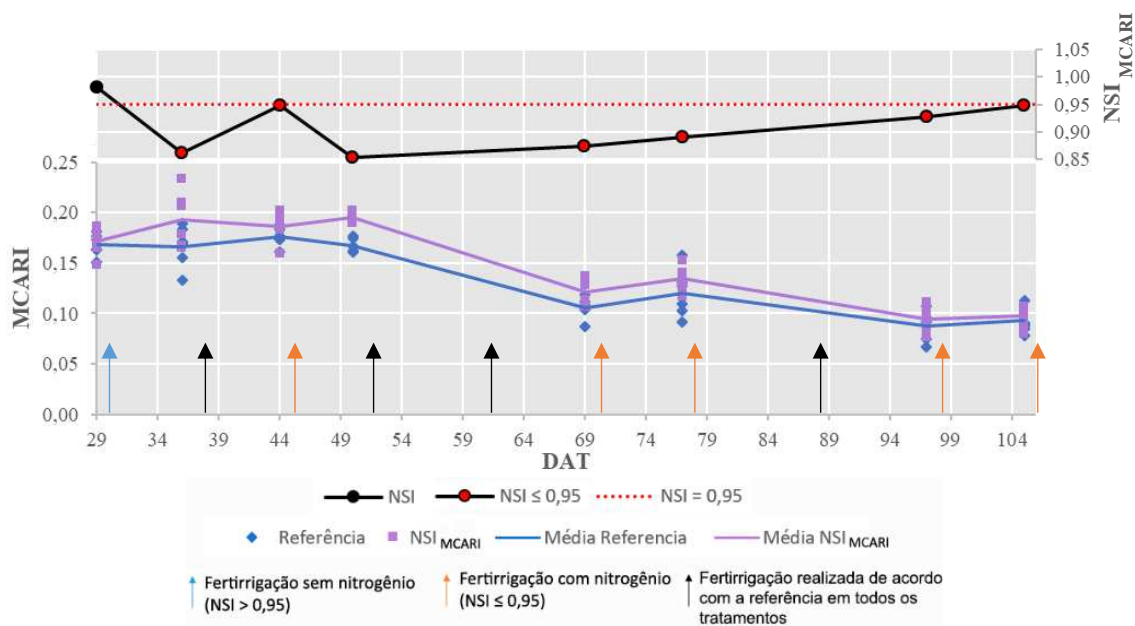


Figura 14 - Valores do MCARI e NSI entre os tratamentos NSI_{MCARI} e Referência e Referência e fertilirrigações realizadas.

O NSI para o tratamento NSI_{PSSRa} apresentou decréscimo do 29º ao 50º DAT, este efeito pode estar atribuído a menor dose de N no tratamento NSI_{PSSRa} que na referência aos 30º e 45º DAT. O período de correção na adubação aproximou as médias do PSSRa das parcelas referência e NSI_{PSSRa}, elevando os valores de NSI acima de 0,95. As fertilirrigações realizadas sem N aos 70º e 78º DAT aparentam ser responsáveis pela queda mais acentuada no PSSRa no tratamento NSI_{PSSRa} que na referência, fazendo o NSI atingir valores abaixo de 0,95 aos 97º e 105º DAT (Figura 15).

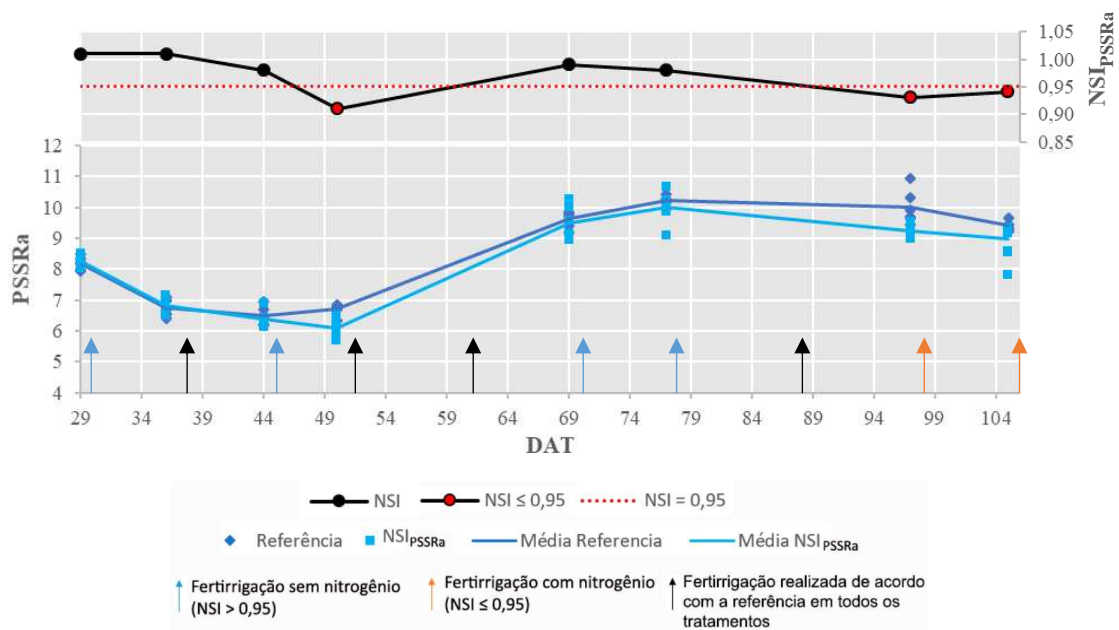


Figura 15 - Valores do PSSRa e NSI entre os tratamentos NSI_{PSSRa} e Referência e Referência e fertilirrigações realizadas.

O NSI para todos os índices com exceção do MCARI apresentou comportamento semelhante, com valores caindo gradualmente do 29° ao 50° DAT, e elevando aos 69 aos 79 DAT. A radiação solar neste período apresentou valores mais elevados entre o 29° ao 45° DAT e tendência gradual de redução da radiação do 45° ao 69° DAT. Uma vez que a radiação solar incidente, é um dos fatores que influenciam na capacidade de absorção de N (PENG e CASSMAN, 1998), a queda nos níveis de radiação 45° ao 69° DAT podem estar relacionados com o aumento do NSI nos tratamentos NSI_{SPAD}, NSI_{NDVI}, NSI_{GNDVI}, NSI_{PSSRa} durante o período de 69 aos 79 DAT, uma vez que as condições climáticas neste período pode ter reduzido o potencial de absorção do N.

Devido a infecção por geminivirus na grande maioria das plantas do experimento aos 111° DAT, os tratamentos deixaram de ser aplicados pois os danos às folhas poderiam interferir no resultado dos índices, uma vez que a doença provoca clorose localizada e deformação nas folhas (Figura 16). Desta data em diante todos os tratamentos receberam as mesmas doses de N que a referência.



