Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”

Análise de imagens no desenvolvimento e status de fósforo do minitomateiro
grape cultivado em sistema semi-hidropônico

Leonardo Pinto de Magalhães

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Engenharia
de Sistemas Agrícolas

Piracicaba
2018

Leonardo Pinto de Magalhães
Engenheiro de Biosistemas

**Análise de imagens no desenvolvimento e status de fósforo do minitomateiro grape cultivado
em sistema semi-hidropônico**

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **FABRÍCIO ROSSI**

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Engenharia
de Sistemas Agrícolas

Piracicaba
2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP

Magalhães, Leonardo Pinto de

Análise de imagens no desenvolvimento e status de fósforo do minitomateiro grape cultivado em sistema semi-hidropônico / Leonardo Pinto de Magalhães. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2018.

72 p.

Dissertação (Mestrado) - - USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Índices vegetativos 2. Rede neural 3. *Solanum lycopersicum* 4. Visão computacional I. Título

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, que me ofereceram ensino e educação e me deram a liberdade.

AGRADECIMENTOS

À CAPES, a USP, a ESALQ, a FZEA, ao GEBio – Sistemas e Engenharia e aos funcionários, professores e membros da comunidade científica que colaboraram direta ou indiretamente com esse trabalho. À minha família, amigos e a sociedade que através dos impostos pagos mantêm a Universidade pública e de qualidade da qual usufruimos e que assim permanença por longos anos.

A Amafibra Fibras e Substratos Agrícolas da Amazônia Ltda, pela doação do substrato utilizado no experimento, e a Agristar do Brasil Ltda. pela doação das sementes do minitomate utilizadas no experimento.

EPÍGRAFE

"...Que vencedor que nada...

Eu não tô aqui pra competir

Quem é que disse que a vida é uma competição?

Aí compete marido com mulher,

vizinho com vizinho irmão com irmão,

colega com colega

E nessa sociedade competitiva

A minha derrota é a minha vitória!"

(Eduardo Marinho)

SUMÁRIO

RESUMO.....	7
ABSTRACT	8
1. INTRODUÇÃO.....	10
2. REVISÃO DE LITERATURA	12
2.1. ÍNDICES VEGETATIVOS	12
2.2. ABSORÇÃO E REFLEXÃO DA LUZ PELAS PLANTAS.....	14
2.3. ESPAÇOS DE CORES	15
2.4. CLOROFILA E ANTOCIANINA	17
2.5. NUTRIÇÃO MINERAL: O NITROGÊNIO E O FÓSFORO	18
2.6. TOMATEIRO: ORIGEM E OUTRAS CONSIDERAÇÕES.....	20
2.7. ANÁLISE E PROCESSAMENTO DE IMAGENS.....	25
2.8. REDE NEURAL ARTIFICIAL	25
3. OBJETIVOS	27
4. MATERIAL E MÉTODOS	28
4.1. LOCAL DO EXPERIMENTO	28
4.2. PRODUÇÃO DAS MUDAS DE MINITOMATE GRAPE.....	29
4.3. DELINEAMENTO EXPERIMENTAL.....	30
4.4. SOLUÇÃO NUTRITIVA	30
4.5. MANEJO DA IRRIGAÇÃO	32
4.6. BIORRESPOSTAS DO TOMATEIRO GRAPE.....	32
4.7. ANÁLISE QUÍMICA	33
4.8. ANÁLISE DE IMAGENS	34
4.9. ANÁLISES ESTATÍSTICAS	37
4.10. REDE NEURAL ARTIFICIAL	39
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
5.1. DIAGNOSE NUTRICIONAL.....	40
5.2. BIORRESPOSTAS DO TOMATEIRO GRAPE.....	44
5.3. ANÁLISE DE CLOROFILA	54
5.4. ANÁLISES DE CORRELAÇÃO.....	55
5.5. STATUS DE P PELA ANÁLISE DE IMAGENS	58
6. CONCLUSÕES.....	64
REFERÊNCIAS.....	65
ANEXOS.....	72

RESUMO

Análise de imagens no desenvolvimento e status de fósforo do minitomateiro grape cultivado em sistema semi-hidropônico

A análise de imagens é uma das formas de avaliar o desenvolvimento das plantas, tanto para correlacionar aspectos biofísicos dos mesmos, como para a detecção de doenças. Através das imagens podem ser calculados índices vegetativos que se correlacionem com os teores de nutrientes nas folhas. Com essa perspectiva, o presente trabalho objetivou avaliar quais índices vegetativos melhor se correlacionariam com a taxa de fósforo nas folhas de tomateiros. Foi realizado o cultivo de uma cultivar de minitomate, com cinco doses de fósforo (0, 25, 50, 75 e 100%) do P recomendado (na formulação da solução nutritiva). Em diferentes etapas do desenvolvimento da planta foram coletadas amostras das folhas para obtenção das imagens, através de escâner e máquina fotográfica, e diagnose foliar. Foram determinadas as biorrespostas das plantas ao longo do tempo. Uma rede neural artificial foi desenvolvida para estimar os teores de fósforo foliares no minitomate grape. A análise do desenvolvimento da planta permitiu concluir que a dose 100% de P_2O_5 utilizada no experimento foi suficiente para suprir a demanda nutricional do minitomateiro. Aos 64 dias após o transplântio (DAT) foi observada a maior queda nos teores de fósforo nas folhas, coincidindo com o amadurecimento dos frutos. Propõe-se, para a cultivar estudada, que a diagnose foliar seja feita aos 50 DAT. Os índices vegetativos obtidos pela análise de imagem e selecionados pela análise de componentes principais (ICVE e Bn, tanto da parte abaxial quanto adaxial) podem ser utilizados para estimar a diagnose foliar de P na cultivar de minitomate grape. A avaliação dos índices vegetativos indicou que a obtenção de imagens com o escâner é mais adequado do que com a câmera fotográfica. Para a cultivar estudada, verificou-se que na dosagem de 100% de P_2O_5 teor de P nas folhas fica abaixo de $4,0 \text{ g kg}^{-1}$. Em relação à rede neural desenvolvida, ao categorizar os valores de P de acordo com a literatura, a mesma obteve uma taxa de acerto de 90%.

Palavras-chave: 1. Índices Vegetativos 2. Rede neural 3. *Solanum lycopersicum* 4. Visão Computacional

ABSTRACT

Image analysis of the development and phosphorus status of the mini tomato grown in a semi-hydroponic system

The analysis of images is one of the ways to evaluate the development of plants, both to correlate biophysical aspects of the same, as for the detection of diseases. Through the images can be calculated vegetative indexes that correlate with the contents of nutrients in the leaves. With this perspective, the present studied aimed to evaluate which vegetative indexes would best correlate with the phosphorus rate in tomato leaves. A minitomato grape cultivar with five phosphorus doses (0, 25, 50, 75 and 100%) of the recommended P (in the formulation of the nutrient solution) was carried out. At different stages of plant development, leaf samples were collected to obtain the images, with scanner and camera, and foliar diagnosis. The bio-responses of plants were determined over time. An artificial neural network was developed to estimate leaf phosphorus levels in the grape minitomate. The analysis of the development of the plant allowed to conclude that the dose 100% of P_2O_5 used in the experiment was enough to supply the nutritional demand of the minitomateiro. At 64 days after transplanting (DAT), the highest drop in phosphorus content in the leaves was observed, coinciding with the ripening of the fruits. It is proposed, for the studied cultivar, that the leaf dignity should be made at 50 DAT. The vegetative indexes obtained by the image analysis and selected by the principal components analysis (ICVE and Bn, both abaxial and adaxial) can be used to estimate the leaf diagnosis of P in the minitomate grape cultivar. The evaluation of vegetative indexes indicated that obtaining images with the scanner is more appropriate than with the photographic camera. For the cultivar studied, it was verified that in the dosage of 100% of P_2O_5 content of P in the leaves is below 4.0 g kg^{-1} . In relation to the developed neural network, when categorizing the P values according to the literature, it obtained a 90% correctness rate.

Keywords: 1. Vegetative indexes 2. Neural network 3. *Solanum lycopersicum* 4. Computer vision

1. INTRODUÇÃO

Após a domesticação das plantas e o início da agricultura, os Homens passaram a ter a observação das plantas como uma forma de avaliação do seu desenvolvimento. Escolher um futo maduro, avaliar se uma planta estava saudável ou qual tipo de planta foi aquela observada se tornaram tarefas do cotidiano de sobrevivência da humanidade. Para se adquirir informações acerca das plantas podem ser utilizados tanto métodos destrutivos como a determinação dos teores de nutrientes em folhas (MARTINS E REISSMANN, 2007) como também não destrutivos, como a estimativa do estado nutricional de nitrogênio através de clorofilômetro (BARBIERI JUNIOR et al., 2012). Dentre as técnicas não-destrutivas pode ser citada também a análise de imagens, sendo que sua primeira utilização foi feita por Van der Laan em 1934 para avaliar a aplicação do fitohormônio etileno em plântulas de ervilha (BARBOSA et al., 2016).

Uma forma de aplicação da análise de imagens na agricultura é através da utilização de índices vegetativos (ou de vegetação), tais como o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI - *Normalized Difference Vegetation Index*), Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI) ou o Índice de Área Foliar (IAF), que facilitam a obtenção e modelagem de parâmetros biofísicos e de desenvolvimento das plantas, como a área foliar, biomassa e porcentagem de cobertura do solo, fornecendo importantes informações sobre as características produtivas das plantas (JENSEN, 2009; EPIPHANIO et al., 1996).

A luz ao incidir nos objetos é refletida em diversos espectros, que podem ser tanto em comprimentos de onda na faixa do visível quanto em comprimentos não visíveis (como o infravermelho ou o ultravioleta). A combinação dos valores refletidos pelas plantas em diferentes comprimentos de onda é o que caracteriza um índice vegetativo. Se ocorrer alguma modificação na quantidade ou comprimentos que a folha absorve e reflete, modifica-se também a leitura dos índices vegetativos que utilizam a reflexão da luz para avaliação. A utilização desses índices pode contribuir para que a produção de alimentos, que possui uma demanda maior a cada ano, possa ser feita de maneira mais precisa e sustentável Além de ocorrer um ganho de tempo, economia de insumos e a não geração de resíduos nas análises realizadas em comparação aos métodos tradicionais.

Uma das culturas em que se observa um aumento no consumo mundial é o tomate. Nos últimos dez anos tem se observado um aumento de 35% na produção dessa cultura, tendo essa produção sido puxada pela China. Nesse país exemplifica-se o aumento de consumo tanto pelo aumento da população quanto pelas mudanças sociais observadas em sua sociedade. O processamento industrial do tomate demanda um quarto da produção mundial desse fruto, isso

representa o dobro dos níveis observados na década de 1980. O consumo anual de produtos processados de tomate é de 5,58 kg nos EUA. No Brasil o consumo per capita de tomate, levando-se em conta todas as suas formas de utilização, fica em torno de 21 kg por ano (DOSSA; FUCHS, 2017). Entre os produtores e os processadores de tomate destacam-se os EUA, China, Itália, Grécia, Turquia e Brasil (YARA, 2018). No Brasil, o minitomate tipo *grape* tem apresentado crescimento da demanda e consequentemente de produção, haja vista ser este tipo de fruto mais adocicado, o que agrada ao paladar tanto de adultos quanto de crianças.

A maior demanda de consumo leva à uma necessidade de formas de cultivo mais eficientes, tanto do ponto de vista da utilização do solo como maior controle sobre as variações climáticas. O cultivo sem solo tem crescido em algumas culturas, dentre elas a do tomateiro. Dentre as vantagens da não utilização do solo para cultivo, podem se destacadas as seguintes: produção durante o ano todo, a não necessidade de rotação de cultura, proteção dos cultivos contra intempéries (quando o cultivo é realizado em ambiente protegido) e diminuição de problemas fitossanitários (GONÇALVES et al., 2016).

Além das mudanças na forma de cultivo, a utilização de insumos agrícolas como os fertilizantes demanda uma maior eficiência de aplicação. Alguns nutrientes, como o fósforo, tem origem em reservas minerais finitas. Além disso, sua utilização em excesso pode levar à ocorrência de impactos ambientais como a eutrofização e contaminação de rios, lagos e outras fontes de água e também do solo. O carregamento de fertilizantes (nutrientes como nitrogênio e fósforo) e material em suspensão (partículas de solo) para os cursos d'água em níveis que alteram suas concentrações naturais, propicia a poluição dos mesmos (CALHEIROS; OLIVEIRA; DOLORES, 2006).

Dentro dessa perspectiva, tanto de aumento na necessidade de produção agrícola, quanto da relação da reflectância da luz pelas plantas é que se situa a proposta desse trabalho que tem por objetivo: avaliar a relação de alguns índices vegetativos com a quantidade de fósforo (P) nas folhas de tomateiro, comparar métodos de classificação do valor de P com base nos dados dos índices vegetativos bem como discutir o efeito de subdoses de P no desenvolvimento das plantas.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Índices Vegetativos

O primeiro índice vegetativo citado na literatura foi o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) feito por Rouse et al. (1973). Esse índice possui a seguinte equação:

$$\text{NDVI} = (\text{IVP} - \text{V}) / (\text{IVP} + \text{V}) \quad \text{Eq (1).}$$

Onde, IVP é a luz refletida no comprimento de onda do infravermelho próximo (comprimento de onda de 780 a 2.500 nm) e V no comprimento do vermelho (625 a 740 nm). Na folha o N encontra-se basicamente nas moléculas de clorofila. Assim, maior concentração de clorofila representa maior presença de N na folha. Devido a sua importância para o desenvolvimento da planta, a determinação da quantidade de N na mesma é fundamental para se determinar uma correta adubação, sendo o N uma substância limitante para a produção agrícola.

O NDVI pode ser usado como indicativo da quantidade de N na planta. Motomiya et. al. (2009) observaram uma relação quadrática entre o valor do NDVI e as doses de N aplicadas no algodoeiro. Onde maiores doses de N correspondiam a maiores valores do NDVI. Esse mesmo autor observou também uma relação entre o NDVI e o Índice de área Foliar (IAF), um maior valor do IAF demonstra que a planta possui um melhor desenvolvimento em relação àquela que tem um valor menor desse índice. Como também, um maior IAF representa uma maior área disponível para realização de fotossíntese, então ao avaliar esse fator ao longo do tempo pode-se mensurar a capacidade fotossintetizante da planta durante seu ciclo produtivo.

Ao longo dos anos outros autores também foram propondo novos índices, que se utilizam de outros comprimentos de onda. Os autores Gitelson, Kaufman e Merzlyak (1996) propuseram que se utilize o canal verde para o cálculo do índice de vegetação ao invés do vermelho. Segundo esses autores, o canal verde é mais adequado para se correlacionar com a concentração de clorofila do que o canal vermelho, pois durante milhares de anos nossa evolução baseou-se na observação da cor verde das plantas para avaliar se as mesmas estão saudáveis ou não. Eles propõem então a utilização do *Green NDVI*, onde a banda do vermelho é substituída pela utilização da banda de cor verde (500 a 565 nm):

$$\text{GNDVI} = (\text{IVP} - \text{G}) / (\text{IVP} + \text{G}) \quad \text{Eq (2).}$$

Outro índice que possui funcionamento semelhante aos citados anteriormente é o índice de Clorofila (ChL). Gitelson et al. (2003) compararam alguns índices em seu trabalho, e propuseram que a divisão da banda do infra-vermelho pela banda do vermelho subtraído de 1 foi o que melhor

relação possuía com o total de clorofila constante nas folhas. O índice então descrito é o demonstrado pela equação 3.

$$\text{ChL} = (\text{IVP}/\text{V}) - 1 \quad \text{Eq (3)}.$$

O índice citado anteriormente relaciona-se com o teor de clorofila, já o MSR (*modified simple relation*) relaciona a produção de biomassa e pigmentos da planta e, pode ser obtido através da seguinte relação:

$$\text{MSR} = (\text{IVP} - \text{V} - 1) / ((\text{IVP} + \text{V})^{0.5} + 1) \quad \text{Eq (4)}.$$

Porém, os índices apresentados anteriormente utilizam-se da banda do Infravermelho em seus cálculos. Essa banda, na análise de imagens, só é obtida com a utilização de câmeras modificadas. Esse fator pode se tornar um limitante no desenvolvimento e propagação de equipamentos e softwares que utilizem-se desses índices devido ao valor maior das câmeras modificadas em relação às comuns. Assim, outros índices que utilizam somente as bandas no visível também foram propostos. É o caso do MPRI (*Modified Photochemical Reflectance Index*):

$$\text{MPRI} = (\text{G} - \text{V}) / (\text{G} + \text{V}) \quad \text{Eq (5)}.$$

Nesse caso utiliza-se a banda do verde e do vermelho. Segundo os autores que propuseram esse novo índice, se observado o comportamento da vegetação ao longo do visível (R G B) é possível perceber que a relação existente entre as bandas da região do verde e do vermelho é similar à relação existente entre as bandas do infravermelho e do vermelho. Assim, a utilização destas mostra-se viável, não havendo assim necessidade da utilização de câmeras modificadas. O MPRI foi proposto por Yang, Willis e Muller (2008) e validado como indicador vegetativo por Linhares, Rocha e Amaral (2013).