Figura 16 - Folha apresentando sintomas provocados por geminivírus (clorose localizada e enrugamento do folíolo) e detalhe da mosca branca, vetor do vírus sobre folha infectada.

As fertilizações terminaram no 127º DAT. O gráfico da porcentagem do total de N aplicado em cada tratamento ao longo do ciclo da cultura é mostrado na Figura 17.

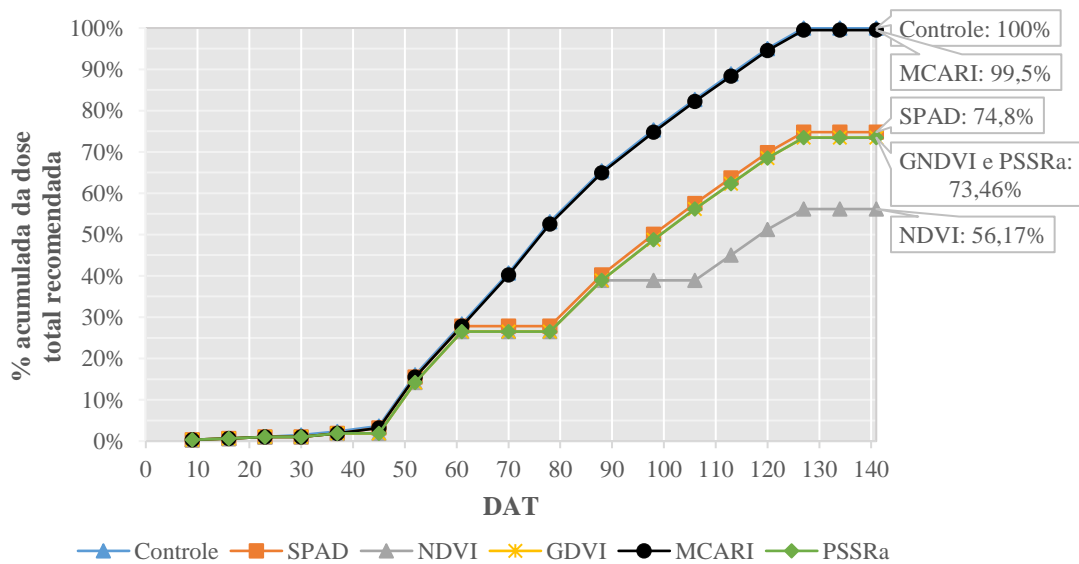


Figura 17 - Total acumulado de nitrogênio aplicado ao longo do ciclo da cultura para cada tratamento.

4.1 Resposta espectral

Devido a problemas com o funcionamento do equipamento, o mesmo precisou ser reparado no 88° DAT, impossibilitando a aquisição dos espectros na data. Foi observado um erro sistemático nos espectros obtidos após o reparo deslocando os espectros para a direita em 12nm. Portanto para o período do 97° ao 105° DAT os espectros obtidos foram rearranjados 12nm a esquerda, de forma a compensar o erro sistemático devido ao reparo do equipamento.

Os valores médios dos espectros obtidos nos 29°, 36°, 44° e 50° DAT apresentaram reflectância mais elevados nos comprimentos de onda do espectro visível, de forma mais acentuada nos comprimentos de onda do verde (550 nm) e vermelho (625 a 700 nm) e de forma menos intensa no azul (400 a 500 nm) e NIR (750 a 900 nm) quando comparados com os espectros obtidos nos 69°, 77°, 97° e 105° DAT (Figura 18). Este comportamento espectral pode ser atribuído a baixas concentrações de clorofila, como observado por GITELSON e MERZLYAK, (1994), GITELSON, GRITZ e MERZLYAK (2003) e GHULAM *et al.* (2015).

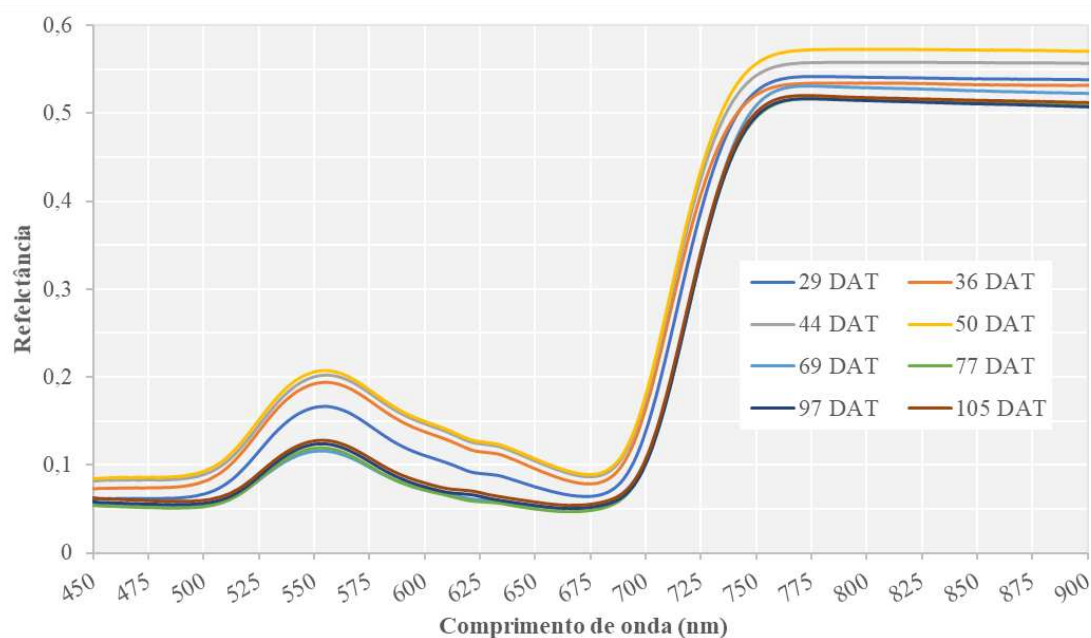


Figura 18 – Média dos espectros obtidos em diferentes datas ao longo do ciclo.

De fato, os teores de N foliar encontrados em análise foliar realizada no 50° DAT estão abaixo daquele recomendado por MALAVOLTA *et al.*, (1997) para tomate em

todos os tratamentos, como mostrado anteriormente na Tabela 7, afetando visivelmente a aparência das folhas (Figura 19). A concentração de N foliar está diretamente relacionada com a concentração de clorofila (VOS e BOM, 1993; YODER e PETTIGREW-CROSBY, 1995; BARET, HOULÈS e GUÉRIF, 2007; CLEVERS e GITELSON, 2013) sendo o comportamento espectral mostrado aos 29°, 36°, 44° e 50° DAT um indicativo de baixa concentração de N foliar. O que é reforçado pelo coeficiente de correlação negativo, estatisticamente significativo ao nível de 5% de probabilidade pelo teste *t* entre os valores SPAD e as reflectâncias nos comprimentos de onda de máxima absorção das clorofilas (Figura 20) uma vez que os valores SPAD estão comprovadamente relacionados com os teores de clorofila foliar (TENGA, MARIE e ORMROD, 1989; NETTO *et al.*, 2005; JIFON, SYVERTSEN e WHALEY, 2005; FRITSCHI e RAY, 2007; STEELE, GITELSON e RUNDQUIST, 2008; BRITO *et al.*, 2011; DELEGIDO *et al.*, 2011).



Figura 19 - Sintomas visuais da deficiência de nutrientes nas folhas no 50° DAT.

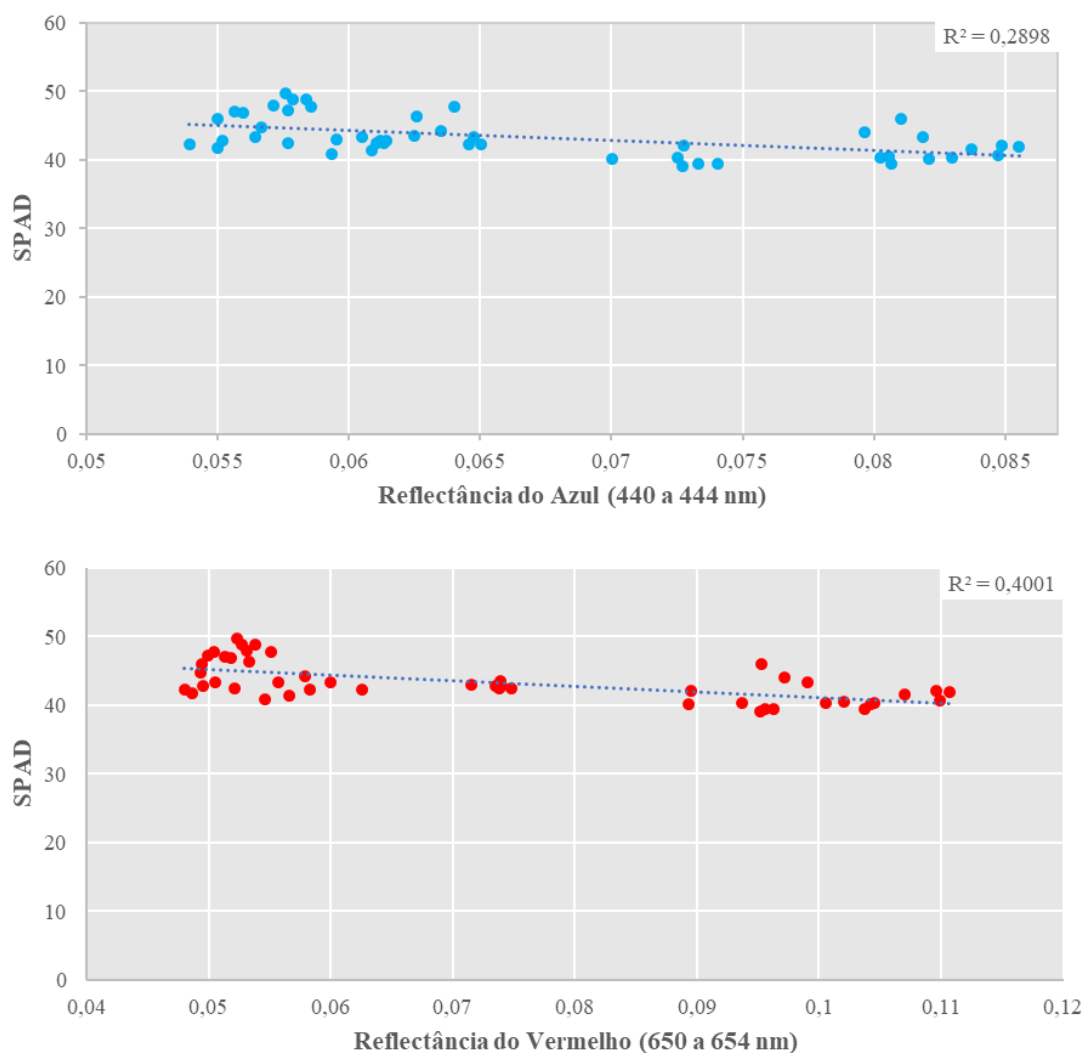


Figura 20 – Correlação e linha de tendência entre os valores SPAD e reflectância nos comprimentos de onda azul (acima) e vermelho (abaixo).

A elevação da reflectância no comprimento de onda do azul (450nm a 460nm), pode ocorrer também devido a deficiência de fósforo, como observado por OSBORNE *et al.* (2002) em diferentes estágios fenológicos do milho, pois a deficiência deste nutriente aumenta a produção de antocianina resultando em coloração arroxeada .

A deficiência de potássio não foi detectada visualmente no experimento. De acordo com MENGEL e KIRKBY (1987), a deficiência de potássio no tomate não resulta em sintomas imediatamente visíveis. A medida que a deficiência se prolonga, há o surgimento de necroses nas bordas das folhas (BESFORD, 1978), e de maneira mais rara clorose das folhas mais velhas (PUJOS e MORARD, 1997).

A influência que a correção dos fertilizantes realizada nos 52° e 61° DAT apresentou nos espectros fica evidente ao compararmos os espectros médios dos tratamentos nas

datas imediatamente antes (44° e 50° DAT) e imediatamente após (69° e 77° DAT) a correção com redução da reflectância nos comprimentos de onda do visível e NIR (Figura 18). Esta redução de reflectância está presente mesmos nos tratamentos que não receberam N da fertirrigação realizada no 70° DAT (NSI_{SPAD} , NSI_{NDVI} , NSI_{GNDVI} e NSI_{PSSRa}) (Figura 21), sendo este efeito um resultado da correção dos fertilizantes realizadas entre 52° e 61° DAT.

A partir do 97° DAT, as diferenças nas aplicações de N em cada tratamento começam a serem evidentes nos espectros, com aumento na reflectância nos comprimentos de ondas do visível e NIR pra os tratamentos NSI_{SPAD} , NSI_{NDVI} , NSI_{GNDVI} e NSI_{PSSRa} , de modo semelhante, porém de forma não tão acentuada como o ocorrido no começo do ciclo (Figura 21).