Outro índice que pode ser utilizado sem a necessidade de câmeras modificadas é o “Índice de cor Verde-Escuro (ICVE)” proposto por Karcher e Richardson (2003). Esse índice utiliza-se de outro sistemas de cores, o chamado HSV ou HSB, varia de 0 a 1 e leva em consideração outros aspectos da imagem através da seguinte equação:

$$\text{ICVE} = ([(\text{H} - 60)/60] + (1 - \text{S}) + (1 - \text{B}))/3 \quad \text{Eq (6)}.$$

Onde H (“*hue*”) é o matiz da imagem, S (“*saturation*”) a saturação e B (“*brightness*”) ou V (“*value*”) o brilho. Quanto mais próximo de 1 o valor desse índice, mais escuro é o tom de verde da folha. Assim, ele pode ser usado para avaliar quando o verde da folha diminui ou quando ocorre um escurecimento da mesma. Felisberto et al. (2016) utilizando o ICVE para realizar o monitoramento nutricional de nitrogênio em pimentões, observou que um aumento nas doses de N correspondia a um aumento no valor avaliado desse índice.

Para melhor compreensão do funcionamento dos índices citados, deve-se entender como ocorre a absorção de luz pelas folhas nos mais diversos comprimentos de onda, bem como se organiza os sistemas de cores citados (RGB e HSV).

2.2. Absorção e reflexão da luz pelas plantas

No cloroplasto das plantas ocorre a transformação da energia luminosa absorvida em energia química. Essa energia luminosa é absorvida nos seguintes comprimentos de luz: vermelho (630-680 nm) e azul (450-520 nm). Na região do comprimento de onda do verde (520-600 nm) ocorre maior reflexão do que absorção, tendo essa banda uma menor participação na fotofosforilação. Então, em relação à absorção de luz ocorrem dois picos, um próximo a 460 nm e outro a 660 nm, por outro lado a refletância tem o pico maior não na região do verde, mas por volta de 700 nm a 1300 nm (infravermelho) (RAVEN et al., 2010). Como tanto a absorção de luz como a reflexão ocorrem nos cloroplastos, pode-se concluir sobre o conteúdo de clorofila nas plantas através da quantidade de absorção e reflexão nas regiões citadas anteriormente (KITCHEN; GOULDING; SHANAHAN, 2008). Na Figura 1 são demonstrados os diferentes picos e regiões de absorção e sua relação com componentes das folhas.

Figura 1. Regiões de reflectância

Fonte: Moreira, 2001

Alguns autores demonstraram ser efetivo determinar a relação da quantidade de clorofila nas plantas em relação à quantidade de nitrogênio através da refletância nos comprimentos de onda do verde e do vermelho. Blackmer e Schepers (1996) demonstraram que sensores de dossel que utilizam-se dessas bandas em seu funcionamento tiveram melhor indicação da quantidade de clorofila do que os gerados por medidores de clorofila. Outros autores relataram também altas

correlações entre os valores indicados por sensores de dossel e pelos medidores de clorofila (SOLARI et al., 2008; SHANAHAN et al., 2008).

Além da correlação com a quantidade de clorofila, outros aspectos de avaliação dos produtos vegetais têm sido obtidos através da análise de reflectância. Defeitos em frutos (LI et al., 2011); estado nutricional das plantas (CHEN et al., 2010; GIANQUINTO et al., 2011; PACUMBABA & BEYL, 2011); existência de doenças (JONES et al., 2010), além de outros. Também, a reflectância tem sido utilizada em trabalhos visando à classificação automática de produtos agrícolas de acordo com o estágio de maturação (ELMASRY et al., 2007; STEIDLE NETO ET al., 2009; DIEZMA et al., 2013). Para entender melhor o desenvolvimento e funcionamento dos índices vegetativos, é importante discorrer um pouco sobre a formação e caracterização dos espaços de cores RGB e HSV.

2.3. Espaços de cores

Segundo Brainard (2003), um espaço de cores pode ser sistematizado para especificar a aparência de uma cor ou da diferença entre cores, porém ainda não há um sistema de cores perfeito para nenhuma das duas finalidades. Um dos sistemas mais utilizado é o Sistema de Cores de Munsell e a maior parte dos sistemas utilizados são derivados a partir do criado pela *Comission Internationale de l'Eclairage* de 1931 (BRAINARD, 2003). Fazendo uma retrospectiva sobre a criação desses espaços de cores, um dos primeiros registros é o do trabalho de Pitágoras (circa 570-500 a.C.). Nesse trabalho ele relaciona as notas da escala musical de tons e meio tons aos planetas que representavam determinadas cores.

Já Aristóteles (384-322 a.C.) representou um espaço de cores que ia do branco ao preto com cinco cores entre essas duas. Para representar esse sistema linear ele utilizou as mudanças de cores da lua ao longo do dia, passando do branco do dia ao laranja, vermelho, violeta, verde e azul e chegando então ao preto que representa a escuridão da noite (FISCHER, 1999). Em 1613 o jesuíta belga Franciscus Aguilonius (1567-1617) desenvolveu o que provavelmente foi o primeiro espaço concebido com as três cores-pigmentos primárias: "*flavus, rubeus e caeruleus*" (amarelo, vermelho e azul) (CAMPENHAUSEN, 2001; FISCHER, 1999; JAEGER, 1984). O médico inglês Francis Glisson (1597-1677) desenvolveu um sistema baseado nas primárias vermelho, amarelo e azul, em uma escala de cinza composta por 23 etapas entre o branco e o preto (FISCHER, 1999; GAGE, 2001; KUEHNI & STANZIOLA, 2002). Isaac Newton (1642-1727) utilizando um prisma comprovou que a cor branca compunha-se pela junção de outras sete cores. Com esse estudou ele desenvolveu um disco com as sete cores, que ao ser girado forma a cor branca.

Desde o século 17 diversos pesquisadores realizaram testes e desenvolveram diferentes modelos de espaços de cores. Até que em 1905 o Sistema Munsell foi desenvolvido pelo artista e educador Albert Henry Munsell (1858-1918). As cores são arranjadas cilindricamente com o eixo vertical representando o *value* (V) uma dimensão associada ao brilho e que varia entre preto ($V=0$) e branco ($V=10$). Perpendicular ao eixo vertical estão as outras duas dimensões: o ângulo polar (*hue* (H)) ou matiz e a distância (*chroma* (C)) ou saturação. O matiz é um círculo dividido em 100 partes iguais, variando de 0 a 100. Já a saturação é determinada pelo afastamento do eixo vertical, quanto mais distante do eixo, maior o grau de saturação da cor. O sistema HSV é baseado no sistema desenvolvido por Munsell, porém os eixos são dispostos em um hexacone ou pirâmide invertida. O matiz varia em ângulos em torno do eixo vertical, variando de 0° a 360° , onde o vermelho tem a coordenada zero, o verde é 120° e o azul 240° . O eixo central representa a variação do brilho (V), sendo que o ponto $S=0$ e $V=1$ é Branco, $V=0$ preto e valores intermediários a esse são tons de cinza. A saturação (S) é o valor do ângulo de abertura, representado a saturação máxima igual a 1 (BHATIA, 2008; RUSS, 2007).

Figura 2. Sistema de Cores RGB (a) e HSV (b)

Fonte: Adaptado de Mendoza e Liu (2015)

Já o sistema RGB é baseado na teoria dos três estímulos, proposta por Young-Helmholtz. Nessa teoria, o olho humano percebe a cor através da estimulação de três pigmentos presentes nos cones da retina. A representação desse espaço de cores pode ser como um cubo. Para se obter uma determinada cor é usado um intervalo pré-especificado, normalmente de 0 a 255, sendo que a cor preta é obtida pela combinação (0,0,0), a cor branca (255,255,255), o vermelho (255,0,0), verde (0,255,0) e o azul (0,0,255). Os pontos no interior do cubo representam as demais cores através dos componentes R, G e B variando de 0 a 255.

Nas folhas, a percepção das cores está ligado à presença da clorofila e de outros componentes que determinam a quantidade de luz absorvida e refletida nos diversos comprimentos de onda.

2.4. Clorofila e Antocianina

Dentre os pigmentos naturais presentes nas plantas, a clorofila é a mais abundante, estando contida nos cloroplastos. A diferença de cor encontrada nas diversas plantas deve-se à presença e distribuição, além da clorofila, de outros pigmentos como os carotenoides e antocianinas. Os carotenoides são pigmentos associados que sempre acompanham as clorofilas (VON ELBE, 2000).

O nome clorofila foi proposto por Pelletier e Caventou, em 1818, para designar a substância verde que se podia extrair das folhas com o auxílio do álcool. São moléculas formadas por complexos derivados da porfirina, tendo como átomo central o magnésio (Mg), ligado à quatro átomos de nitrogênio (N). Os pigmentos clorofilianos são de grande importância comercial, podendo ser utilizados tanto como pigmentos quanto como antioxidantes (STREIT et al., 2005). A clorofila possui diferentes tipos como: clorofila a (Chl a) ou clorofila b (Chl b). Cada tipo de clorofila exerce uma função diferente nos vegetais.

A clorofila a é utilizado na realização da etapa fotoquímica da fotossíntese, sendo essa a primeira fase do processo fotossintético. Esse pigmento fotossintético é presente em todos os sistemas que realizam a fotossíntese oxigênica. Já a clorofila b, chamada de pigmento acessório, auxilia na absorção de luz e na transferência de energia para os centros de reação. Esse pigmento está presente nos vegetais superiores, algas verdes e algumas bactérias (TAIZ & ZIEGER, 2004). Existem outros tipos de clorofila, como a Chl c e Chl d. Na natureza as clorofilas a e b existem na proporção de 3:1.

Como dito anteriormente, a clorofila atua diretamente na realização da fotossíntese. É a partir dessa molécula que os elétrons oriundos da água acabam por serem transferidos para a cadeia transportadora da fotossíntese (KLUGE, 2004). Cada molécula de clorofila pode absorver apenas 1 quantum de energia de cada vez, o que causa excitação de um determinado elétron de um dos átomos da molécula. Esses elétrons excitados podem então se deslocar para orbitais mais distantes do núcleo, sendo essa distância proporcional à energia de um fóton que absorveu. A energia dessa excitação da molécula é então utilizada na fotossíntese (ROMANO, 2001). Essa energia, na forma de ATP é utilizada na conversão de CO₂ e H₂O em compostos orgânicos e O₂ que é liberado na atmosfera. Além da importância na liberação de oxigênio, o produto da fotossíntese são compostos utilizados como fonte de energia pelos seres heterótrofos

(GODVINJE; COLEMAN, 1990). A concentração de clorofilas e carotenoides são indicadores da suscetibilidade da planta à intensidade de luz incidente (VIEIRA, 1996).

Plantas que são sujeitas à estresses, nesse caso com deficiência de fósforo, apresentam um aumento na concentração de carotenóides e redução na produção de clorofilas. Essa mudança altera a forma como a folha absorve energia, causando menor absorção. Assim, ocorre também um aumento da reflectância nos comprimentos de onda da faixa do visível (YOUNG & BRITTON, 1990 APUD FERRI, 2002). Essa mudança altera também a leitura dos índices que utilizam-se para seu cálculo das quantidades de luz absorvida nesses comprimentos de onda. Portanto, o acompanhamento dos índices vegetativos serve como um indicador indireto da quantidade e produção de clorofila pelas plantas.

Outro pigmento de importância nas plantas é a antocianina, sendo após a clorofila o componente mais importante nos vegetais (HARBORNE & GRAYER, 1988). Desempenha funções variadas nas plantas, que vão desde proteção à ação da luz, função antioxidante, mecanismo de defesa e função biológica. Conferem cor azulada às folhas, flores e frutos exercendo assim também um papel no mecanismo de polinização, reprodução e propagação das plantas. Naturalmente a coloração das antocianinas é diretamente influenciada pela substituição dos grupos hidroxila e metoxila na molécula. Incrementos no número de grupos hidroxila tendem a tornar a coloração azulada. Na direção contrária, incrementos no número de grupos metoxilas aumentam a intensidade do vermelho (LÓPEZ et al., 2000). A maior presença de antocianinas nas folhas relaciona-se com o estado nutricional das plantas, estando relacionado com a quantidade de fósforo disponível à elas, bem como em alguns casos às características genéticas.

2.5. Nutrição mineral: o nitrogênio e o fósforo

Durante o ciclo produtivo, as plantas necessitam de nutrientes que supram suas demandas metabólicas e assim atinjam seu potencial de produção. Dentre os nutrientes há aqueles que são mais exigidos pelas plantas (macronutrientes) e aqueles que possuem uma exigência menor (micronutrientes), embora todos sejam essenciais. Quando as plantas não conseguem ter suas necessidades nutricionais supridas ocorre o aparecimento de sintomas que denunciam essas deficiências. As deficiências podem afetar o desenvolvimento das folhas, modificando sua coloração e tamanho, com o aparecimento de manchas, enrugamentos ou podendo ocorrer até a desfolha (SILVA, 2006).

O nitrogênio (N) é o elemento mais exigido pelas plantas, na matéria seca das plantas é encontrado cerca de 2 a 5% de N (FAQUIN, 2005). Por ser um elemento altamente móvel nos vegetais, o N é facilmente redistribuído nas plantas via floema, na forma de aminoácidos.

Quando o suprimento de N pelo meio é insuficiente, o N das folhas velhas é mobilizado para os órgãos e folhas mais novas. Consequentemente, plantas deficientes em N mostram os sintomas primeiramente nas folhas velhas (tendo como característica principal a clorose generalizada dessas folhas). Esse nutriente é constituinte de macromoléculas e enzimas, e na forma de aminoácido é precursor de hormônios vegetais, reserva nutricional nas sementes, atuando na formação de proteínas, pigmentos e vitaminas. Encontra-se em grande concentração na clorofila, possuindo papel no processo de fotossíntese das plantas e tendo forte relação com a cor verde das mesmas (FAQUIN, 2005).

Quanto ao fósforo (P), ele interfere em processos como: fotossíntese, respiração, armazenamento e transferência de energia, divisão celular e crescimento das plantas (SOUZA et al., 2013). Desde o crescimento prematuro das raízes até a qualidade dos frutos são afetados pela disponibilidade de P, assim o suprimento desse nutriente deve ocorrer desde a germinação, principalmente em plantas de ciclo curto.

O fornecimento limitado de fósforo (P) para as plantas promove o translocamento de P das folhas mais velhas para as folhas jovens e raízes, sendo que as folhas velhas adquirem coloração arroxeada, em razão do acúmulo do pigmento antocianina (SILVA et al., 2006). Este fenômeno pode ocorrer primeiro sob a forma de manchas localizadas que mais tarde se espalham, chegando ao ponto das nervuras ficarem totalmente pigmentadas. A folhagem pode adquirir uma coloração púrpura, sobretudo na ponta das folhas (ESPINOZA, 1991). Com a deficiência de fósforo as plantas também retardam a formação e manutenção de frutos, o que prejudica a produção.

Devido ao fato dessas deficiências alterarem cores e tamanho das folhas, analisar essas características ao longo dos ciclos produtivos pode servir como uma ferramenta para determinar as deficiências desses dois nutrientes.

Tratando mais especificamente da nutrição em tomateiros, Silva et al. (2001) afirmam que a quantidade de nutrientes absorvidos associa-se ao crescimento do tomateiro, dependendo de fatores bióticos e abióticos. Alguns autores observaram diferentes taxas de extração de nutrientes, sendo que Prado et al. (2011), para a cultivar 'Raísa' em sistema hidropônico, obteve a seguinte ordem de acúmulo dos macronutrientes: $K > N > Ca > P > Mg > S$. Já Purquerio et al. (2016), trabalhando com dois híbridos de tomate tipo salada, obteve como ordem de extração de macronutrientes, tanto para o híbrido Dominador quanto para o Serato, a seguinte sequência $K > N > Ca > S > Mg > P$.

Até o início da produção dos frutos, a folha é o órgão da planta com maior concentração de nutrientes e massa seca. Após o início do surgimento e enchimento dos frutos,

nutrientes como o N e o P passam a migrar e se acumular nos frutos. Segundo Grant et al. (2001), a planta utiliza-se do fósforo (P) armazenado na semente para germinação e início do seu crescimento. Na próxima etapa, o crescimento é influenciado pelo intercâmbio entre o fósforo (P) disponível externamente e o existente na própria planta.

As doses ideais de P no tomateiro devem ser fornecidas no início de seu ciclo (GRANT et al., 2001), pois se isso não ocorrer mesmo que sejam fornecidas doses posteriores as mesmas não farão efeito sobre a produtividade. A fase de ápice na absorção de nutrientes pelo tomateiro dá-se na fase de surgimento e enchimento dos frutos (SILVA et al., 2006). Ocorrendo posterior diminuição nessa absorção durante a maturação dos frutos. Melo et al. (2014) ao avaliarem o efeito de diferentes doses de fósforo (0, 97 e 194 g 1000 L⁻¹) no crescimento de tomateiro cultivado em sistema hidropônico, observaram maiores acúmulos de matéria seca para a maior dosagem de fósforo.

2.6. Tomateiro: origem e outras considerações

O tomate tem origem na América do Sul, na região da cordilheira dos Andes. Porém, o mesmo foi domesticado no México, conhecido como país de origem secundária do tomate, antes da chegada dos colonizadores espanhóis (Naika et al., 2006; Alvarenga, 2004; Filgueira, 2008) que o introduziram na Europa no século XVI. Inicialmente utilizado apenas como ornamento, o primeiro registro de aceitação como alimento foi feito em 1554 por Matthioli na Itália. Como curiosidade da origem de seu nome na língua italiana (pomodoro) deve-se ao fato de que a espécie inicialmente utilizada possuía frutos amarelos. Por isso, ela era chamada de maçã dourada, *Pomi d'oro*.

Já no Brasil, foi introduzido no final do século XIX por imigrantes europeus, sendo que o marco inicial de produção nacional ocorreu em 1940 com o surgimento no Rio de Janeiro do cultivar Santa Cruz (ALVARENGA, 2004; FILGUEIRA, 2008).

Quanto à sua classificação botânica, o tomateiro é uma planta eudicotiledônea da ordem *Tubiflorae*, pertencente à família *Solanaceae*, ao gênero *Solanum*, e subgênero *Euhycoopersium*. O primeiro a descrever o gênero *Solanum* foi Carl Van Linnaeus, depois de algumas reclassificações ao longo dos anos, mais recentemente com a utilização de ferramentas de análise de DNA a classificação feita por Linnaeus foi confirmada. Assim, o tomateiro é atualmente classificado como *Solanum lycopersium* L. (SPOONER et al., 2005, PERALTA et al., 2006).

Como característica mais marcante destaca-se a cor vermelha de seus frutos. Essa coloração se deve à produção de um carotenoide denominado licopeno. O licopeno, além de dar

cor vermelha aos frutos, também possui importância nutricional ao ser consumido, possuindo função anticancerígena atuando como antioxidante natural (FILGUEIRA, 2008).

Além da importância nutricional, o tomate tem grande relevância agrícola. No Brasil, em 2017, a produção foi de 4.373.047 de toneladas em uma área plantada de 64.715 hectares, tendo um rendimento médio de aproximadamente 68 t ha⁻¹. Entre as regiões do País, o destaque em produção no ano de 2017 ficou com o estado de Goiás (1.136.588 toneladas), seguido de São Paulo (753.283 toneladas) e Minas Gerais (694.893 toneladas) (IBGE, 2018).

Desde 1990 a área plantada com tomate tem permanecido praticamente constante (entre 50 e 70 mil hectares), mas tem aumentado a produtividade, tendo assim ganhos de produção mesmo sem a necessidade de aumento da área utilizada. Isso pode ser observado na Figura 3, em 1990 a produção foi de cerca de 2.200.000 Toneladas, passando aos 4.184.938 de 2015. Isso representa um aumento de aproximadamente 90,2%.

Figura 3. Área de cultivo, rendimento e produção do tomate no Brasil de 1990-2012.

Fonte: IBGE, 2012.

Para que isso ocorresse, ou seja, para que o tomateiro atingisse um potencial de produção maior ao longo dos anos, além de melhoramento genético, houve ainda um aumento da demanda dos nutrientes necessários pelas plantas.

2.6.1. Minitomates

Os minitomates vêm despertando o interesse de produtores e consumidores desde a sua introdução no País em 1990 (ALVARENGA, 2013). A origem desse tipo de tomate ainda não é muito clara. Em 2010, Israel iniciou uma campanha internacional de divulgação de alguns feitos científicos do País, entre eles havia a reivindicação da invenção desse tipo de tomate ter sido

realizada no País do Oriente Médio. Algumas publicações do ano de 2003 creditavam o desenvolvimento do tomate-cereja a dois professores da Universidade de Jerusalém durante a década de 1970. Entretanto, já havia citações à esse tipo de minitomate durante a década de 1960 nos EUA. Em reportagem publicada pelo jornal Nexo, a cientista Anna Wexler cita também que há registros históricos do tomate-cereja do ano de 1840. Em sua forma selvagem, cultivado por Astecas nos Andes, o tomate foi descrito como uma fruta amarelada e de tamanho menor - de acordo com historiadores, próximo ao de uma cereja. Na verdade, a pesquisa desenvolvida em Israel foi a criação de uma variedade desse tomate, que antes nascia acidentalmente em quintais e pomares, com durabilidade maior nas prateleiras permitindo assim sua propagação comercial (FREITAS, 2016).

O minitomate tipo *grape* possui um sabor mais adocicado, podendo ter formato arredondado ou formato alongado tipo uva (*grape*), com tamanho pequeno (cerca de 30 g), podendo conter entre 8 a 18 frutos por cacho na planta (ROCHA et al., 2010). Segundo a Associação Brasileira de Horticultura (ABH, 2012), a concentração de sólidos solúveis totais, constituintes pelo teor de açúcares, do tomate cereja ou *grape* pode ser até o dobro do tomate tradicional. Entre os minitomates *grapes* varia de 9 até 12 °Brix, enquanto nos tradicionais essa variação é de 4 a 6 °Brix.

A grande maioria das cultivares de minitomate comercializadas no Brasil são de crescimento indeterminado. Estas exigem maior atenção aos tipos de podas realizadas durante seu ciclo de produção, tais como a desbrota (retirada frequente dos brotos laterais) e a poda apical (desponta ou capação), que é a retirada do meristema apical da haste. Portanto, com a poda apical há redução no número de frutos, porém aqueles já formados desenvolvem-se mais e ganham mais peso (MACHADO et al., 2007; FILGUEIRA, 2008). Estas práticas devem ser observadas também por facilitarem a execução dos tratos culturais, reduzirem a quantidade e aumentarem a segurança na aplicação de defensivos e assim melhorarem a qualidade dos frutos (GUIMARÃES et al., 2007; MACHADO et al., 2007; FILGUEIRA, 2008; ALVARENGA, 2013).

Quanto à produtividade, esta varia em função do ambiente de produção (protegido ou à céu aberto) bem como da forma de irrigação e tipo de solo ou substrato. Alguns autores, com diferentes tipos de tratamento, avaliaram a produtividade do tomate tipo cereja. Rocha (2010) estudando diferentes doses nutricionais em hidroponia, obteve produtividade de 1,1 a 2,1 kg planta⁻¹ aos 88 DAT e com dez colheitas de frutos. Já Holcman (2009) com tomates cultivados em dois ambientes protegidos, obteve produtividade aos 100 DAT de 1,5 a 2,4 kg planta⁻¹.

Dentro desse aspecto, deve-se apresentar também algumas diferenças nos sistemas de produção para os minitomates.

2.6.2. Sistemas de Produção de Minitomate

Os minitomates assim como outras culturas podem ser cultivados em campo ou em ambiente protegido. Um ambiente protegido é aquele que possibilita certo controle sobre as condições edafoclimáticas (PURQUERIO & TIVELLI, 2006). Esse sistema de produção caracteriza-se pela construção de algum tipo de proteção ao cultivo, mas que ao mesmo tempo permita a passagem de luz, essencial para a realização da fotossíntese, bem como de calor, vento e umidade do ar. O ambiente protegido, dependendo da forma de construção, atua também em diminuir o ataque de pragas e doenças.

Outro ponto no cultivo em ambiente protegido é em relação ao consumo de água. Reis et al. (2009) em seu estudo destacam que o consumo de água no cultivo protegido é menor do que em ambiente aberto. A utilização de telas, sombreadores, aspersores ou ventilação forçada em ambientes como esses auxiliam na diminuição da transpiração pelas plantas, da evaporação da água entre outros fatores que diminuem o consumo e perda de água na irrigação.

Dentro ainda do sistema de cultivo protegido, podem ser adotadas diferentes formas de irrigação. Além do cultivo no solo, há outras formas de cultivo em ambiente protegido, que podem ser classificados em três grupos, dependendo do meio em que se desenvolvem as raízes: cultivo em substrato (semi-hidropônico), cultivo em água (hidroponia) e cultivo no ar (aeroponia) (EMBRAPA, 2011). Ainda segundo a EMBRAPA (2011) o cultivo em substrato apresenta algumas vantagens em relação ao cultivo no solo, podendo ser destacados: maior produtividade, possibilidade de cultivar em regiões onde o solo não é adequado a certa cultura, redução da mão-de-obra, melhor controle da nutrição no cultivo, redução da ocorrência de doenças e pragas e por consequência menor uso de defensivos agrícolas. Porém, esse sistema também possui desvantagens, tais como maior custo inicial do sistema, maiores custos com manutenção e exigência de maior conhecimento técnico para controle da nutrição.

O substrato escolhido para o cultivo deve ser aquele que garanta: sustentação para a planta, e troca gasosa ao sistema radicular (GONÇALVES, 1995), podendo ou não fornecer nutrientes. Para isso, o mesmo deve conter uma parte sólida composta por materiais orgânicos e minerais e uma gasosa preenchendo os poros com água e ar. Segundo Filgueira (2000) além dessas características, o substrato deve ser isento de fitopatogênicos e sementes de ervas daninhas e boas características físicas.

Os tipos de substrato podem ser orgânicos (turfa, cascas de árvores, cascas de arroz, fibra de coco entre outros) ou minerais (argila expandida, vermiculita, lã de rocha ou outros materiais). Quanto à fibra de coco, é considerado como um bom substrato para plantas por possuir excelentes características físicas que contribuem para o bom desenvolvimento das raízes. Possui textura variada, o que favorece o equilíbrio entre o ar e a água, alta porosidade e capacidade de retenção de água (RITTER et al., 2018). Além das características para produção agrícola, a utilização da fibra de coco contribui no aproveitamento de um resíduo agroindustrial.

Como o substrato, o ambiente de cultivo e as próprias características da planta a ser cultivada influenciam em seu desenvolvimento, assim devem ser utilizadas formas de se avaliar o desenvolvimento da planta, suas biorrespostas em relação a tecnologia de produção.

2.6.3. Biorrespostas do Tomateiro Grape

Além dos índices vegetativos, como parâmetros de avaliação do desenvolvimento de uma planta podem ser avaliadas as biorrespostas, tais como: matéria fresca, matéria seca, altura, número de frutos, peso dos frutos e área foliar. Podem ser avaliadas também as mais diversas partes das plantas, desde a raiz até folhas e frutos. O desenvolvimento da planta pode ser definido pela matéria seca dos diferentes órgãos da planta, sendo determinado pela relação entre fontes e drenos (PEIL & GÁLVEZ, 2005). Os principais órgãos fonte de uma planta são as folhas maduras. Os frutos, quando em desenvolvimento, são os principais órgãos dreno (TAIZ & ZEIGER, 2009).

Já a área foliar de uma planta tem importância em seu monitoramento devido sua relação com a realização da fotossíntese. A área foliar pode ser aumentada por meio de maior densidade de plantas no local de cultivo (COCKSHULL et al., 1992). A variação da densidade de cultivo é de fácil adoção para manejar a relação fonte e dreno, e o balanço de assimilados entre os órgãos vegetativos e os frutos (PEIL & GÁLVEZ, 2005) bem como influir em um maior desenvolvimento das plantas. Uma maior densidade pode reduzir a quantidade de luz fotossinteticamente ativa que chega às folhas, estimulando o crescimento das mesmas, bem como a altura das plantas.

No tomateiro, pode ser utilizada a quantidade de plantas por área como parâmetro de avaliação da produtividade. Além desse fator, o número de frutos por planta e a massa média dos frutos estão diretamente relacionados à produtividade (PAPADOPOULOS & PARARAJASINGHAM, 1997). Diferentemente da área foliar e número de folhas que aumentam com o adensamento das plantas, o número de frutos não sofre variação, porém ocorre redução na massa média dos frutos e aumento na produtividade por área (CARVALHO & TESSARIOLI NETO, 2005). Além do adensamento, a época e local de plantio, bem como o genótipo influenciam nessas relações.

Cada parâmetro tem estabelecido, em boletins ou outros trabalhos, níveis considerados ideais de desenvolvimento. Esses níveis podem ser categorizados, além dos considerados ótimos, em níveis deficientes. Para classificação desse níveis, podem ser utilizadas diferentes ferramentas utilizando-se dos parâmetros de avaliação, seja classificações pela média, agrupamento ou redes neurais de acordo com dados aferidos nas plantas, como por exemplo as imagens.

2.7. Análise e Processamento de Imagens

A utilização do processamento de imagens permite interpretação e análise automática computadorizada de dados extraídos de uma cena (MARQUES, 1999). A partir da década de 1960, com o desenvolvimento dos primeiros computadores digitais de grande porte e com o acirramento da corrida espacial, houve um incremento na utilização e desenvolvimento de sistemas de processamento e análise de imagens.

Ainda segundo Marques (1999), o processamento de imagens constitui-se de três etapas: aquisição (através de câmeras, escâner), processamento (computador) e saída (monitores, impressoras, dados). Ocorre a aplicação do processamento de imagens dos mais diversos tipos, desde os já citados casos militares até diagnósticos de doenças na área médica.

Na área agrícola tem crescido a utilização de imagens, em aplicações como a identificação da coloração de tomates durante o período de maturação (ALMEIDA; DAL FABBRO, 2015), cálculo da área superficial de laranjas feito por Khojastehnazhand, Omid e Tabatabaefar (2009) bem como no auxílio de redes neurais para seleção de soja com base no formato e tamanho dos grãos (KHATCHATOURIAN; PADILHA, 2008).

A utilização da análise e processamento de imagens possibilita a identificação e obtenção de padrões, que podem ser utilizados para caracterizar diferentes estágios de desenvolvimento das plantas, bem como reconhecer doenças e deficiências. A análise de imagens permite também a avaliação individual dos produtos, garantindo maior precisão e agilidade na separação de variáveis, na avaliação das plantas e principalmente na tomada de decisão tornando-a mais ágil e com menores custos em relação aos métodos tradicionais.

2.8. Rede Neural Artificial

Uma rede neural artificial (RNA) tem como inspiração para seu desenvolvimento a rede de neurônios no corpo humano. Seu funcionamento ocorre através da aprendizagem, onde cada entrada de dados no seu sistema de treinamento faz com que ocorra ajuste nos pesos de cálculo para a saída desejada.

Possuem como estrutura um conjunto de neurônios interconectados em diversas camadas, formando subconjuntos estruturais (camadas de entrada, intermediárias e saída) (HAYKIN, 1999). Quanto maior o número de neurônios nas camadas intermediárias, maior a taxa de aprendizagem da rede, mais apta estará a mesma a ajustar seus pesos de acordo com os dados de entrada.

Podem ser estruturadas em diferentes formas, com mais ou menos camadas internas, com diferente número de entradas e saídas. Também podem ser diferentes as maneiras de reentrada dos dados para cálculo dos pesos (bias) da rede, sendo que as redes mais conhecidas são a *Perceptron*, *Multilayer Perceptron* (MLP) e a de Hopfield (HAYKIN, 2001). Essas redes são do tipo recorrente, ou seja, possuem uma reentrada (realimentação) dos dados para aprendizado da rede. A realimentação afeta positivamente a capacidade de aprendizado da rede e na sua performance (MATSUNAGA, 2012)

A utilização de RNA garante algumas vantagens, principalmente devido à sua característica de aprendizagem e generalização, permitindo a modelagem de sistemas com relação desconhecida entre as variáveis ou muito complexa (RUSSEL; NORVIG, 2010). Apresenta ainda, capacidade de aproximação de funções universais, tolera conjunto de dados com ruídos (outliers) ou incompletos entre outras (HAGAN et al., 2014).

Na classificação da quantidade de nutrientes nas folhas, alguns autores tem desenvolvido trabalhos utilizando-se de redes neurais. Ayala-Silva e Beyl (2002) usaram dados das bandas de cores do violeta e do vermelho para determinar as taxas de N, P, K e Ca. Yanli et al. (2015) utilizaram imagens hiperspectrais de folhas de laranjeira para determinar a taxa de fósforo nas mesmas.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo Geral

Determinar o status de fósforo (P) em minitomateiro grape pela análise de imagens.