Podemos observar que os tratamentos NSI_{REF} e NSI_{MCARI} apresentaram espectros muito próximos entre si ao longo do ciclo, com valores de reflectância nos comprimentos de onda do visível menores que os demais tratamentos no 105° DAT, possivelmente por conterem maior teor de clorofila, resultado da maior quantidade de nitrogênio aplicada para esses tratamentos

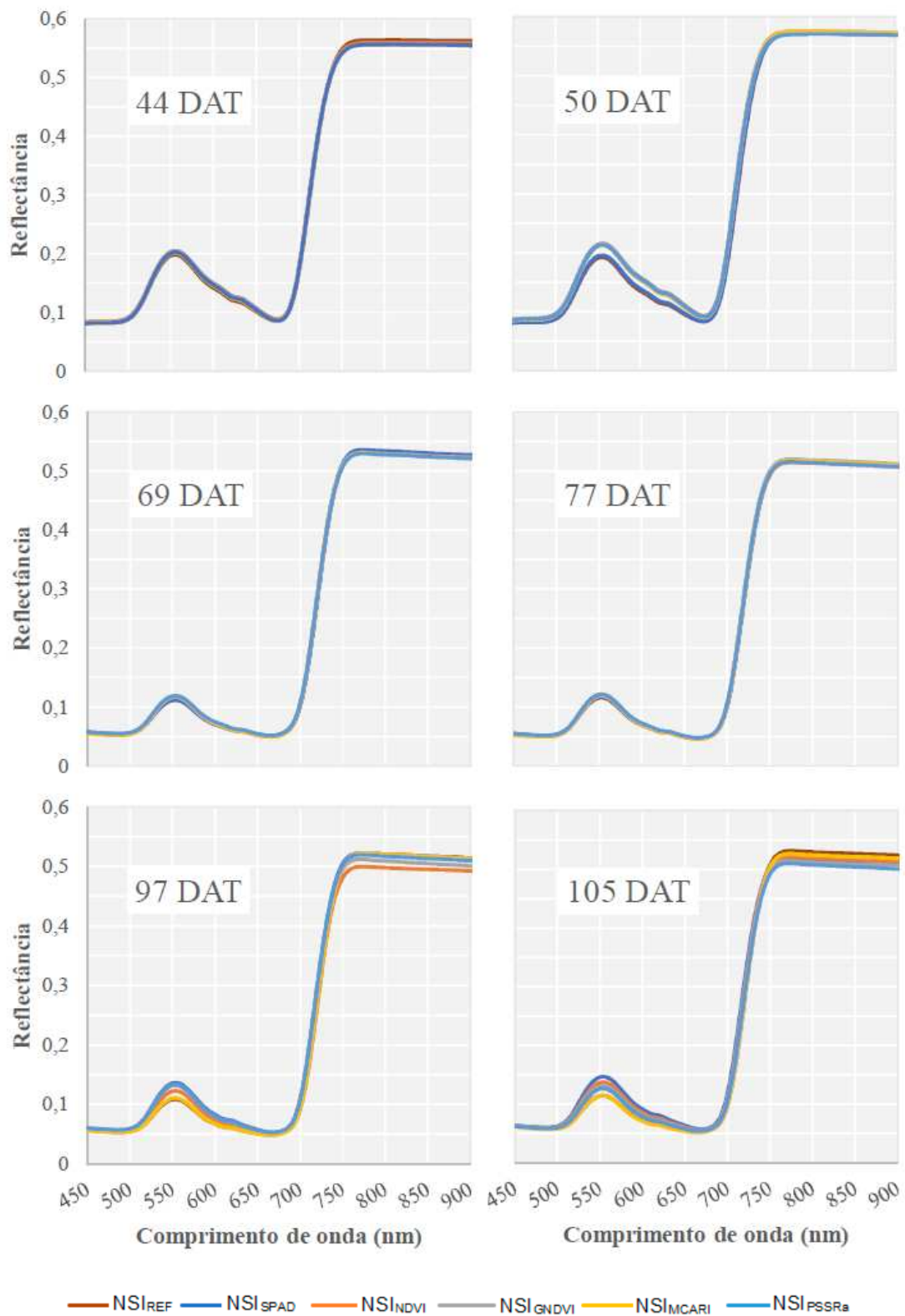


Figura 21 - Comportamento espectral da 4ª folha completamente expandida ao longo do ciclo por tratamento.

4.2 Produtividade

A colheita teve início no 88° DAT e foi realizada semanalmente até o final do ciclo. Os valores de F calculado e p-valores das variáveis analisadas entre os tratamentos são mostrados na Tabela 9. Somente a produtividade de frutos médios e produtividade de frutos defeituosos apresentaram diferença estatística significativa entre os tratamentos ao nível de 5% de probabilidade. Todos os descritores de produtividade observados apresentaram distribuição normal e homocedasticidade, com exceção da PFD que apresentou distribuição log-normal.

Tabela 9 – Valores de F e p-valores entre os tratamentos para as variáveis de produtividade

	PFG	PFM	PFP	PFC	PFD	PT
F calculado	0,444	4,265	1,335	2,16	3,714	1,649
p-valor	0,813	0,006	0,282	0,091	0,0119	0,184

PFG – produtividade de frutos grandes; PFM – produtividade de frutos médios; PFP – produtividade de frutos pequenos; PFD – produtividade de frutos defeituosos; PT – produtividade total; F tabelado (5%) = 2,603.

O tratamento NSI_{GNDVI} apresentou diferença estatística significativa na PDM comparado a parcela referência, este fato não aparenta estar relacionado diretamente com as diferenças nas doses de N entre os tratamentos, uma vez que o NSI_{PSSRa} recebeu dose idêntica ao NSI_{GNDVI} em quantidade e distribuição temporal, permanecendo com média estatisticamente igual ao tratamento controle. Os resultados da análise estatística estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Média de produtividade dos tratamentos.

Tratamento	PFG	PFM*	PFP	PFC	PFD*	PT
	-----g.pl ⁻¹ -----					
Referência	1452,08	1119,35a	131,71	2773,80	93,18ab	2866,98
NSI_{SPAD}	1505,53	1015,85ab	145,23	2738,90	50,22b	2789,12
NSI_{NDVI}	1508,95	866,89ab	113,99	2577,80	112,45a	2690,25
NSI_{GNDVI}	1303,80	788,38b	168,13	2332,90	127,49a	2460,39
NSI_{MCARI}	1545,31	1018,56ab	108,71	2752,62	98,18ab	2850,80
NSI_{PSSRa}	1354,15	907,00ab	139,10	2478,68	111,64a	2590,32

PFG produtividade de frutos grandes; PFM produtividade de frutos médios; PFP produtividade de frutos pequenos; PFC produtividade de frutos comerciais; PFD produtividade de frutos defeituosos; PT produtividade total; *médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem a 5% de probabilidade no teste de Tukey.