3.2 Objetivos Específicos

- Utilizar índices vegetativos para estimar a diagnose foliar de fósforo (P) em minitomateiro grape;
- Comparar o método de captação de imagem por escâner e câmera fotográfica para determinação de índices vegetativos;
- Verificar, em função de doses de fósforo, o melhor momento para determinar o diagnóstico de P nas folhas do minitomateiro;
- Analisar o desenvolvimento do tomateiro grape com doses de fósforo;
- Classificar por rede neural artificial os teores de P nas folhas do minitomateiro grape.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Local do Experimento

O experimento foi conduzido em uma casa de vegetação de 117 m², construída em policarbonato alveolar transparente de 10 mm, e com resfriamento evaporativo do ar, tipo painel-exaustor (*pad fan*), pertencente ao laboratório de Tecnologia de Produção e Sanidade Vegetal, do departamento de Engenharia de Biosistemas, situada na Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos (FZEA) da Universidade de São Paulo (USP), em Pirassununga-SP. Essa cidade localiza-se na região Centro-Oeste do Estado de São Paulo, a uma latitude 21°59'46" Sul e a uma longitude 47°25'33" Oeste, estando a uma altitude de 627 metros em relação ao nível do mar. De acordo com a Köppen e Geiger a classificação do clima é Cwa (clima Subtropical).

Durante o período do experimento, a variação de temperatura de umidade relativa do ar no interior da casa de vegetação variou como o demonstrado na figura 4:

Figura 4. Temperatura e umidade relativa do ar na casa de vegetação

Fonte: Própria autoria

A temperatura mínima na casa de vegetação ficou na média em 22,9°C e a máxima em 37,4°C, com temperaturas médias de 30°C, embora o sistema de resfriamento (*padfan*) da casa de vegetação tenha sido regulado para manter a temperatura máxima em 27°C. Segundo Fontes & Silva (2002) a temperatura ideal para o desenvolvimento do tomateiro varia de 10 a 34°C, com termoperiodicidade diária de 6 a 8°C. A umidade relativa do ar variou de 22,8 a 74,7%.

4.2. Produção das mudas de minitomate grape

O minitomate grape utilizado no experimento foi a cultivar TPC-1430 da empresa Agristar. O cultivar TPC-1430 é indicado para cultivo protegido; os frutos são firmes e apresentam sabor adocicado (9,3 °Brix), com excelente coloração vermelha. Apresenta produtividade média de 8 kg planta, segundo informações técnicas fornecidas pela empresa.

As mudas utilizadas no experimento foram cultivadas na própria casa de vegetação, sendo semeadas no dia 19 de dezembro de 2017. Antes da semeadura, o substrato de fibra de coco, marca Amafibra, recebeu 35 litros de água para cada embalagem (que continha 31,68 kg do material), sendo então desmanchado de sua forma inicial, absorvendo a água e sendo descompactado. A semeadura ocorreu em bandejas de polietileno de 128 células, contendo o substrato. O substrato utilizado foi do tipo granulado PM (Plug-Mix), tendo as seguintes especificações: pH = 5,5-6,2, condutividade elétrica (CE) = $0,5 \pm 0,6$ dS m⁻¹, e densidade = 150 kg m⁻³, sendo a composição nutricional descrita na Tabela 1.

Tabela 1. Composição nutricional do substrato a base de fibra de coco

N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Mo	Zn
----- ppm -----											
42	48	54	186	39	37	1,09	4,66	14,07	2,98	1,6	4,42

Fonte: Amafibra¹

Na primeira semana após a semeadura, as bandejas foram mantidas em um sistema de *floating*, com água repostada uma vez ao dia. Após a germinação, as mudas começaram a receber irrigação manual com solução nutritiva na seguinte composição: nitrato de cálcio (0,513g L⁻¹), sulfato de potássio (0,419g L⁻¹), sulfato de magnésio (0,389g L⁻¹) e micronutrientes (44 mg L⁻¹). Essa irrigação ocorria com uma frequência de uma a três vezes por dia, de acordo com as condições climáticas e umidade do substrato.

Antes do transplântio o substrato em cada saco utilizado foi saturado com solução nutritiva (a mesma utilizada na irrigação das mudas). Após 24 horas, a condutividade elétrica da solução drenada no vaso foi medida, sendo considerada ideal para o plantio com um valor abaixo de 3 dS m⁻¹. O transplântio ocorreu no dia 30 de janeiro de 2018 (40 dias após semeio – DAS), com as mudas apresentando quatro folhas totalmente expandidas (Figura 5).

¹ Comunicação pessoal

Figura 5. Mudas de tomateiro grape, cultivar TPC-1430, na bandeja (esquerda), após tranplantio (direita). Fonte: Própria autoria

4.3. Delineamento experimental

O delineamento experimental (esquema em anexo) foi em blocos ao acaso, em esquema fatorial 5×4 , sendo cinco tratamentos com doses de fósforo (P_2O_5): 0, 25, 50, 75 e 100% da dose recomenda para a solução nutritiva da cultura (de acordo com Cunha et al. (2014)), e quatro avaliações em subparcelas divididas no tempo: aos 22, 36, 50 e 64 dias após o transplântio (DAT), com quatro repetições. Cada parcela foi composta por um saco plástico preto de 6 litros de volume, preenchidos com o mesmo substrato utilizado na produção das mudas, totalizando 160 plantas conduzidas em sistema de haste dupla. Cada saco continha 4,3 litros de substrato. Esse valor garantia uma capacidade de retenção de água de 2,18 litros.

Foram divididas em quatro linhas com 40 vasos cada. A distância das plantas foi de 0,4 m na linha e 0,6 entre as linhas, sendo que nessas condições o adensamento foi de 4,1 plantas m^{-2} (Figura 6).

Figura 6. Parcelas experimentais, plantas com 15 DAT (esquerda) e 35 DAT (direita)

Fonte: Própria autoria

4.4. Solução Nutritiva

As plantas foram irrigadas por sistema automatizado, com gotejamento. Cada gotejador possuía uma cruzeta com quatro saídas, sendo ligado por um microtubo a uma estaca que foi fincada ao lado de cada planta. O gotejador possuía vazão de $8 L h^{-1}$, sendo que cada planta

recebia uma vazão de 2 L h⁻¹. A solução para irrigação era preparada em uma caixa d'água com capacidade para 500 litros, e irrigada nos vasos em horário e em tempo definidos através de um painel controlador da marca *RainBird*. Os valores de pH e condutividade elétrica da solução eram medidos a cada preparo, sendo o pH medido através de fita e a condutividade elétrica com uma caneta (*waterproof Pen mS/cm Tester*). Inicialmente a irrigação foi realizada uma vez ao dia, sendo feita às 9:30h da manhã, com um pulso de irrigação que durava quatro minutos totalizando um volume aplicado de 120 ml de solução a cada pulso. A solução preparada na caixa d'água foi feita para 400 litros de água, conforme tabela 2.

Tabela 2. Composição da solução nutritiva para um volume de 1000 litros, aplicada até os 45 dias após transplântio (DAT) e após os 45 DAT

Fertilizante	Quantidade	Nutriente	Quantidade
Estágio 1 – até 45 DAT			
Ca(NO ₃) ₂	512,90 g	Nitrogênio (15,5% N)	79,50 g
		Cálcio (19% Ca)	97,45 g
MgSO ₄	388,90 g	Magnésio (9% Mg)	35,00 g
		Enxofre (11,8% S)	45,72 g
Formulado de Micronutrientes	44,12 g	Ferro (3,4% Fe)	1,50 g
		Boro (0,85% B)	0,37 g
		Manganês (3,2% Mn)	1,40 g
		Molibdênio (0,06% Mo)	0,25 g
		Zinco (4,2% Zn)	1,85 g
Estágio 2 – após 45 DAT			
Ca(NO ₃) ₂	581,58 g	Nitrogênio (15,5% N)	90,00 g
		Cálcio (19% Ca)	110,50 g
MgSO ₄	500,00 g	Magnésio (9% Mg)	45,00 g
		Enxofre (11,8% S)	59,00 g
Formulado de Micronutrientes	750,00 g	Ferro (0,2% Fe)	0,15 g
		Boro (0,5% B)	0,33 g
		Manganês (3,0% Mn)	2,25 g
		Zinco (9% Zn)	4,50 g
Ferro	25,00 g	Ferro (6% Fe)	1,50 g

Fonte: adaptado de Cunha et al. (2014).

As doses necessárias de fósforo foram aplicadas manualmente de acordo com as doses propostas no experimento (0, 25, 50, 75 e 100% de P₂O₅), sendo a dose de 100% de P₂O₅ de 114 g 1.000 L⁻¹ até 22 dias após transplântio (DAT) e de 260 g 1.000 L⁻¹ até a condução final do experimento (64 DAT). Devido à composição do fertilizante utilizado para fornecimento do

fósforo, o fosfato monopotássio (52% P_2O_5 e 34% K_2O), as doses de potássio também foram fornecidas manualmente, através do sulfato de potássio (51% K_2O e 18% S).

O fornecimento de fósforo (P) e de potássio (K) foi realizado uma vez por semana, sendo relativo às quantidades dos demais nutrientes fornecidos pela irrigação a cada semana, ou seja, de acordo com o volume que cada planta recebia de solução nutritiva se calculava a quantidade correspondente dos nutrientes que seriam fornecidos via irrigação manual. O fosfato monopotássio e o sulfato de potássio eram pesados por tratamento e preparados em uma solução concentrada de 2 litros de volume, do qual eram aplicados 50 ml por planta. Três vezes por semana eram coletados dados relativos à solução fornecida na irrigação e à drenada nos vasos (volume, pH e condutividade elétrica), bem como da temperatura e umidade da casa de vegetação. Após 45 DAT o sulfato de potássio foi substituído pelo cloreto de potássio (58% K_2O e 45% Cl).

4.5. Manejo da Irrigação

O manejo da irrigação foi realizado de acordo com a porcentagem de solução drenada nos vasos, sendo que o valor considerado ideal de drenagem era entre 10 a 15%. Para cálculo dessa drenagem foi utilizada a seguinte equação:

$$Drenagem = \left(\frac{\text{Volume aplicado}}{\text{Volume drenado}} \right) * 100 \quad \text{Eq. (7)}$$

No dia 19 de fevereiro passaram a ser aplicados dois pulsos ao dia, às 9:30h e 15:30h. Já no dia 12 de março os pulsos diários passaram a ser três, sempre de quatro minutos cada, passando a ser realizados nos horários: 9:30h, 11:30h e 15:30h. E finalmente, no dia 16 de março os pulsos diários passaram a ser quatro, incluindo o horário das 13:30h aos horários de aplicação anteriores. O volume da solução nutritiva aplicada até os 45 DAT, por vaso, foi de 8,14 litros, sendo que após esta data até o final do experimento foram mais 7,71 litros, totalizando o volume por planta de 15,85 litros.

4.6. Biorrespostas do Tomateiro Grape

Aos 22, 36, 50 e 64 dias após o transplântio (DAT) as plantas de minitomateiro grape foram avaliadas e determinados: altura da planta (AL), diâmetro do caule (DC), área foliar (AF), massa fresca (MFF) e seca das folhas (MSF), do caule (MFC e MSC) e da raízes (MFR e MSR) (Figura 7). Após o aparecimento dos frutos, nas avaliações aos 36, 50 e 64 DAT, foram também determinadas: a quantidade de frutos (NF) e sua massa fresca (MFFT) e seca (MSFT).

Figura 7. Frutificação do tomateiro grape aos 35 DAT (esquerda) e medição da altura da planta (direita)

A altura das plantas foi medida com uma trena graduada, medindo-se da base da planta (parte em contato com o substrato) até o ápice. A cada medição foram avaliadas todas as plantas, sendo que os valores eram medidos em centímetros. O diâmetro do caule foi avaliado em todas as plantas, sendo seu valor medido por um paquímetro digital.

A área foliar foi determinada em um medidor de área foliar, modelo LI-3100C, da empresa LI-COR, medindo-se a área foliar da quarta folha coletada.

Em cada coleta foram avaliadas duas plantas por parcela, separando-se as folhas do caule. As raízes foram retiradas dos sacos e lavadas com água, secas com papel toalha foram pesadas para obtenção da massa fresca. Após a pesagem as amostras foram acondicionadas em sacos de papel e secas em estufa a 65°C por 72 horas. Após esse período foram pesadas novamente para obtenção de sua massa seca. Após o aparecimento dos frutos, o mesmo processo foi realizado com eles. Sendo que no caso dos frutos o tempo de secagem foi um pouco maior para obtenção de amostras totalmente secas.

Para obtenção dos valores de clorofila nas plantas, foi utilizado um clorofilômetro, modelo CFL 1030, da marca Falkner. As plantas que teriam suas folhas coletadas para análise de imagens tinham o valor de clorofila calculado utilizando-se a mesma quarta folha. Em cada planta eram feitas três medidas por folha, no terço médio e ponta das folhas, obtendo-se depois o valor de clorofila a, b e total pela média das três medições.

4.7. Análise Química

As mesmas folhas utilizadas para obtenção das imagens foram enviadas para realização de diagnose foliar, avaliando-se tanto macro quanto micronutrientes. Para cada bloco foram selecionadas quatro folhas que após a obtenção das imagens foram colocadas em saco de papel para secagem. A secagem foi realizada em estufa a 65°C por 72 horas. Posteriormente, as

amostras foram moídas e acondicionadas em potes identificados e enviados para análise no Laboratório de Análise do setor de Ciências Agrárias da FZEA/USP.

No laboratório, a obtenção dos teores dos nutrientes foi realizada pelos técnicos utilizando as seguintes metodologias: nitrogênio é realizado o método de Kjeldahl e os demais macronutrientes por via úmida, sendo a leitura do fósforo por colorimetria, enxofre por turbidimetria, sódio e potássio em fotômetro de chama e o cálcio e magnésio em espectrofotômetro de absorção atômica. Quanto aos micronutrientes: Boro extraído por via seca (queima a 550°C) e determinado pelo método de azomethina, os demais são extraídos como os macronutrientes e leitura em espectrofotômetro de absorção atômica.

4.8. Análise de Imagens

Aos 22, 36, 50 e 64 DAT foram coletadas as imagens das folhas dos tomateiros para análise por imagens, a partir das quais foram calculados os índices vegetativos. Foram amostradas a 4ª folha totalmente expandida a partir do ápice como determinado por Malavolta (1989), sendo que em cada parcela foram obtidas quatro amostras. As imagens foram obtidas tanto da face adaxial quanto da face abaxial das folhas. Para obtenção das imagens foram utilizadas duas metodologias: a primeira utilizando um escâner de mesa ajustado para digitalizar as imagens a 300 dpi, salvando-as no formato tiff. As folhas foram colocadas com um papel cartão branco ao fundo para serem escaneadas; a segunda foi utilizando-se de uma câmera digital (Figura 9). Após a obtenção das imagens, as folhas foram destinadas à diagnose foliar como descrito no item 4.7.

Figura 8. Fluxograma de obtenção das imagens

Fonte: Própria autoria

Nesse método, as folhas foram colocadas sobre um fundo de feltro rosa (o que aumentou o contraste e eliminou reflexões que foram detectadas pelo software), com três discos de 11 cm de diâmetro (um amarelo, um branco e outro verde). Os discos desempenharam o papel de padrões internos e serviram para corrigir as diferenças nas condições de iluminação (Rorie et al., 2011a). A cor dos discos verde e amarelo correspondem exatamente aos padrões de cores internos do papel colorido Xrite (X-Rite Inc., Kentwood, MI) usado por Purcell et al. (2015) e Rorie et al. (2011b). Os discos coloridos serviram de padrões internos para a calibração e conheciam valores de cor Munsell de 6.7 GY 4.2 / 4.1 para o disco verde e 5Y8 / 11.1 para o disco amarelo. As imagens das folhas foram obtidas sob iluminação fluorescente usando uma câmera modelo Nikon, com resolução de imagem de 3264×2448 pixels. A câmera foi configurada para ISO 100, velocidade de obturador de 1 / 15s, abertura focal de 2,0, e sem compensação de exposição de luz, com balanço de luz fluorescente com o flash desligados.

Figura 9. Exemplo de imagem capturada com câmera fotográfica

Fonte: Própria autoria

Após a obtenção das imagens, as mesmas foram então inseridas em um software desenvolvido no programa Matlab para obtenção dos valores dos seus componentes RGB e HSV, bem como para o cálculo dos índices vegetativos a serem avaliados. Os passos descritos na linguagem utilizada no programa, assim como o fluxograma (Figura 10) de funcionamento do sistema são mostrados a seguir:

```
I = image;
r = I(:, :, 1); % R image.
G = I(:, :, 2); % G image.
B = I(:, :, 3); % B image.
```

$$MPRI = (g-r)/(g+r)$$

hsv = rgb2hsv(I);

h = hsv(:, :, 1); % Hue image.

S = hsv(:, :, 2); % Saturation image.

V = hsv(:, :, 3); % Value (intensity) image.

$$ICVE = [((h-60)/60)+(1-s)+(1-v)]/3;$$

Figura 10. Fluxograma do sistema de cálculo dos índices vegetativos

Fonte: Própria autoria

Para realizar esses passos, o sistema desenvolvido possui uma interação com o usuário, que pode seleccionar o índice desejado para avaliação da folha, abrir as imagens e visualizar os valores de cada componente dos sistemas de cores (Figura 11).

Figura 11. Sistema de interação com o usuário desenvolvido no Matlab

4.9. Análises Estatísticas

Os dados de biorrespostas e diagnose nutricional foram submetidos a análise de variância (ANOVA), e as médias submetidas a análise de regressão ao nível de 5% de probabilidade. As avaliações no tempo foram consideradas como sub-parcelas. Foi utilizado o software estatístico Sisvar 5.3 (FERREIRA, 2011).

Os dados de micronutrientes foram transformados em raiz quadrado de X a fim de garantir as pressuposições do modelo matemático.

Para medir o grau de dependência entre duas respostas estudou-se o coeficiente de correlação linear (r). Esse coeficiente varia entre menos um e um, sendo que quanto mais próximo dos extremos mais forte é a relação entre as variáveis. Valores negativos desse índice indicam uma relação negativa entre as variáveis, ou seja, quando uma aumenta a outra diminui. Sendo que, valores positivos do índice indicam o contrário (BUSSAB; MORETTIN, 2013).

O coeficiente da correlação de Pearson, ou coeficiente de correlação produto-momento ou o r de Pearson mede o grau da correlação linear entre duas variáveis quantitativas e foi utilizado para correlacionar os índices vegetativos com algumas variáveis de desenvolvimento analisadas. É um índice adimensional com valores situados entre -1,0 e 1,0 inclusive, que reflete a intensidade de uma relação linear entre dois conjuntos de dados. Para fim de classificação, pode-se adotar os seguintes critérios: correlação perfeita ($r=1$), forte ($r>0,75$), moderada ($r>0,5$), fraca ($r<0,5$) e inexistente ($r=0$) (NOGUEIRA et al., 2010).

Na análise dos resultados foram utilizados também algumas formas de análise multivariada. Um deles foi a correlação canônica. Esse método de análise pode ser vista como uma extensão da regressão múltipla. Através dela é possível avaliar a relação, inter e entre, dois conjuntos de dados. O objetivo da correlação canônica é determinar uma combinação linear para os grupos de variáveis (dependentes e independentes) para maximizar a correlação entre os grupos (CRUZ & REGAZZI, 1994). A correlação canônica torna-se útil quando múltiplas medidas de resultados estão disponíveis. De forma geral a correlação canônica pode ser expressa por:

$$Y_1 + Y_2 + Y_3 + \dots + Y_n = X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_n \quad \text{Eq. (8)}$$

Para avaliar os índices vegetativos utilizados em relação à taxa de P nas folhas, foi realizada uma análise dos componentes principais para selecionar os índices mais adequados aos dados disponíveis. A análise dos componentes principais é uma ferramenta da análise multivariada. Trata-se de uma ferramenta de análise exploratória, que permite revelar a existência

ou não de amostras anômalas, de relações entre as variáveis medidas e de relações ou agrupamentos entre amostras (LYRA et al., 2010).

Com os índices selecionados após a análise de componentes principais (ACP) foi realizada a classificação dos valores em categorias de P nas folhas. Nessa etapa foram utilizados três métodos de classificação por análise de agrupamento, utilizando a distância Euclidiana, Manhattan e K-média. A distância euclidiana (também chamada distância métrica) calcula a distância entre dois pontos utilizando como base a equação do teorema de Pitágoras dada por:

$$D_{ab} = [(X_a - X_b). (Y_a - Y_b)]^{1/2} \quad \text{Eq. (9)}$$

A distância Manhattan possui esse nome em alusão às ruas da ilha de mesmo nome em Nova York vistas de cima, nesse caso a distância entre os dois pontos é calculada como um carro andando nessas ruas, sendo que o mesmo não pode andar na diagonal, mas apenas na orientação vertical e horizontal. A distância é dada pela soma dos valores andados à direita e à esquerda, ou acima e abaixo no plano cartesiano entre os pontos. Já o método K-médias consiste em minimizar a soma dos quadrados residuais dentro de cada grupo (sendo bastante semelhante à Análise de Variância) com o intuito de aumentar a homogeneidade do mesmo, ao mesmo tempo em que busca maximizar essa soma entre os grupos, aumentando a diferença entre eles para agrupar os dados com base nas distâncias médias entre os pontos, esse método utiliza alguma forma de calcular a distância entre os pontos podendo ser utilizada a distância Euclidiana. Os três métodos são não-supervisionados, ou seja, não há um treinamento prévio do sistema para realizar a classificação, tendo apenas que ser definido o número de grupos a serem classificados, diferentemente de uma rede neural artificial, na qual o treinamento serve para ajustar os pesos para classificação não é necessária a definição do número de grupos. Tanto esses três métodos, quanto as análises de componentes principais foram realizados utilizando-se o suplemente Action Stats do Excel.

Para classificação dos níveis de P foi utilizada a referência do boletim técnico 215 do IAC (Trani et al., 2015). Os índices vegetativos utilizados foram os descritos pelas equações 5 e 6 calculados pelas imagens obtidas com o escâner, o índice da equação 5 obtido com as imagens da câmera fotográfica bem como os índices normalizados de R, G e B nas imagens do escâner. Os índices normalizados são obtidos calculando o valor da banda (RGB) dividido pela soma das três e são denominados como Rn, Gn e Bn.

4.10. Rede Neural Artificial

Além das classificações já descritas, utilizando-se dos mesmos índices como dados de entrada, foi desenvolvida uma rede neural artificial (RNA) (Figura 12). Essa RNA, desenvolvida no software Matlab, é do tipo *Multilayer Perceptron (MLP)* com aprendizagem baseado no *backpropagation*. A camada intermediária possuía 10 neurônios, função de treinamento foi utilizado o Levenberg-Marquardt (*trainlm*), sendo a avaliação de desempenho nesta etapa baseado no quadrado médio do erro (MSE). Para o treinamento da rede foram utilizados 2/3 das amostras de dados, sendo que na etapa de validação da rede foram selecionadas 20 amostras aleatórias, distribuídas nos quatros tempos de avaliação (22, 36, 50 e 64 dias após transplanto – DAT).

Figura 12. Esquema da Rede Neural Artificial

Fonte: Própria autoria

O algoritmo escrito no Matlab é mostrado a seguir:

```
net = feedforwardnet (10);
X = [];
T = [];
net = configure(net,X,T);
net.trainFcn = 'trainlm';
net.layers{1}.transferFcn = 'logsig';
[net,tr] = train(net,X,T);
resultado = net(X);
dados = [];
out = net(dados);
```

Onde as entradas X e T, são respectivamente, as amostras selecionadas para o treinamento e os valores de P (targets) respectivos a cada valor dos índices utilizados (X). A penúltima linha são os dados (amostras) a serem utilizados na validação da rede após o treinamento.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A variação do pH e condutividade elétrica (CE) da solução nutritiva aplicada e drenada, durante o período experimental é apresentada na figura 13. Em relação à CE, a mesma quando atingiu valor maior que 1 mS cm^{-1} entre o valor da solução aplicada e da drenada, orientou para o aumento do número de pulsos de irrigação para ocorrer maior lavagem do substrato e assim diminuir a CE. Isso ocorreu apenas entre os dias 05/03 a 12/03, sendo que com o aumento dos pulsos a condutividade elétrica voltou a estar dentro dos limites desejados. Os valores de pH oscilaram dentro dos limites esperados.

Figura 13. pH e Condutividade elétrica (CE) da solução aplicada e drenada no período de 05/02/2018 a 02/04/2018

5.1. Diagnose Nutricional

A avaliação da diagnose nutricional do minitomateiro grape não apresentou interação entre as doses de P_2O_5 e a datas de avaliação (DAT). Em relação a todos os nutrientes, macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S) e micronutrientes (B, Cu, Fe e Zn), apenas os teores de fósforo P e Mn variaram de acordo com as doses de P_2O_5 (Tabela 3), de acordo com o fornecimento da solução nutritiva padrão a todos os tratamentos. Apesar da significância para variação de Mn, em nenhuma planta foi observada clorose das folhas, característica da deficiência desse nutriente, não interferindo assim na análise de imagens para o fósforo.

Aos 64 DAT, os macronutrientes mais extraídos foram na sequência N, K, Mg, Ca e P, apenas na dose 0% a sequência difere-se pela extração de Ca ser maior que a de Mg. Esses resultados são diferentes dos observados por outros autores, Purquerio et al. (2016), por exemplo, para dois híbridos de tomate salada, observaram que o nutriente mais extraído foi o K e não N.

Tabela 3. Diagnóse nutricional no minitomateiro grape aos 22, 36, 50 e 64 dias após o transplântio (DAT) submetidos a doses de P_2O_5 , macronutrientes e micronutrientes

Dose	N n.s.	P*	K n.s.	Ca n.s.	Mg n.s.	S n.s.	B n.s.	Cu n.s.	Fe n.s.	Mn*	Zn n.s.
P ₂ O ₅ ----- 22 DAT -----											
	----- g kg ⁻¹ -----						----- mg kg ⁻¹ -----				
0	36,10	2,29	36,98	17,98	8,82	4,43	53,08	17,33	199,72	286,57	28,95
25	36,67	3,28	31,12	16,33	8,58	5,20	48,66	18,33	193,65	218,02	35,18
50	35,68	3,98	37,47	16,59	8,65	5,63	51,84	11,18	201,10	192,12	22,58
75	32,66	3,96	32,58	15,55	8,08	4,77	48,42	15,70	213,35	168,95	27,25
100	37,80	4,12	35,27	15,86	8,34	4,66	47,77	13,60	195,38	189,85	33,37
----- 36 DAT -----											
	----- g kg ⁻¹ -----						----- mg kg ⁻¹ -----				
0	31,59	2,53	22,80	15,49	7,88	2,13	93,96	13,85	235,45	228,40	67,32
25	31,59	2,20	26,96	16,20	8,99	1,74	82,67	16,30	203,00	249,60	68,72
50	34,17	3,31	22,32	15,88	8,10	2,76	64,05	15,10	245,95	103,27	61,63
75	32,01	3,18	29,65	14,71	7,13	2,58	71,77	12,45	212,42	115,55	58,47
100	36,47	3,60	21,58	16,06	7,90	3,10	71,13	16,03	182,63	146,77	71,98
----- 50 DAT -----											
	----- g kg ⁻¹ -----						----- mg kg ⁻¹ -----				
0	33,03	1,25	23,78	12,87	7,39	1,33	69,40	15,13	228,63	266,53	57,45
25	34,55	2,85	20,61	12,00	6,58	2,23	60,68	13,53	191,65	129,32	31,10
50	34,25	3,75	21,34	13,83	5,89	2,50	55,49	12,03	180,25	102,25	32,70
75	31,98	3,66	18,16	12,87	6,50	2,79	63,49	10,10	198,13	112,80	30,27
100	34,14	3,69	18,89	11,47	6,38	2,23	66,02	10,90	193,70	96,67	29,32
----- 64 DAT -----											
	----- g kg ⁻¹ -----						----- mg kg ⁻¹ -----				
0	33,03	1,25	23,78	12,87	7,39	1,33	69,40	15,13	228,63	266,53	57,45
25	37,41	1,19	32,97	4,67	15,59	4,68	35,57	7,01	143,06	100,63	101,40
50	36,92	1,43	30,22	4,54	15,98	3,82	37,01	8,16	155,93	63,00	98,23
75	33,96	1,46	30,72	3,98	16,86	4,08	33,79	8,94	129,15	78,68	93,19
100	42,68	1,63	32,47	4,55	16,16	4,78	36,79	7,23	124,95	76,73	99,73
----- Média -----											
	----- g kg ⁻¹ -----						----- mg kg ⁻¹ -----				
0	33,67	1,63	30,07	12,82	9,87	3,14	72,15	14,64	192,99	271,54	66,60
25	35,05	2,38	27,91	12,30	9,94	3,46	56,89	13,79	182,84	174,39	59,10
50	35,26	3,12	27,84	12,71	9,65	3,67	52,10	11,61	195,81	115,16	53,78
75	32,65	3,07	27,78	11,78	9,64	3,55	54,37	11,80	188,26	119,00	52,30
100	37,77	3,26	27,05	11,98	9,70	3,69	55,43	11,94	174,16	127,51	58,60
C.V.	9,81	22,68	14,73	17,32	13,45	25,24	18,12	10,23	8,55	16,72	12,36

n.s.: não significativo ao nível de 5% de probabilidade

Na avaliação ao longo do tempo (DAT), apenas para o nitrogênio (N) não foi significativo, sendo que os demais nutrientes variaram ao longo do tempo (Tabela 4).

Tabela 4. Diagnóse nutricional média do minitomateiro grape submetidos a doses de P_2O_5 aos 22, 36, 50 e 64 dias após o transplantio (DAT), macronutrientes e micronutrientes

DAT	N ^{n.s.}	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	g kg ⁻¹					mg kg ⁻¹					
22	35,78	3,53	34,69	16,46	8,49	4,94	49,95	15,23	200,64	211,10	29,47
36	33,17	2,96	24,66	15,67	8,00	2,46	76,72	14,75	215,89	168,72	65,62
50	33,59	3,04	20,56	12,61	6,55	2,22	63,02	12,34	198,47	141,51	36,17
64	36,98	1,23	32,62	4,54	16,00	4,40	35,79	8,72	132,25	124,74	101,05

n.s.: não significativo ao nível de 5% de probabilidade

Os teores de macronutrientes (P, K, Ca, Mg e S) e de micronutrientes (B, Cu, Fe, Mn e Zn) apresentaram respostas quadráticas de variação ao longo do tempo (Tabela 5).

Tabela 5. Regressões ajustadas a diagnóse nutricional no minitomateiro grape, macronutrientes e micronutrientes, avaliados ao longo do tempo (DAT), média das doses de P_2O_5

Macronutrientes (g kg ⁻¹)	R ²	C.V. (%)
$P = -0,00159x^2 + 0,088177x + 2,231965$	0,8952	22,68
$K = 0,028173x^2 - 2,496497x + 76,484623$	0,9603	29,67
$Ca = -0,00928x^2 + 0,520988x + 9,355220$	0,9958	16,08
$Mg = 0,01269x^2 - 0,940705x + 23,641473$	0,8697	29,12
$S = 0,00595x^2 - 0,524593x + 13,610171$	0,9996	35,27
Micronutrientes (mg kg ⁻¹)	R ²	C.V. (%)
$B = -0,07799x^2 + 6,152648x - 46,669087$	0,9848	10,00
$Cu = -0,00400x^2 + 0,187107x + 13,079152$	0,9990	18,84
$Fe = -0,20392x^2 + 7,347052x + 88,495023$	0,9969	16,29
$Mn = 0,03267x^2 - 4,854437x + 301,853728$	0,9997	12,47
$Zn = 0,03663x^2 - 1,826881x + 59,923391$	0,6005	18,93

Quanto à regressão dos dados de fósforo da análise foliar, foi significativa a variação em relação aos tratamentos bem como aos dias após o transplantio. Em relação às doses como demonstrado na Figura 14, o R² dos dados de P em relação às doses foi de 0,9717 na média geral do experimento, tendo o ápice de P nas folhas com 94% da dose (que corresponde a um valor de 3,39 g kg de P). Com o aumento das doses fornecidas observou-se na média um aumento do P nas folhas. O manganês (Mn) foi o micronutriente que apresentou diferença no teor foliar do tomateiro em relação a doses de fósforo, atingindo a menor concentração com 72% de P_2O_5 (Figura 14). Pode-se destacar também o aumento no teor de Mg com o aumento de P nas folhas. Segundo Malavolta et al. (1997), a absorção de P sofre influência do teor de Mg disponível para a planta podendo ser o Mg carreador de P para dentro da mesma.

Figura 14. Teores de fósforo (P) e manganês (Mn) médios (DAT) na folha do tomateiro grape em relação às doses de P₂O₅

Zhu et al. (2017) não verificou diferença estatística entre os valores do fósforo nas folhas em relação às doses desse nutriente no tomateiro da cultivar Ridgerunner. Porém, esses autores observaram uma diminuição desse valor em relação aos dias após o transplântio, sendo essa queda mais pronunciada no período entre os 30 DAT aos 60 DAT. Essa queda do valor de P nas folhas também foi observada neste trabalho.

A diminuição da quantidade de P nas folhas com o passar dos dias se dá pela migração desse nutriente para os frutos. Fernandes e al. (1975) em um estudo clássico observaram as seguintes concentrações de P nas folhas com o passar do tempo: aos 40 dias havia 0,3% de P nas folhas (em relação à massa de matéria seca), aos 60 dias 0,32%, aos 70 dias 0,21% e nesse período já ocorria a aparição de flores e frutos e o fósforo nesses órgãos foi de 0,31%. Essa relação aumentava com o passar dos dias, chegando ao ápice aos 100 dias de idade da planta, quando nos frutos havia 0,34% de P e nas folhas a quantidade havia diminuído para 0,1%.