Não houve diferença estatística significativa para a PFC e PT entre os tratamentos e a referência, indicando que a metodologia possibilitou redução do N aplicado sem impacto na produtividade. Possivelmente a condição edafoclimática do experimento não permitiu que as plantas expressassem potencial produtivo para absorver a dose total recomendada de 300 kg.ha⁻¹ de N.

A diferença encontrada na PFD não aparenta estar relacionada com a quantidade de nitrogênio aplicado nem com sua distribuição no tempo, uma vez que o tratamento NSI_{SPAD} que apresentou a menor PFD recebeu doses de nitrogênio muito próximas em quantidade e distribuição no tempo que os tratamentos NSI_{GNDVI} e NSI_{PSSRa}, os quais apresentaram maiores PFD.

4.3 Qualidade do fruto

Os frutos não apresentaram diferença estatística significativa para os descritores de qualidade do fruto entre nenhum dos tratamentos aplicados (Tabela 11). Todos descritores de qualidade do fruto apresentaram distribuição normal e homocedasticidade.

Tabela 11 – Valores de F e p-valores entre os tratamentos para as variáveis de qualidade dos frutos

	L	a	b	pH	SS	AT	Sabor
F calculado	0,44	1,953	0,219	0,376	1,475	1,636	0,434
p-valor	0,817	0,121	0,951	0,86	0,233	0,187	0,821

L – luminosidade; a – coordenada vermelho/verde; b – coordenada amarelo/azul; pH – acidez total; AT – acidez titulável; Sabor – SS/AT; F tabelado (5%) = 2,603.

Os valores médios para os descritores de qualidade do fruto são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – Resultado das análises de qualidade dos frutos de tomate

Tratamento	L	A	b	pH	SS °Brix	AT %AC	Sabor (SS/AT)
Referência (T₁)	37,06	18,39	22,79	4,13	4,47	0,31	13,77
SPAD (T₂)	37,61	15,60	22,18	4,15	4,13	0,30	13,92
NDVI (T₃)	37,37	16,03	21,51	4,10	4,10	0,29	14,20
GNDVI (T₄)	37,32	17,11	21,88	4,10	3,98	0,33	12,80
MCARI (T₅)	37,64	15,37	21,94	4,11	4,32	0,34	12,99
PSSRa (T₆)	37,51	17,50	22,28	4,12	3,93	0,30	13,24

L – luminosidade; a – coordenada vermelho/verde; b – coordenada amarelo/azul; pH – acidez total; AT – acidez titulável; Sabor – SS/AT.

Os valores obtidos para o índice de cor *a* variaram de 15,17 a 18,39 foram compatíveis com os observados por GAUTIER *et al.* (2008) para frutos completamente maduros em estudo da qualidade do fruto em diferentes estágios de maturação.

Os valores de sólidos solúveis observados variaram na faixa de 3,93 a 4,47 °Brix com a maioria dos tratamentos dentro da faixa normalmente observada para sólidos solúveis em outros trabalhos, por exemplo, entre 4 e 5 °Brix por JONES (2007) e 3,8 a 4,6 °Brix por ARTÉS *et al.* (1999).

Os valores de acidez titulável observados variaram de 0,29 a 0,34%. Somente os tratamentos GNDVI e MCARI obtiveram valores acima de 0,32% considerado por KADER, MORRIS e CHEN (1978b) e JONES (2007) como o mínimo para tomates de alta qualidade.

A relação SS/AT está diretamente relacionada com o sabor do fruto, quanto maior a acidez e o teor de açúcares, mais palatável será o tomate (JONES, 2007). Os valores observados nas relações SS/AT variaram de 12,8 a 14,2 alcançando valores considerados por KADER, MORRIS e CHEN (1978) como frutos de alta qualidade (SS/AT > 10).

Não houve diferença significativa em nenhum descritor da qualidade do fruto, porém o teor de sólidos solúveis aumenta de forma direta com aumento nas doses de N (SHIRAHIGE *et al.*, 2010; KNEE, 2002; GIORDANO, SILVA e BARBOSA, 2000). Assim a metodologia proposta foi eficaz em reduzir a quantidade de N aplicado sem tornar o N um nutriente limitante para a qualidade dos frutos.

4.4 Fator parcial de produtividade do nitrogênio (PFP_N)

A análise de variância foi significativa (Tabela 13), implicando que houve diferença entre o aproveitamento do N dentre os tratamentos.

Tabela 13 - ANOVA para o fator parcial de produtividade do nitrogênio

F.V.	G.L.	Soma do Quadrado	Quadrado Médio	Fcalc	P-value
Tratamentos	5	170224,075	34044,815	11,865	5,95E-06
Blocos	5	16511,249	3302,250	1,151	0,360
Resíduo	25	71733,582	2869,343		
Total	35	258468,907			

Os tratamentos NSI_{SPAD} e NSI_{NDVI} apresentaram valores de PFP_N estatisticamente maiores que a referência, indicando para estes casos melhoria na eficiência no uso do N.

Os tratamentos referência e NSI_{MCARI} obtiveram os valores de PPF_N mais baixos entre os observados, consequência da maior quantidade de N aplicado sem ganho significativo de produtividade, reduzindo os valores de PPF_N (Tabela 14).

Tabela 14 – Comparação entre as médias do PPF_N para os tratamentos

Tratamento	PPF_N (kg.kg⁻¹)	
Referência	318,56	c
NSI_{SPAD}	414,33	b
NSI_{NDVI}	532,13	a
NSI_{GNDVI}	372,13	bc
NSI_{MCARI}	318,36	c
NSI_{PSSRa}	391,78	bc

*Médias seguidas pela mesma letra não diferem a 5% de probabilidade no teste de Tukey;
 PPF_N – fator parcial de produtividade do nitrogênio.

A parcela referência e os tratamentos NSI_{GNDVI} , NSI_{MCARI} , obtiveram valores de PPF_N dentro da faixa observada por OZORES-HAMPTON *et al.*, (2015) para tomate de mesa cultivados em condições ideais de nutrição de N cujo o PPF_N variou de 254 à 364 kg.kg⁻¹ para doses de N equivalentes a 358 e 244 kg.ha⁻¹ respectivamente. Os valores observados por ELIA e CONVERSA (2012) em estudo com tomate industrial com doses de N equivalentes a 200 e 300 kg.ha⁻¹, apresentaram maior variação no PPF_N com valores iguais a 417,5 e 259,4 kg.kg⁻¹ em condições ideais de nutrição de N e com excesso de N, respectivamente. Neste estudo somente o NSI_{NDVI} apresentou valores superiores aos observados por ELIA e CONVERSA (2012).