No trabalho aqui descrito, o aparecimento dos frutos ocorreu aos 29 DAT, quando a planta tinha 69 dias após o plantio. Essa data coincide com o descrito por Fernandes et al. (1975), e pela Figura 15 observa-se a queda do teor de P após 30 DAT, relacionada ao aparecimento dos frutos e uma queda mais acentuada após os 50 DAT quando ocorreu o amadurecimento da maioria dos frutos já desenvolvidos. Esses fatores levam a proposição de que para essa cultivar a análise foliar seja antecipada para os 50 DAT.

Figura 15. Teor de P médio (doses de P_2O_5) na folha do tomateiro grape em relação aos DAT

5.2. Biorrespostas do tomateiro grape

O diâmetro do caule (DC) apresentou aumento com o aumento da dosagem fornecida de P, tendo o ápice com 84,5% da dose ideal de acordo com a regressão ajustada (Figura 16). Houve um crescimento linear ao longo do tempo (DAT). Nesse experimento não foi observada significância entre as doses fornecidas e a altura das plantas. Somente ocorreu significância para a regressão em relação aos DAT. A maior densidade de plantio interfere também na altura das plantas. Esse comportamento pode ter sido influenciado pela maior densidade de plantio, pois segundo Silva Junior (1992) e Streck et al. (1996), a maior densidade de plantas por metro quadrado pode causar maior altura de plantas devido ao aumento do comprimento dos internódios ocasionado pela busca mais intensa de luz.

Figura 16. Diâmetro do caule (DC) e altura (ALT) em relação das doses de P₂O₅, avaliado no tempo (DAT)

Pinto (2017) verificou diferença entre as doses fornecidas de fósforo e a altura das plantas para uma variedade de tomate cereja, sendo que a dose zero de fósforo apresentava uma altura de 100 cm após 120 dias do plantio. Nesse experimento com 64 DAT a média de altura das plantas com 0% da dose de fósforo foi de 218,75 cm. Entre as considerações a serem feitas em relação à essa maior altura, está a maior densidade de plantio em comparação à utilizada por Pinto (2017), condução da muda por maior tempo do que este autor, cultivares diferentes, bem como no experimento aqui dissertado haver uma quantidade de fósforo no substrato utilizado disponível ao desenvolvimento inicial das plantas o que não ocorreu no trabalho citado. Já em relação ao diâmetro do caule, o mesmo autor encontrou uma relação quadrática entre as doses fornecidas e o diâmetro, fato também observado no experimento aqui descrito.

Em relação à massa fresca das folhas (MFF) houve diferença significativa na avaliação da regressão para as avaliações realizadas no tempo. As plantas avaliadas aos 22 DAT não apresentaram diferenças em relação as doses de fósforo, sendo que para as outras datas (36, 50 e 64 DAT) adequou-se um regressão quadrática, sendo que o máximo de MFF aos 36 DAT seria

obtido com a dose de 89% de P_2O_5 , aos 50 DAT com 98% de P_2O_5 e aos 64 DAT com 74,5% da dose de P_2O_5 (Figura 17).

Figura 17. Massa fresca das folhas (MFF) do tomateiro grape aos 22, 36, 50 e 64 DAT em relação das doses de P_2O_5

Ao observar o desdobramento dos DAT em cada dose (excetuando a de 0% que não foi obtida significância pelo teste realizado), verifica-se um crescimento linear da massa fresca das folhas (Figura 18). Apesar da dose 0% não ter sido significativa em relação aos DAT, observou-se uma redução na massa das folhas a partir dos 36 DAT (Figura 18). Essa característica, de queda prematura das folhas, é apontada como uma das formas de se observar a deficiência de fósforo em estádios mais tardios de desenvolvimento da planta (SILVA et al., 2006). Nesses estádios, as manchas arroxeadas (principal sintoma da deficiência de fósforo) evoluem para necroses, o que diminui a capacidade fotossintética da folha e consequentemente sua morte.

Figura 18. Massa fresca das folhas (MFF) do tomateiro grape submetido as doses de P_2O_5 em relação aos DAT

Quanto ao crescimento da massa das folhas ao longo do tempo, seu comportamento linear foi também observado por Prado et al. (2011). Esses autores realizaram amostragens da massa das folhas de tomateiros aos 15, 25, 35, 45, 55, 65, 75 e 85 DAT. Sendo que aos 65 DAT, a massa seca das folhas da cultivar Raísa avaliada por eles foi de aproximadamente 33,9 g, valor aproximado ao apurado no trabalho desta dissertação na dose de 100% de P que nesse caso foi de 31,8 g aos 64 DAT.

O valor mais baixo da massa das folhas em relação à outros trabalhos pode estar relacionado com a densidade de plantio do experimento. Peil et al. (2014) avaliando diferentes densidades de plantio com duas variedades de minitomates, observaram que o aumento da densidade de plantio levou à uma diminuição da matéria seca das folhas. A diminuição ocorre pois há maior competição por radiação solar incidente nas plantas, reduzindo a quantidade que cada planta intercepta devido ao sombreamento mútuo. A diminuição da radiação interceptada resulta em uma diminuição da taxa fotossintética individual das plantas, e assim menor crescimento das folhas (PAPADOPOULOS & PARARAJASINGHAM, 1997). Aos 50 DAT, o ápice de massa seca foi na dosagem de 65,5% e aos 64 DAT de 76,61%.

Usando como referência a densidade de plantio aqui apresentada ($4,1 \text{ plantas m}^{-2}$), aos 88 DAT, os autores citados obtiveram aproximadamente 65,6 g de matéria seca das folhas para a cultivar 'Cereja vermelha'. Para a cultivar 'Flavor Top' a massa seca das folhas observada foi de aproximadamente 40 g planta^{-1} .

Figura 19. Massa seca das folhas (MSF) do tomateiro grape aos 22, 36, 50 e 64 DAT em relação das doses de P_2O_5

Em relação às doses, as de 25, 50, 75 e 100 também tiveram significância em relação às datas de realização das amostragens (Figura 20).

Figura 20. Massa seca das folhas (MSF) do tomateiro grape submetido as doses de P₂O₅ em relação aos DAT

A área foliar medida também apresentou significância ao analisar as médias em função das doses, bem como a média da área foliar em função dos dias de avaliação das amostras (Figura 21). Em relação à área foliar, o comportamento da regressão em relação às doses foi melhor ajustado na forma quadrática. Já Martins (2015) observou um comportamento linear da área foliar em relação às doses de P ao analisar mudas de tomate. Outros autores apresentaram

trabalhos em que também houve relação da dose de P fornecida e da área foliar do tomateiro. Silva et al. (2011) obtiveram um acréscimo teórico em área foliar do tomateiro de 4,16 cm² por planta para cada kg ha⁻¹ de P₂O₅ aplicado no solo. Lowe (2007) também observou redução na área foliar de mudas de tomate quando as mesmas eram submetidas a um tratamento com ausência de fósforo.

Figura 21. Área foliar (AF) em relação das doses de P₂O₅ e avaliações no tempo (DAT)

Deve-se avaliar a variação da área foliar das plantas durante seu desenvolvimento, pois através dela pode-se modelar o crescimento e o desenvolvimento das plantas e, por conseguinte, a produtividade total da cultura (BENICASA, 2003). Ao longo dos DAT, ocorreu uma diminuição da área foliar medida, sendo esse fato observado em todas as doses fornecidas. Com o surgimento das flores e dos frutos, os órgãos reprodutivos tornam-se os principais drenos nesse período, explicando tal redução. Decréscimo da área foliar e do IAF no final do ciclo do cultivo também foi observado por Pedó (2012) e Silva et al. (2015) em tomateiro. Outro fator a ser discutido nesse ponto, é que como nesse experimento a área foliar medida utilizava a quarta folha, com a maior emissão de folhas pelas plantas ao passar dos dias, a quarta folha passou a ser aquelas emitidas mais recentemente o que correspondia às de menores tamanhos.

O caule apresentou variação na massa apurada entre as doses fornecidas às plantas, tanto na massa fresca quanto seca (Figura 22), bem como no diâmetro do caule. Quanto à massa fresca do caule (MFC) o máximo ocorreria com a dose de 84,61%, enquanto a massa seca com 90,5% de P₂O₅.

Figura 22. Massa fresca do caule (MFC) e massa seca do caule (MSC) médios (DAT) em relação das doses de P_2O_5

O número de frutos por parcela (NFI) em relação à dose apresentou um comportamento quadrático tendo o ápice no ponto correspondente à dose de 89% (Figura 23). Lembrando que no caso dos frutos, os mesmos passaram a ser coletados aos 50 DAT, tendo então a coleta desta data e aos 64 DAT. Os dados nesses casos são de quatro plantas aos 50 DAT e de duas aos 64 DAT.

Quanto à massa dos frutos, tanto a massa fresca quanto a massa seca apresentaram diferença média em relação as doses (Figura 23). Pinto (2017) também encontrou um comportamento semelhante ao aqui apresentado entre a massa e as doses, tanto para a fresca quanto seca, sendo que na massa fresca com fertirrigação esse autor encontrou como dose ótima 807,69 kg ha⁻¹ de P_2O_5 . Assim como Araújo (2018) em relação às doses, porém avaliando a produção por planta. Em estudos mais antigos, os resultados também foram semelhantes como no trabalho de Novais e Smyth (1999). Marouelli et al. (2015) por outro lado observou em seu estudo que não houve relação entre as doses de fósforo e o número de frutos por planta, em seu estudo o aumento da produtividade em relação às doses foi estritamente dependente do aumento da massa por fruto. Esse fator pode ser explicado devido ao papel do P no enchimento dos frutos; com maior disponibilidade desse nutriente a planta obtém um aumento no tamanho dos frutos. Nos resultados aqui apresentados, além do aumento da massa dos frutos em relação às doses também ocorreu aumento no número de frutos por planta com o aumento das doses.

Figura 23. Número de frutos de tomate (NFT), massa fresca de frutos de tomate (MFFT), massa seca dos frutos de tomate (MSFT) em relação das doses de P₂O₅ e avaliações no tempo (DAT)

Médias seguidas de letras diferentes diferem entre si pelo teste F ao nível de 5% de probabilidade

A análise da massa fresca das raízes apresentou nível significativo tanto para as doses, quanto para as datas após o transplântio (Figura 24). De acordo com as doses, os valores em média da massa fresca das raízes teria seu máximo com 82,6% da dose de P₂O₅.

Figura 24. Massa fresca das raízes (MFR) e massa seca das raízes (MSR) em relação das doses de P₂O₅ e avaliações no tempo (DAT)

Observou-se que com o aumento da dose aplicada houve correspondência com o aumento da massa medida das raízes, na média total do experimento. Pinto (2017) ao avaliar doses de fósforo fornecido tanto via solo quanto por fertirrigação também observou aumento, tanto na massa fresca quanto seca das raízes de tomateiro com o aumento da dose de fósforo fornecida. Outros autores, trabalhando com diferentes cultivos, também observaram um comportamento quadrático da massa das raízes em função das doses, como exemplo Moraes et al. (2006) e Nunes et al. (2014) analisando as raízes de camomila e rabanete respectivamente.

Esse aumento na massa das raízes com o aumento das doses de fósforo, estabelece a relação desse nutriente com o desenvolvimento dessa parte da planta. Segundo Hawkesford et al. (2012) o fósforo também desempenha, além de outras funções, papel no crescimento das raízes, especialmente das raízes secundárias. Assim, maior disponibilidade de P no desenvolvimento inicial das plantas, favorece o crescimento e desenvolvimento das raízes. Esse maior desenvolvimento, principalmente de raízes secundárias, favorece a absorção de fósforo durante o desenvolvimento da planta. Boatwright & Viets (1966) ao estudar o desenvolvimento de raízes secundárias em trigo, demonstraram que quanto mais tempo a planta ficava sem o fornecimento

de P no início de seu desenvolvimento menor era o crescimento das raízes. Por outro lado, se a planta recebia P no início do desenvolvimento e tinha seu fornecimento retirado mais à frente no tempo isso não ocorria. Demonstrando assim, a importância do P no desenvolvimento inicial das raízes nas plantas.

5.3. Análise de clorofila

O valor apurado de clorofila a, b e total também foi significativo na variação em relação às doses bem como com o passar dos dias após o transplântio tendo o valor máximo de clorofila a em 76,21%, de clorofila b em 82,8% e da clorofila total em 78,95% da dose fornecida (Figura 25).

Figura 25. Índices relativos de clorofila (a, b e total) médios (DAT) em relação das doses de P₂O₅

O fósforo não possui relação direta com a quantidade de clorofila, diferentemente do nitrogênio. Mascarenhas (2014) ao analisar a quantidade de clorofila em relação à diferentes soluções nutritivas, em que em cada tratamento foi retirado um nutriente, verificou que a ausência do fósforo foi a que menos impactou a quantidade total de clorofila. Nesse trabalho a ordem dos nutrientes que mais limitaram a quantidade de clorofila foram: N > Mg > Ca = S = Fe = Mn > K > P. A significância observada entre as doses nesse trabalho deve estar relacionada com a maior produção de raízes. Quanto maior a dose de P fornecida, maior a produção de raízes, o que favorece à uma maior absorção de nutrientes. Como citado no trabalho de

Mascarenhas (2014), uma maior disponibilidade de N e Mg favorecem a produção de clorofila, o que explicaria essa diferença.

Figura 26. Índices relativos de clorofila (a, b e total) médios (P_2O_5) em relação as datas de avaliação (DAT)

Schuelter et al. (2003) utilizou diferentes folhas do tomateiro para analisar a variação da quantidade de clorofila com o tempo. Utilizando a quarta folha, como no experimento aqui descrito, ele também encontrou um comportamento quadrático para a regressão da quantidade de clorofila no tempo da cultivar Santa Clara e do F1 (cruzamento entre a cultivar Santa Clara e um mutante).

5.4. Análises de Correlação

Para avaliar a relação entre os fatores de produção das plantas (biorrespostas) como a massa do caule, folhas e raízes com os de produção de frutos, foram calculadas as correlações de Pearson (Tabela 6) e a canônica (Tabela 7). Os valores em vermelho na Tabela 6 são os que tiveram correlação forte ($p > 0,7$). Utilizando a análise de correlação canônica, a relação entre os dois conjuntos de dados teve significância tanto para o primeiro par canônico quanto para o segundo. Porém, o primeiro par teve uma maior correlação entre os dados (0,915). Essa correlação demonstra que os dados medidos do desenvolvimento das plantas possui associação com os dados de produção de tomates, sendo essa relação considerada alta (maior que 0,8). Pelas correlações canônicas nota-se que uma redução dos valores de desenvolvimento das plantas

como a massa das folhas, leva a uma redução de produção, tanto no número de frutos bem como na massa total dos mesmos (valores negativos das cargas canônicas).

Tabela 6. Correlação de Pearson entre as biorrespostas do tomateiro grape

Variáveis*	AF	DC	ALT	MFC	MSC	MFF	MSF	MFR	MSR
AF	1	0,543	0,155	0,414	0,318	0,443	0,360	0,315	0,244
DC	0,543	1	0,070	0,653	0,516	0,631	0,639	0,580	0,525
ALT	0,155	0,070	1	0,405	0,304	0,183	0,143	-0,032	-0,012
MFC	0,414	0,653	0,405	1	0,863	0,910	0,812	0,682	0,552
MSC	0,318	0,516	0,304	0,863	1	0,850	0,791	0,711	0,612
MFF	0,443	0,631	0,183	0,910	0,850	1	0,892	0,728	0,603
MSF	0,360	0,639	0,143	0,812	0,791	0,892	1	0,696	0,584
MFR	0,315	0,580	-0,032	0,682	0,711	0,728	0,696	1	0,918
MSR	0,244	0,525	-0,012	0,552	0,612	0,603	0,584	0,918	1
NFT	0,395	0,669	0,026	0,791	0,764	0,823	0,729	0,699	0,603
MFFT	0,378	0,663	0,071	0,796	0,771	0,794	0,700	0,637	0,527
MSFT	0,356	0,620	0,061	0,771	0,762	0,780	0,699	0,684	0,594

* AF: área foliar; DC: diâmetro do caule; ALT: altura da planta; MFC: massa fresca do caule; MSC: massa seca do caule; MFF: massa fresca das folhas; MSC: massa seca das folhas; MFR: massa fresca das raízes; MSR: massa seca das raízes; NFT: número de frutos de tomate; MFFT: massa fresca dos frutos de tomate; MSFT: massa seca dos frutos do tomate.

Tabela 7. Cargas canônicas do primeiro par canônico

AF	-0,473	NFT	-0,954
DC	-0,766	MFFT	-0,949
ALT	-0,036	MSFT	-0,907
MFC	-0,892		
MSC	-0,856		
MFF	-0,917		
MSF	-0,800		
MFR	-0,708		
MSR	-0,585		

* AF: área foliar; DC: diâmetro do caule; ALT: altura da planta; MFC: massa fresca do caule; MSC: massa seca do caule; MFF: massa fresca das folhas; MSC: massa seca das folhas; MFR: massa fresca das raízes; MSR: massa seca das raízes; NFT: número de frutos de tomate; MFFT: massa fresca dos frutos de tomate; MSFT: massa seca dos frutos do tomate.