No presente estudo, as doses de N aplicadas nos tratamentos referência e NSI_{MCARI} foram as mais elevadas ao final do ciclo sem ganho significativo de produtividade reduzindo os valores de PPF_N , no entanto os tratamentos NSI_{SPAD} , NSI_{NDVI} , NSI_{GNDVI} e NSI_{PSSRa} tiveram redução na quantidade de N utilizado sem queda significativa na produtividade, resultando em aumento do PPF_N concordando com os resultados obtidos por ELIA e CONVERSA (2012).

Durante todo periodo em que o NSI foi observado, todos os tratamentos com excessão do NSI_{MCARI} apresentaram comportamento semelhante em relação ao tempo para os valores de NSI (com queda no 50° DAT, elevação no 69° DAT e queda no 97° DAT), porem com intensidades diferentes. Talvez o ajuste no limiar do NSI para os diferentes indices, possa condizir a melhoria nos PPF_N .

Os tratamentos NSI_{SPAD} e NSI_{NDVI} , apresentaram redução nos níveis de N aplicado durante o ciclo, sem redução significativa na produtividade ou alteração na qualidade do fruto, indicando que esses métodos melhoraram o aproveitamento do N.

5 CONCLUSÃO

A utilização do NSI segundo metodologia proposta para os índices NDVI, GNDVI, PSSRa e unidades SPAD levaram a redução no total de nitrogênio aplicado.

Somente o índice NDVI e o valor SPAD levaram a melhoria significativa fator parcial de produtividade do nitrogênio

Nenhum dos índices utilizados levou a alterações na produtividade e qualidade dos frutos.

A resposta espectral das folhas do tomateiro se mostrou sensível a deficiência de nitrogênio, com elevação dos valores de reflectância no visível e NIR.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVARENGA, M. A. **Tomate: produção em campo, em casa-de-vegetação e em hidroponia.** [S.l.]: UFLA, 2004.

ANDRIOLO, J. L. **Fisiologia da produção de hortaliças em ambiente protegido.** 40. Congresso Brasileiro de Olericultura. Brasília: [s.n.]. 2000. p. 26-33.

ARTÉS, F. et al. Keeping quality of fresh-cut tomato. **Postharvest Biology and Technology**, v. 17, p. 153–162, 1999.

BABAR, M. A. et al. Spectral Reflectance to Estimate Genetic Variation for In-Season Biomass, Leaf Chlorophyll, and Canopy Temperature in Wheat. **Crop Science Society of America**, v. 46, p. 1046-1057, 2006.

BARET, F.; HOULÈS, V.; GUÉRIF, M. Quantification of plant stress using remote sensing observations and crop models: the case of nitrogen management. **Journal of Experimental Botany**, p. 869-880, 2007.

BASSO, B. et al. Variable rate nitrogen fertilizer response in wheat using remote sensing. **Precision Agriculture**, p. 162-182, 2016.

BECKMANN, M. Z. et al. Radiação solar em ambiente protegido cultivado com tomateiro nas estações verão-outono do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, v. 36, n. 1, p. 86-92, 2006.

BESFORD, R. T. 8 Effect of sodium in the nutrient medium on the incidence of potassium-deficiency symptoms in tomato plants. **Plant and Soil**, v. 50, p. 427-432, 1978.

BLACKBURN, G. A. Quantifying Chlorophylls and Carotenoids at Leaf and Canopy Scales: An Evaluation of Some Hyperspectral Approaches. **Remote Sensing of Environment**, v. 66, p. 273-285, 1998.

BRITO, G. G. et al. Non-destructive analysis of photosynthetic pigments in cotton plants. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 33, n. 4, p. 671-678, 2011.

CAO, Q. et al. Non-destructive estimation of rice plant nitrogen status with Crop Circle multispectral active canopy sensor. **Field Crops Research**, v. 154, p. 133-144, 2013.

CÁRDENAS, L. S. et al. Geospatial Technologies to Support Coniferous Forests Research and Conservation efforts in Mexico, p. 1-43, 2015.

CARTER, G. A. Primary and Secondary Effects of Water Content on the Spectral Reflectance of Leaves. **American Journal of Botany**, v. 78, p. 916-924, 1991.

CHANG, C. H.; LIU, Y. C. Study on lycopene and antioxidant contents variations in tomatoes under air-drying process. **Food Engineering & Physical Properties**, p. E532-E540, 2007.

CLEVERS, J. G. P. W.; GITELSON, A. A. Remote estimation of crop and grass chlorophyll and nitrogen content using red-edge bands on Sentinel-2 and -3. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 23, p. 344-351, 2013.

COMAR, C. L.; ZSCHEILE, F. P. Analysis of plant extracts for chlorophylls a and b by a photoelectric spectrometric method. **Plant Physiology**, v. 17, p. 198-209, 1942.

D'ANDRÉA, A. F. et al. Estoque de carbono e nitrogênio e formas de nitrogênio mineral em um solo submetido a diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 2, p. 179-186, 2004.

DAUGHTRY, C. S. T. et al. Estimating Corn Leaf Chlorophyll Concentration from Leaf and Canopy Reflectance. **Remote Sensing of Environment**, v. 74, p. 229-239, 2000.

DELEGIDO, J. et al. Remote estimation of crop chlorophyll content by means of high-spectral-resolution reflectance techniques. **Agronomy Journal**, v. 103, n. 6, p. 1834-1842, 2011.

ELIA, A.; CONVERSA, G. Agronomic and physiological responses of a tomato crop to nitrogen input. **European Journal of Agronomy**, v. 40, p. 64-74, 2012.

EMBRAPA. **A cultura do lornaleiro (para mesa)**. Brasília: [s.n.], 1993.

FAOSTAT. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Statistics Division. **FAOSTAT**, 2017. Disponível em: <<http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>>.

FERREIRA, M. M. M. et al. Produção do tomateiro em função de doses de nitrogênio e adubação orgânica em duas épocas de cultivo. **Hortic. bras.**, v. 21, n. 3, p. 468-473, 2003.

FERREIRA, M. M. M. et al. Índice SPAD e teor de clorofila no limbo foliar do tomateiro em função de doses de nitrogênio e da adubação orgânica, em duas épocas de cultivo. **CERES**, p. 83-92, 2006.

FIXEN, P. et al. Nutrient/fertilizer use efficiency: measurement, current situation and trends. In: DRECHSEL, P., et al. **Managing Water and Fertilizer for Sustainable Agricultural Intensification**. Paris: [s.n.], 2015. Cap. 2, p. 8-38.

FRANCIS, D. D.; PIEKIELEK, W. P. Assessing crop nitrogen needs with chlorophyll meter. **SSMG-12**, p. 1-4.

FRITSCHI, F. B.; RAY, J. D. Soybean leaf nitrogen, chlorophyll content, and chlorophyll a/b ratio. **Photosynthetica**, v. 45, n. 1, p. 92-98, 2007.

GAUTIER, H. et al. How Does Tomato Quality (Sugar, Acid, and Nutritional Quality) Vary with Ripening Stage, Temperature, and Irradiance? **J. Agric. Food Chem.**, v. 56, p. 1241–1250, 2008.

GHULAM, A. et al. Characterizing Crop Responses to Background Ozone in Open-Air Agricultural Field by Using Reflectance Spectroscopy. **EEE GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING LETTERS**, v. 12, n. 6, p. 1307-1311, 2015.

GIANQUINTO, G. et al. A methodological approach for defining spectral indices for assessing tomato nitrogen status and yield. **European Journal of Agronomy**, p. 135-143, 2011.

GIORDANO, L. B.; SILVA, J. B. C.; BARBOSA, V. Escolha de cultivares e plantio. **Embrapa Informação Tecnológica**, Brasília/DF, p. 36-59, 2000.

GIOVANNUCCI, E. Tomatoes, Tomato-Based Products, Lycopene, and Cancer: Review of the Epidemiologic Literature. **Journal of the National Cancer Institute**, p. 317-331, 1999.

GITELSON, A. A.; GRITZ, Y.; MERZLYAK, M. N. Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves. **Journal of Plant Physiology**, v. 160, p. 271-282, 2003.

GITELSON, A. A.; KAUFMAN, Y. J.; MERZLYAK, M. N. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. **Remote Sensing of Environment**, p. 289-298, 1996.

GITELSON, A.; MERZLYAK, M. N. Spectral reflectance changes associated with autumn senescence of *Aesculus hippocastanum* L. and *Acer platanoides* L. leaves. Spectral features and relation to chlorophyll estimation. **Journal of Plant Physiology**, v. 143, n. 3, p. 286-292, 1994.

GUILHERME, L. R. G.; VALE, F. R.; GUEDES, G. A. A. **Fertilidade do solo: dinâmica e disponibilidade de nutrientes**. Lavras: ESAL, 1995.

HABOUDANE, D. et al. Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture. **Remote Sensing of Environment**, v. 81, p. 416-426, 2002.

HAN, P. et al. Nitrogen and water availability to tomato plants triggers bottom-up effects on the leafminer *Tuta absoluta*. **Scientific Reports**, p. 1-8, 2014.

HUNT JR., E. R.; DAUGHTRY, C. S. T. Chlorophyll Meter Calibrations for Chlorophyll Content Using Measured and Simulated Leaf Transmittances. **Agronomy Journal**, v. 106, n. 3, p. 931-939, 2014.

HUNT, E. R. et al. A visible band index for remote sensing leaf chlorophyll content at the canopy scale. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 21, p. 103-112, 2013.

HUNT, JR, E. R. et al. Acquisition of NIR-Green-Blue Digital Photographs from Unmanned Aircraft for Crop Monitoring. **Remote Sensing**, p. 290-305, 2010. ISSN 2072-4292.

INADA, K. Studies on a method for determining the deepness of green color and chlorophyll content of intact crop leaves and its practical applications. I. Principles or estimating the deepness of green color and chlorophyll content of whole leaves. **Proc. Crop Sci. Soc. (Jpn.)**, v. 32, p. 157-162, 1963.

INOUE, T. et al. Utilization of ground-based digital photography for the evaluation of seasonal changes in the aboveground green biomass and foliage phenology in a grassland ecosystem. **Ecological Informatics**, v. 25, p. 1-9, 2015.

JIFON, J. L.; SYVERTSEN, J. P.; WHALEY, E. Growth environment and leaf anatomy affect nondestructive estimates of chlorophyll and nitrogen in Citrus sp. **J. Amer. Soc. Hort. Sci.**, v. 130, n. 2, p. 152-158, 2005.

JONES, J. B. **Tomato plant culture: in the field, greenhouse, and home garden.** 2. ed. [S.l.]: [s.n.], 2007.

KADER, A. A. et al. Composition and flavor quality of fresh quality of fresh market tomatoes as influenced by some postharvest handling procedures. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, v. 103, p. 6-13, 1978a.

KADER, A. A.; MORRIS, L. L.; CHEN, P. Evaluation of two objective methods and a subjective rating scale for measuring tomato fruit firmness. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, v. 103, p. 70-73, 1978b.

KIM, M. S. et al. The use of high spectral resolution bands for estimating absorbed photosynthetically active radiation (A_{par}). **CNES, Proceedings of 6th International Symposium on Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing**, p. 299-306, 1994.

KNEE, M. **Fruit Quality and Its Biological Basis.** [S.l.]: Sheffield Academic Press, v. 9, 2002.

KUSCU, H. et al. Optimizing Levels of Water and Nitrogen Applied through Drip Irrigation for Yield, Quality, and Water Productivity of Processing Tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). **Hort. Environ. Biotechnol.**, v. 55, n. 2, p. 103-114, 2014.

LABART, R. et al. Interrelated responses of tomato plants and the leaf miner *Tuta absoluta* to nitrogen supply. **Plant Biology**, p. 1-10, 2015.

LE BOT, J.; JEANNEQUIN, B.; FABRE, R. Growth and nitrogen status of soilless tomato plants following nitrate withdrawal from the nutrient solution. **Annals of Botany**, v. 88, p. 361-370, 2001.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: [s.n.], 1997.

MAPA, M. D. A. P. E. A. **Portaria nº 85. Normas de identificação, qualidade, acondicionamento, embalagem e apresentação do tomate**. MAPA. Brasília. 2002.

MAY, D. M.; GONZALES, J. Irrigation and nitrogen management as they affect fruit quality and yield of processing tomatoes. **Acta Horticulturae**, v. 376, p. 227-234, 1994.

MAYNARD, D. N.; HOCHMUTH, G. N. **Knott's Handbook for vegetable growers**. 5. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, 2007.

MENGEL, K.; KIRKBY, E. A. **Principles of plant nutrition**. [S.l.]: Potash Institute, 1987.

MINOLTA, K. **A lightweight handheld meter for measuring the chlorophyll content of leaves without causing damage to plants**. KONICA MINOLTA. [S.l.], p. 4. 2009.

MINOLTA, K. **Color Reader CR-10 operation manual**. [S.l.]: [s.n.].

MOGE, S. M. 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, 2004.

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. 4, n. 2, p. 1345–1349, 2010.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do Sensoriamento Remoto e metodologias de aplicação**. 4^a ed. ed. Viçosa: Editora UFV, 2011.

NETTO, A. T. et al. Photosynthetic pigments, nitrogen, chlorophyll a fluorescence and SPAD-502 readings. **Sci. Hortic.**, v. 104, p. 199-209, 2005.