Os fatores que exercem maior contribuição para a redução de produção (ou inversamente contribuem no aumento), é a massa fresca do caule e das folhas. O número de frutos, bem como a massa fresca dos mesmos, são mais afetados na relação com as características de desenvolvimento das plantas. É interessante observar que, apesar da raiz exercer importante papel no desenvolvimento inicial dos tomateiros, uma menor formação do caule e das folhas é que acaba por afetar mais a produtividade. Um menor tamanho das plantas também afeta negativamente a produtividade dos tomates, porém essa influência da altura é menor do que os

demais fatores analisados. Coimbra et. al (2000) observaram um comportamento contrário em feijoeiro, onde também através de uma análise por correlação canônica, obteve que com o aumento de altura das plantas ocorria uma menor quantidade de grãos por planta.

Em relação à área foliar, esse parâmetro apresentou uma alta correlação de Pearson com o índice Gn_abaxial (0,936). Muito maior do que os demais parâmetros avaliados na relação com quaisquer dos índices. Devido à isso, a área foliar pôde ser calculada diretamente utilizando-se apenas do índice citado, produzindo o mesmo uma classificação adequada da área. Bem como, usando a regressão dos dados do índice Gn_abaxial em relação à Área Foliar, com a equação da reta (Figura 27) foi possível prever a área foliar da folha utilizando-se o valor do índice como entrada.

Figura 27. Dispersão dos dados do índice Gn_abaxial relacionados a área foliar

Essa alta correlação do índice com a área deve-se à maneira de captação das imagens. No escâner a imagem foi obtida com um fundo branco, o que aumenta o contraste entre a folha e o fundo. No caso do índice Gn, apura-se a quantidade da cor verde refletida em relação aos demais componentes do sistema RGB, assim é um índice que apura essencialmente a quantidade de cor verde da folha. Por isso, essa sensibilidade maior em correlacionar com a área da folha. Porém, o índice utilizando-se a parte abaxial da folha teve correlação ainda maior do que utilizando-se a adaxial da mesma: 0,93 contra 0,91. Comparando a forma de obtenção das imagens, a utilização das imagens obtidas através do escâner tiveram melhor relação com a área foliar do que os obtidos com a câmera. Sendo que no segundo caso, a correlação entre o índice e a área ficou abaixo de 0,7. Novamente, o fundo da imagem pode explicar essa diferença, pois no

caso da câmera o fundo utilizado foi um feltro de cor rosa e não um fundo branco como no caso do escâner.

5.5. Status de P pela Análise de Imagens

Para refinar e diminuir o número de índices selecionados na avaliação da taxa de P nas folhas foi realizada a análise de componentes principais (ACP). Pela ACP, os dois componentes principais explicam 96,45% dos dados. No primeiro componente os maiores autovetores foram: ICVE_adaxial (0,69) e ICVE_abaxial (0,66). Já no segundo componente: Bn_adaxial (-0,51) e Bn_abaxial (-0,5). Em ambos os casos, novamente os índices calculados com imagens escaneadas foram melhores do que com a câmera. O maior controle nos fatores de variação (luz, proximidade entre outros) das imagens utilizando-se o escâner podem explicar essas diferenças.

Os valores positivos do índice ICVE podem estar relacionados com a variação de P na planta. Uma planta com menor quantidade de P, com deficiência, apresenta um escurecimento das folhas. Como descrito por Karcher e Richardson (2003), o ICVE, quanto maior seu valor mais escuro é o tom de verde medido por esse índice. Os valores maiores dos autovetores indicam maior relação entre o índice e o conjunto de dados analisados, o que pode demonstrar que a variação de P foi sensível ao escurecimento das folhas.

Já em relação ao índice Bn, o mesmo mede a quantidade da banda azul refletida pelas folhas em relação ao total do RGB. O valor negativo de Bn observado no segundo componente principal, pode ser explicado com a diminuição da quantidade de P. Uma redução do valor desse nutriente nas folhas, leva à um arroxamento das mesmas. A cor roxa possui em sua composição maior valor de B refletido, o que explicaria que quando o valor de P está adequado ocorreria diminuição do valor do índice Bn e vice-versa. No entanto, convém destacar que outros fatores podem alterar a cor das folhas, como por exemplo mudanças de temperatura. Por isso, para a avaliação das imagens é necessário informações do histórico das condições de cultivo, a fim de eliminar esses fatores na avaliação nutricional por imagens.

Com esses índices e utilizando-se dos métodos de classificação descritos, foram obtidas diferentes taxas de classificação para as categorias desejadas. As categorias estabelecidas são demonstradas na tabela 8, de acordo com o boletim 215 (TRANI et al., 2015).

Tabela 8. Categorias de classificação dos parâmetros

	P (g kg⁻¹)
Categoria I	< 4
Categoria II	4 - 8

Fonte: Trani et al., 2015

Em relação aos métodos, as taxas de acerto em relação aos métodos são descritos na tabela 9.

Tabela 9. Taxa de acerto (%) dos métodos de classificação

	P
Euclidiana	61,25
Manhattan	61,25
K-Médias	48,25

Quando se utiliza a distância Manhattan (Figura 26), o efeito de uma grande diferença entre uma das dimensões de um elemento é minimizado, já que a mesma não é elevada ao quadrado, por isso seu desempenho pode ser melhor em relação à distância euclidiana. Silva & Cintra (2015) comparando diferentes métodos de reconhecimento de rostos em imagens observaram melhor desempenho quando utilizando a distância Manhattan em relação à Euclidiana. Diniz, Silva e Alencar (2016) também em um trabalho de reconhecimento facial analisaram que a distância Manhatttan obteve maior acurácia sobre a euclidiana, porém ambas tiveram desempenho menos eficaz em relação à distância euclidiana normalizada. Johnson e Wichern (1988) recomendam que para um número grande de dados a serem analisados seja utilizado o método k-médias.

Em relação às taxas de acerto das classificações, os resultados com esses índices ficaram abaixo de 70% de acerto, seria necessário então a realização de outros métodos de classificação mais precisos. Como comparação, Liu et al. (2010) construíram diversas redes neurais artificiais utilizando quatro índices espectrais como estrutura de entrada para estimar a concentração de clorofila em arroz (*Oryza sativa*), sendo que a melhor correlação obtida por eles foi de 90,1%. Já Vesali et al. (2015) analisando uma rede neural para determinar a quantidade de clorofila em folhas de milho obteve um R^2 de 0,82 entre os dados da rede e os valores de clorofila na folha.

Figura 28. Dendrograma da classificação dos grupos para o valor de P nas folhas do minomateiro grape através da distância Manhattan

Portanto, com esses quatro índices escolhidos procedeu-se ao treinamento da rede neural desenvolvida. Utilizando-se de 2/3 (53) das 80 amostras, a rede obteve uma taxa de acerto de 80,77% no treinamento, essa taxa sendo obtida após 10 interações do sistema com uma performance de 0,24 (Erro quadrático médio). Nessa fase, a taxa de acertos passou a ser maior com os dados obtidos após os 36 DAT. Isso indica que uma análise das folhas a partir desse período de desenvolvimento da planta já satisfaria a classificação de P nas folhas. A taxa de acerto aos 22 DAT foi de 69%, enquanto aos 36 DAT foi de 76,9, mesmo valor obtido aos 50 DAT.

Para validação da rede, foram selecionadas 20 amostras entre as 27 restantes. Nessa fase a taxa de acertos foi de 90% para classificar nas categorias desejadas, com uma performance de 1,45 (EQM). Ayala-Silva e Beyl (2002) utilizando as reflectâncias das folhas nos comprimentos de onda de 401 nm (violeta) e 770 nm (vermelho) como a camada de entrada e as concentrações quantificadas de nutrientes de cada elemento como a camada de saída de uma RNA, obtiveram as seguintes taxas de acerto: 90,9% para N, 100% para P, 90% para K e 100% para Ca. Yanli et al. (2015) utilizando imagens hiperspectrais obtiveram melhor resultado para predição da taxa de fósforo quando utilizaram a parte adaxial das folhas de laranjeira.

Figura 29. Valores de P determinados em laboratório (P lab) e os preditos pela RNA

Os valores de P nas folhas previsto pela RNA em relação aos valores reais (Figura 27) apresentou um erro percentil médio na fase de validação da rede de 64,3%, ou seja, o valor de saída da rede tinha um acréscimo ou decréscimo de 64,3% de seu valor real. Como exemplo, se o valor real de P era de 1 g kg⁻¹, o valor de saída da rede foi em média, 1,63 ou 0,37 g kg⁻¹. Isso em média, na figura 30 é demonstrado a variação do erro percentil em cada amostra utilizada na validação da rede. Entre essas amostras o erro variou de 6% a 413%. Das 20 amostras, quatro tiveram erros com uma variação em relação ao valor real acima de 100%, três entre 50 e 100% e 13 abaixo de 50% (sendo que seis tiveram variação abaixo de 6%). Um número maior de amostras para a fase de treinamento da rede pode contribuir em uma diminuição do erro em relação ao valor real.

Figura 30. Erro percentil dos valores de saída da RNA em relação aos valores de P

Pela tabela 10 nota-se que os 10% de erro da RNA foram em amostras classificadas em uma categoria abaixo da real. Ou seja, se considerarmos a categoria II como a faixa ideal de nutrientes, os dois resultados foram falsos positivos para nutrição deficiente. Não houve ocorrência de falso negativo, o mesmo ocorrendo na fase de treinamento da rede, apontar como dentro da categoria II uma amostra da categoria I. Quando utilizada a classificação pelos métodos de agrupamento os falsos positivos foram de: 17,5% para a distância Euclidiana e Manhattan e de 15% para K-média. Porém, para falsos negativos as taxas foram maiores, de 21,25% para Euclidiana e Manhattan, bem como de 36,25% para K-média. Os erros de falso negativo são piores para a classificação, pois nesse caso classifica-se como dentro da faixa ideal um valor que não se encontra ideal.

Tabela 10. Teores de fósforo (P) nas folhas de minitomateiro grape, categoria pelo IAC e categoria pela rede neural artificial (RNA).

Amostra	P (g kg ⁻¹)	Categoria IAC	Categoria RNA	ICVE* Adaxial	ICVE* Abaxial	Bn* Adaxial	Bn* Abaxial
A2	2,44	I	I	0,08050	0,06200	0,320362	0,318809
A4	2,09	I	I	0,06725	0,06025	0,321560	0,320124
A8	3,22	I	I	0,06725	0,06450	0,321390	0,319651
A10	4,12	II	I	0,06100	0,06125	0,318839	0,318476
A14	4,69	II	I	0,06733	0,06125	0,317137	0,317104
A34	3,87	I	I	0,06900	0,06967	0,329427	0,327709
A32	3,67	I	I	0,06950	0,06675	0,324710	0,323211
A30	3,09	I	I	0,06982	0,06625	0,329028	0,327407
A28	1,63	I	I	0,07175	0,06275	0,324751	0,322915
A22	1,47	I	I	0,06225	0,05250	0,330660	0,330256
A42	1,55	I	I	0,04800	0,04400	0,326060	0,325263
A54	3,09	I	I	0,08175	0,08075	0,325210	0,323524
A52	3,69	I	I	0,04800	0,04700	0,325773	0,325553
A48	3,71	I	I	0,05950	0,05450	0,325914	0,325358
A50	3,49	I	I	0,05300	0,04550	0,326633	0,325899
A62	0,51	I	I	0,04025	0,04115	0,324280	0,324438
A66	1,21	I	I	0,04060	0,03805	0,327338	0,326734
A72	1,30	I	I	0,02963	0,02343	0,328255	0,327533
A70	1,55	I	I	0,03225	0,02925	0,327459	0,327119
A74	1,32	I	I	0,05647	0,04897	0,326464	0,325427

* Índices vegetativos: ICVE = índice de cor verde escuro; Bn - índice normalizado B (blue=azul)

Quanto às faixas de cada categoria de classificação, para a cultivar de minitomate grape aqui estudada propõe-se uma nova faixa de classificação. Como pela análise canônica, a massa fresca de folhas e caule apresentaram maior relação com a produção dos frutos, para esses

parâmetros a dose ideal de P_2O_5 foi de 82,18 e 84,61% respectivamente e para o número de frutos produzido foi de 89,09%, esses valores das doses correspondem à uma faixa de P na folha que vai de 3,36 a 3,39 g kg⁻¹. Ou seja, essa faixa de P garantiu um desenvolvimento ótimo dos órgãos da planta que mais se relacionaram com a produção de frutos. Com isso, propõe-se que a faixa a ser considerada de P nas folhas não seja, como citado na literatura, de 0-4 e 4-8, mas sim como valores menores que 3,3 e maiores que o mesmo, sendo os valores maiores aqueles considerados ideais.

Com essas novas categorias, os dados obtidos com a RNA passaram a ter uma taxa de 60% de acertos nas categorias, 30% de erros do tipo falso negativo (classificando como categoria II um dado que seria categoria I) e 10% de falso positivo. A diminuição da taxa de acerto da rede deve-se à forma de treinamento da mesma, bem como da quantidade de amostras disponibilizadas. Quanto à forma, para treinar (bem como depois para validar a mesma) a saída da rede não era a categoria desejada e sim o valor de P que depois foi categorizado. Ao não se definir uma categoria e sim obter-se uma previsão do valor de P deixa-se em aberto uma maior variação dos dados. Porém, essa decisão foi tomada para que se testasse a sensibilidade da rede em prever o valor de P na folha. Nesse quesito, verificou-se que para atingir o objetivo de prever o valor de P, uma quantidade maior de amostras na fase de treinamento pode aumentar a sensibilidade da rede em prever o valor de P.

Ao mudar o valor das faixas a serem categorizadas, o erro de algumas amostras (valor de P na saída da rede em relação ao valor real de P) foi superior à diferença da nova categorização, o que explica o aumento na quantidade de amostras de uma categoria que foram classificadas como de outra.

6. CONCLUSÕES

A dose de 100% de P_2O_5 utilizada no experimento foi capaz de suprir as necessidades nutricionais da planta, e a subdoses permitiram obter imagens que se relacionaram com diferentes teores de P na folha do minitomateiro grape estudado. Não houve variação significativa na diagnose nutricional do minitomateiro para os demais nutrientes fornecidos via solução nutritiva.

A análise do desenvolvimento da planta (biorrespostas) permitiu concluir que a dose 100% de P_2O_5 utilizada no experimento foi suficiente para suprir a demanda nutricional do minitomateiro. E, verificou-se que na dosagem de 100% de P_2O_5 o teor de P nas folhas aos 64 DAT ficou abaixo de $4,0 \text{ g kg}^{-1}$, sendo sugerida nova classificação de teores adequado de P na folha para a cultivar de minitomateiro *grape* estudada.

Aos 64 dias após o transplantio (DAT) foi observada a maior queda nos teores de fósforo nas folhas (ocasião da colheita do primeiro fruto maduro), com menores diferenças foliares em relação a doses de P_2O_5 fornecidas pela solução nutritiva. Propõe-se, para a cultivar estudada, que a diagnose foliar seja feita em torno dos 50 DAT com os frutos ainda não maduros.

Os índices vegetativos obtidos pela análise de imagem e selecionados pela análise de componentes principais (ICVE e Bn, tanto da parte abaxial quanto adaxial) podem ser utilizados para estimar a diagnose foliar de P na cultivar de minitomate grape. A avaliação dos índices vegetativos indicou que a obtenção de imagens com o escâner é mais adequado do que com a câmera fotográfica.

A rede neural, quando utilizados os valores de referência da literatura para classificação, possibilitou a taxa de acerto de 90%.