OSBORNE, S. L. et al. Detection of Phosphorus and Nitrogen Deficiencies in Corn Using Spectral Radiance Measurements. **Agronomy Journal**, v. 94, n. 6, p. 1215-1221, 2002.

OZORES-HAMPTON, et al. Effects of Nitrogen Rates on Nitrogen, Phosphorous, and Potassium Partitioning, Accumulation, and Use Efficiency in Seepage-irrigated Fresh Market Tomatoes. **HortScience**, v. 50, n. 11, p. 1636-1643, 2015.

PADILLA, F. M. et al. Threshold values of canopy reflectance indices and chlorophyll meter readings for optimal nitrogen nutrition of tomato. **Annals of Applied Biology**, v. 166, p. 271-285, 2015.

PENG, S.; CASSMAN, K. G. Upper Thresholds of Nitrogen Uptake Rates and Associated Nitrogen Fertilizer Efficiencies in Irrigated Rice. **Agronomy Journal**, v. 90, n. 2, p. 178-185, 1998.

POTAFOS, I. D. P. & F. **Manual internacional de fertilidade do solo**. 2ª. ed. [S.l.]: Potash & Phosphate Institute, 1996.

PUJOS, A.; MORARD, P. Effects of potassium deficiency on tomato growth and mineral nutrition at the early production stage. **Plant and Soil**, v. 189, p. 189-196, 1997.

QUADROS, B. R. et al. Doses de nitrogênio na produção de rabanete fertirrigado e determinação de clorofila por medidor portátil nas folhas. **Brazilian journal of irrigation and drainage**, Botucatu, v. 15, n. 4, p. 353-360, 2010.

RAO, A. V. Lycopene, Tomatoes, and the Prevention of Coronary Heart Disease. **Society for Experimental Biology and Medicine**, p. 908-913, 2002.

RAVINDER, S. et al. Tomato fruit quality as influenced by different nutrient regimes. **Himachal Journal of Agricultural Research**, v. 25, p. 37-42, 2001.

RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V., V. H. **Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª Aproximação**. Viçosa: CFSEMG, 1999.

ROBERTSON, G. ; VITOUSEK, P. M. Nitrogen in Agriculture: Balancing the Cost of an Essential Resource. **Annual Review of Environment and Resources**, v. 34, p. 97-125, 2009.

ROUSE, J. W. et al. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS, p. 309-317, 1974.

SADAVA, D. et al. **Life: the science of biology**. 9th. ed. [S.l.]: [s.n.], 2011.

SAINJU, U. M.; SINGH, B. P.; WHITEHEAD, W. F. Comparison of the effects of cover crops and nitrogen fertilization on tomato yield, root growth, and soil properties. **Scientia Horticulturae**, v. 91, p. 201-214, 2001.

SAWYER, J. E. Concepts of Variable Rate Technology with Considerations for Fertilizer Application. **Journal of Production Agriculture**, v. 7, n. 2, p. 163-201, 1994.

SCHLEMMER, M. R. et al. Remotely Measuring Chlorophyll Content in Corn Leaves with Differing Nitrogen Levels and Relative Water Content. **American Society of Agronomy**, v. 97, p. 106-112, 2005.

SHAVER, T. M.; KHOSLA, R.; WESTFALL, D. G. Evaluation of two crop canopy sensors for nitrogen variability determination in irrigated maize. **Precision Agriculture**, 2011.

SHIRAHIGE, F. H. et al. Produtividade e qualidade de tomates Santa Cruz e Italiano em função do raleio de frutos. **Horticultura Brasileira**, v. 28, p. 292-298, 2010.

SOLARI, F. Developing a crop based strategy for on-the-go nitrogen management in irrigated cornfields. **University of Nebraska**, Lincon, p. 157p (PhD), 2006.

STEELE, M. R.; GITELSON, A. A.; RUNDQUIST, D. C. A Comparison of Two Techniques for Nondestructive Measurement of Chlorophyll Content in Grapevine Leaves. **Agronomy Journal**, v. 100, n. 3, p. 779-782, 2008.

SUDDUTH, K. A.; KITCHEN, N.; DRUMMOND, S. **Comparison of Three Canopy Reflectance Sensors for Variable-Rate Nitrogen Application in Corn**. International Conference on Precision Agriculture Abstracts & Proceedings. [S.l.]: [s.n.]. 2010.

TENGA, A. Z.; MARIE, B. A.; ORMROD, D. P. Leaf greenness meter to assess ozone injury to tomato leaves. **HortScience**, 1989.

THENKABAIL, P. S.; SMITH, R. B.; PAUW, E. D. Hyperspectral Vegetation Indices and Their Relationships with Agricultural Crop Characteristics. **Remote Sensing of Environment**, v. 71, p. 158-182, 2000.

THORP, K. R.; TIAN, L. F. A Review on Remote Sensing of Weeds in Agriculture. **Precision Agriculture**, v. 5, p. 477-508, 2004.

TIAN, F. et al. Remote sensing of vegetation dynamics in drylands: Evaluating vegetation optical depth (VOD) using AVHRR NDVI and in situ green biomass data over West African Sahel. **Remote Sensing of Environment**, v. 177, p. 265-276, 2016.

TREMBLAY, N.; FALLON, E.; ZIADI, N. Sensing of Crop Nitrogen Status: Opportunities, Tools, Limitations and Supporting Information Requirements. **HortTechnology**, p. 274-281, Junho 2011.

VAUGHN, S. F. et al. Lesquerella press cake as an organic fertilizer for greenhouse tomatoes. **Industrial Crops and Products**, v. 32, p. 164-168, 2010.

VOS, J.; BOM, M. Hand-held chlorophyll meter" a promising tool to assess the nitrogen status of potato foliage. **Potato Research**, p. 301-308, 1993.

WAHID, A. et al. Heat tolerance in plants: An overview. **Environmental and Experimental Botany**, p. 199-223, 2007.

WIEGAND, C. L. et al. Vegetation Indices in Crop Assessments. **Remote Sensing of Environment**, v. 35, p. 105-119, 1991.

WOOD, C. W.; REEVES, D. W.; HIMELRICK, D. G. Relationships between chlorophyll meter readings and leaf chlorophyll concentration, N status, and crop yield: A review. **Proceedings Agronomy Society of N.Z.**, v. 23, p. 1-9, 1993.

WU, C. et al. Estimating chlorophyll content from hyperspectral vegetation indices: Modeling and validation. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 148, p. 1230-1241, 2008.

YODER, B. J.; PETTIGREW-CROSBY, R. E. Predicting Nitrogen and Chlorophyll Content and Concentrations from Reflectance Spectra (400-9,500 nm) at Leaf and Canopy Scales. **Remote Sensing of Environment**, p. 199-211, 1995.