REFERÊNCIAS

- ABH. (2012) Tomate Cereja: Sabor e Rentabilidade no mesmo Produto. Disponível em: <http://www.abhorticultura.com.br/News/Default.asp?id=4864>. Acesso em: 20 de agosto de 2018.
- Almeida C, Dal Fabbro IM. (2015) Tomato fruit (*Lycopersicon esculentum* Mill) maturity study based on sensorial analysis and instrumented color determination. 7th International Conference on Information and Communication Technologies in Agriculture, Food and Environment.
- Alvarenga MAR. (2004) Tomate: produção em campo, em casa de vegetação e em hidroponia. **Lavras: UFLA**, p. 391.
- Alvarenga MAR. (2013) Tomate: produção em campo, em casa de vegetação e em hidroponia. **Lavras: UFLA**, p. 455.
- Araujo, VR. Eficiência de adubação fosfatada no cultivo do tomateiro. 2018. 63 f. **Dissertação (Mestrado)** - Curso de Agronomia, Unesp, Botucatu-SP.
- Barbieri Junior EB, Valéria ROPR, Silva RVMM, Ribeiro RC, e Morenz MJF. (2012) – Um novo clorofilômetro para estimar os teores de clorofila em folhas do capim Tifton 85. **Ciência Rural**, vol. 42, n. 12, p. 2242-2245.
- Benincasa, MMP. Análise de crescimento de plantas: noções básicas. Jaboticabal, SP: **FUNEP**, 2003. 42 p
- Bhatia PK. (2008) Computer Graphics. 2. ed. **International Pvt. Ltd.** 400 p. ISBN 9788189866730.
- Blackmer AM, Schepers JS (1996). Using DGPS to improve corn production and water quality. **GPS World**, v.2, n.1, p.44-52.
- Boatwright GO, Viets Jr. FG. (1966) Phosphorus absorption during various growth stages of spring wheat and intermediate wheatgrass. **Agronomy Journal**, v.58, p.185-188.
- Boletim Técnico 215. (2015) Calagem e adubação do tomate de mesa. **Instituto Agrônomo de Campinas (IAC)**: Campinas, 41 p.
- Brainard D. (2003). Color appearance and color difference specification. In S. Shevell (Ed.), **The science of color**, (pp. 191-216). Oxford: Optical Society of America.
- Bussab WO, Morettin PA. (2013). Estatística Básica. 8a Edição. **Atual Editora**: São Paulo.
- Calheiros DF, Oliveira MD, Dolores, EFG (2006). Poluição por pesticidas, nutrientes e material em suspensão nos rios formadores do Pantanal Matogrossense. Corumbá, MS: **Embrapa Pantanal**, 2006. 4p. ADM – Artigo de Divulgação na Mídia, n. 096.
- Campenhausem CA. (2001). Preliminary form of 3-dimensional color systems in Rubens' illustrated textbook of Franciscus Aguilonius (1613). **Medizinhistorisches Journal**, 36, 267-307.
- Carvalho LA, Tessarioli Neto J, (2005). Produtividade de tomate em ambiente protegido, em função do espaçamento número de ramos por planta. **Horticultura Brasileira** 23: 986-989.
- Chen P, Haboudane D, Tremblay N, Wang J, Vigneault P, Li B. (2010) New spectral indicator assessing the efficiency of crop nitrogen treatment in corn and wheat. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, p. 1987–1997.
- Cockshull KE, Graves CJ, Cave CRJ. (1992). The influence of shading on yield of glasshouse tomatoes. **Journal of Horticulture Science** 67: 11-24.
- Coimbra JLM et. al. (2000) Correlações Canônicas: II – análise do rendimento de grãos de feijão e seus componentes. **Ciência Rural**. Santa Maria, v.30, n1, p.31-35.

- Cruz CD, Regazzi AJ (1994). Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético. **Viçosa: UFV**, 390p.
- Cunha, AHN. et al. (2014) Sweet grape mini tomato grown in culture substrates and effluent with nutrient complementation. **Eng. Agríc.**, Jaboticabal, v. 34, n. 4, p. 707-715.
- Dossa D, Fuchs F. (2017) Tomate: análise técnico-econômica e os principais indicadores da produção nos mercados mundial, brasileiro e paranaense. Curitiba - PR: Ceasa - PR.
- Diezma B, Lleó L, Roger JM, Herrero-Langreo A, Lunadei L, Ruizaltisent M. (2013) Examination of the quality of spinach leaves using hyperspectral imaging. **Postharvest Biology and Technology**, v. 85, p. 8–17.
- Diniz AD, Silva TR, Alencar FES. (2016) Um estudo empírico de um sistema de reconhecimento facial utilizando o classificador KNN. **Revista Brasileira de Computação Aplicada** (ISSN 2176-6649), Passo Fundo, v. 8, n. 1, p. 50-63.
- Elmasry G, Wang N, Elsayed A, Ngad M. (2007) Hyperspectral imaging for non destructive determination of some quality attributes for strawberry. **Journal of Food Engineering**, v. 81, n. 1, p. 98-107.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira De Pesquisa Agropecuária. (2006) Cultivo de Tomate para Industrialização. **Brasília**. Sistema de produção, 2. Disponível em: http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Tomate/TomateIndustrial_2ed/composicao.htm
- EMBRAPA - Empresa Brasileira De Pesquisa Agropecuária. (2011). Circular Técnica 33: Produção de tomate em substrato de fibra de coco. **Brasília**.
- Epiphany JCN, Gleriani JM, Formaggio AR, Rudorff BFT (1996) Índices de vegetação no sensoriamento remoto da cultura do feijão. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v. 31, n. 6, p. 445-454.
- Espinoza W, (2001) Manual de produção de tomate industrial no Vale do São Francisco, **Brasília – DF**, 301p.
- Faquin V. (2005) Nutrição de plantas. **Lavras: UFLA/FAEPE**, 183p.
- Felisberto PAC. et al. (2016). Índices de cor da folha para monitoramento nutricional de nitrogênio em plantas de pimentão. **Científica (Brasil)** 44(2):207-216.
- Fernandes et al. (1975) Nutrição mineral de hortaliças. XXVII. Absorção de nutrientes pelo tomateiro (*Lycopersicon esculentum* Mill.) em cultivo rasteiro. **Anais da E.S.A “Luiz de Queiroz”**, USP, Piracicaba, v.32, p.595-608.
- Ferreira DF, (2011). Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n.6, p. 1039-1042.
- Ferri CP (2002). Utilização da reflectância espectral para estimativa de pigmentos fotossintéticos em dosséis de soja [Glycine max (L.) Merrill]. **São José dos Campos: INPE/MCT**. 173p. Tese Doutorado
- Freitas A, (2016). A invenção do tomate-cereja e a identidade nacional de Israel. Publicada no **Nexo Jornal**. Disponível em: <<https://www.nexojornal.com.br/expresso/2016/06/18/A-invencao-do-tomate-cereja-e-a-identidade-nacional-de-Israel>>. Acesso em: 10 maio 2018.
- Filgueira FAR, (2008) Novo Manual de Olericultura: agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças. 3. ed: **Viçosa: UFV**, p. 412.
- Fischer E. (1999). Colour order systems in art and science. Disponível em: <http://www.colorsystm.com>
- Fontes PCR, Silva DJH (2002). Produção de tomate de mesa. Viçosa: Editora Aprenda Fácil. 193p.
- Gage, J. (2001). Colour and culture: Practice and meaning from antiquity to abstraction. **London: Thames & Hudson**.
- Gianquinto G, Orsini F, Fecondini M, Mezzetti M, Sambo P, Bona SA. (2011) methodological approach for defining spectral indices for assessing tomato nitrogen status and yield. **European Journal of Agronomy**, v. 35, p. 135–143.

- Gitelson AA, Kaufman Y, Merzlyak, M. (1996). Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. **Remote Sensing of Environment**, 58, 289 – 298.
- Gitelson AA, Gritz Y, Merzlyak MN (2003). Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves. **Journal of Plant Physiology** 160: 271-282.
- Godvinje J, Coleman WJ. (1990) How plants make oxygen. *Sci. Am.* v. 262, p. 50-58.
- Gonçalves AL, (1995) Substratos para produção de mudas de plantas ornamentais. In: Minami, K. Produção de mudas de alta qualidade em horticultura. **São Paulo: T.A .Queiroz.** 128p.
- Grant CA, Flaten DN, Tomasiewicz DJ, Sheppard SC, (2001). A importância do fósforo no desenvolvimento inicial da planta. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, Instituto Potafós, n. 95.
- Guimarães MA, Silva DJH, Fontes PCR, Caliman FRB, Loos RA, Stringheta PC, (2007). Produção e sabor dos frutos de tomateiro submetidos à poda apical e de cachos florais. **Horticultura Brasileira** 25: 265-269.
- Hagan MT, Demuth HB, Beale MH. (2014) Neural network design. [S.l.]: Martin Hagan.
- Harborne JB, E Grayer RJ. (1988) The anthocyanins. In: The flavonoids: advances in research since 1980. **Chapman & Hall**, p. 1-20. London.
- Hawkesford M, W Horst, T Kichey, H Lambers, J Schjoerring, I Skrumsager Moller, P White. (2012). Function of macronutrients. p. 135-178. In Marschner, P. (ed.) Marschner's mineral nutrition. 3rd ed. **Elsevier Ltd.**, Oxford, UK.
- Haykin, S.(1999) Neural networks: a comprehensive foundation. 2 nd ed. Upper Saddle River: Prentice Hall.
- Haykin, S. (2001) Redes neurais: princípios e prática. trad. Paulo Martins Engel. - 2.ed. - Porto Alegre: Bookman.
- Holcman E. (2009) Microclima e produção de tomate tipo cereja em ambientes protegidos com diferentes coberturas plásticas. **Dissertação de Mestrado em Ciências**—Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. Piracicaba, 128 p.
- IBGE- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Levantamento sistemático da produção agrícola. Rio de Janeiro, 2018.
- Jaeger W. (1984). Principles of order in the color systems of the 17th century. **Klinische Monatsblätter für Augenheilkunde.**, 184(4), 321-325.
- Jensen, JR (1949). Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres / tradução José Carlos Neves Epiphany et al. **São José dos Campos.** SP. 2009.
- Jones HG, Vaughan RA. (2010) Remote sensing of vegetation: principles, techniques, and applications. **Oxford**, UK. 384p.
- Johnson RA, Wichern DW. (1988) Applied Multivariate Statistical Analysis. Third Edition, **Prentice-Hall**.
- Karcher DE, Richardson MD. (2003) Quantifying turfgrass color using digital image analysis. **Crop Science**, v. 43, p. 943-951.
- Khatchatourian O, Padilha FRR. (2008) Reconhecimento de variedades de soja por meio do processamento de imagens digitais usando redes neurais artificiais. **Eng. Agríc.**, Jaboticabal, v.28, n.4, p.759-769.
- Kitchen NR, Goulding KWT, Shanahan JF. (2008) Proven practices and innovative technologies for on-farm crop nitrogen management. In: Hatfield, J.L., and Follett, R.F. ,editors, **Nitrogen in the environment.** **Elsevier Science Publ.**, Amsterdam. p.483–517.

- Kluge RA. (2004) LCB - 311, Fisiologia vegetal: apontamentos de aulas teóricas de fotossíntese. **ESALQ/USP**. Disponível em Internet http://orion.cpa.unicamp.br/sbfv/arquivos/aulas/gradOl/06_fotoquimica_da_fotossintese/fotossinteseKluge
- Kuehni R. & Stanziola R. (2002). Francis Glisson's color specification system of 1677. **Color Research and Application**, 27, 15-19.
- Li J, Rao X, Ying Y. (2011) Detection of common defects on oranges using hyperspectral reflectance imaging. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 78, p. 38–48.
- Linhares MMA. et al. (2014) Vant's aplicados ao monitoramento da evolução vegetativa de culturas agrícolas. In: Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão- CONBAP 2014, 10., 2014, São Pedro - Sp. **Anais....** São Pedro - Sp: Sbea, p. 1 - 8.
- López OP, Jiménez AR, Vargas FD. et al. (2000) Natural pigments: carotenoids, anthocyanins, and betalains – characteristics, biosynthesis, processing, and stability, **Critical Reviews Food Science Nutrition**, v.40, n.3, p.173-289.
- Lowe TR. (2007) Germinação, vigor de sementes e crescimento de plântulas de tomateiro sob diferentes condições nutricionais. 2007. 37 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Fisiologia Vegetal, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas – Rs.
- Lyra, WS et al . (2010) Classificação periódica: um exemplo didático para ensinar análise de componentes principais. **Quím. Nova**, São Paulo , v. 33, n. 7, p. 1594-1597.
- Machado AQ, Alvarenga MAR, Florentino CET, (2007). Produção de tomate italiano (saladete) sob diferentes densidades de plantio e sistemas de poda visando ao consumo in natura. **Horticultura Brasileira** 25: 149-153
- Malavolta E, Vitti GC, Oliveira AS. (1989) Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fósforo. 201p.
- Malavolta E, Vitti GC, Oliveira SA. (1997) Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. **Piracicaba: Potafós**. 319p
- Marouelli WA et al . (2015) Frações ótimas da adubação com fósforo no pré-plantio e na fertirrigação por gotejamento de tomateiro. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília , v. 50, n. 10, p. 949-957.
- Marques Filho O, Vieira Neto H. (1999) Processamento digital de imagens – Brasport.
- Martins, BNM. (2015) Doses de fósforo na produção das mudas e sua influência na produção e qualidade de tomate. 2015. 67 f. **Dissertação (Mestrado)** - Curso de Agronomia (horticultura), Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp - Campus de Botucatu, Botucatu-sp.
- Martins, APL e Reissmann, CB (2007) - Material vegetal e as rotinas laboratoriais nos procedimentos químico-analíticos. **Scientia Agraria**, vol. 8, n. 1, p. 1-17.
- Mascarenhas, YS. (2014) Diagnóstico por subtração de nutrientes em mudas de tomate para processamento industrial. 2014. 82 f. **Dissertação (Mestrado)** - Curso de Agronomia, Universidade Federal de Goiás, Goiânia-GO.
- Matsunaga VY. (2012) Curso de redes neurais utilizando o matlab. Apostila. Belém – PA .22 p. Disponível em: <http://www.muriloleal.com.br/visao/repositorio/centec/eai/ia//REDES%20NEURAS%20-%20APOSTILA.pdf>
- Melo NC, Souza LC De, Silva VFA, Gomes RF, Oliveira Neto CF. De, Costa DLP, (2014). Cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum*) hidropônico sob diferentes níveis de fósforo e potássio em solução nutritiva. **Agroecossistemas**, Belém, PA, v. 6, n. 1, p. 10-16.

- Mendoza F, Lu R. (2015). Basics of image analysis. In: Park, B., Lu, R., editors. Hyperspectral Imaging Technology In: **Food and Agriculture**. New York, NY: Springer.
- Moraes TC, Vieira MC, Heredia CNA, Teixeira IR, Ramos MBM. (2006) Produção de biomassa e teor de óleos essenciais da camomila em função das adubações com fósforo e nitrogênio. **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais**, p.120 -125.
- Moreira MA. (2001) Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação. São José dos Campos: INPE, 208 p.
- Motomiya AVA, Molin JP, Chiavegato ED. (2009) Utilização de sensor óptico ativo para detectar deficiência foliar de nitrogênio em algodoeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.13, p.137-145.
- Naika S, Jeude JVL De, Goffau M De, Hilmi M, Dam BV. (2006) A cultura do tomate: produção, processamento e comercialização. **Agrodok 17**, 104 p.
- Nogueira IDB. (2010) Correlation between quality of life and functional capacity in cardiac failure. **Arquivos brasileiros de cardiologia**, v. 95, n. 2, p. 238-243.
- Novais RF, Smyth TJ. (1999) Fósforo em solo e planta em condições tropicais. **Viçosa: Universidade Federal de Viçosa**, Departamento de Solos, 399p.
- Nunes JAS, Silva EMB, Moreira JCF (2014). Produção de rabanete submetido à adubação fosfatada. **Revista do Centro Universitário de Pato de Minas**, Pato de Minas, MG, v.5, n.1, p. 33-43.
- Pacumbaba Jr RO, Beyl C.A. (2011) Changes in hyperspectral reflectance signatures of lettuce leaves in response to macronutrient deficiencies. **Advances in Space Research**, v. 48, p. 32-42.
- Papadopoulos AP, Pararajasinghams,(1997). The influence of plant spacing on light interception and use in greenhouse tomato (*Lycopersicon esculentum*): A review. **Scientia Horticulturae** 69: 1-29.
- Pedo T. (2012) Crescimento e produtividade qualitativa de tomateiro submetido à enxertia. 2012. 60p. **Dissertação** (Mestre em Agronomia), Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.
- Peil RMN, Galvez JL. (2005). Reparto de materia seca como factor determinante de la producción de las hortalizas de fruto cultivadas em invernadero. **Revista Brasileira Agrociência** 11: 05-11.
- Peil RMN, Albulquerque Neto AAR; Rombaldi CV. (2014). Densidade de plantio e genótipos de tomateiro cereja em sistema fechado de cultivo em substrato. **Horticultura Brasileira** 32: 234-240.
- Peralta IE, Knapp S, Spooner DM, (2006) Nomenclature for wild and cultivated tomatoes. **Tomato Genetics Cooperative Report**, Flórida, v.56, p. 6-12.
- Pimentel GF. (1985) *Curso de Estatística Experimental*. São Paulo: Nobel. 467 p.
- Pinto, UR C. (2017) Características produtivas de tomate cereja em função da aplicação de fósforo via solo e fertirrigação em cultivo protegido. 62 f. **Dissertação (Mestrado)** - Curso de Programa de Pós-graduação em Irrigação no Cerrado, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Ceres, Ceres-GO.
- Prado RM, Santos VH, Gondim ARO, Alves AU, Filho ABC e Correia MAR. (2011). Crescimento e marcha de absorção de nutrientes em tomateiro cultivar Raísa cultivado em sistema hidropônico. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 32, p. 29-30.
- Purcell LC, Siddons UG, Karcher DE, and RL. Rorie. (2015). System and method of inseason nitrogen measurement and fertilization of non-leguminous crops from digital image analysis. **Patent Application Publication**. US 9117140 B2.
- Purquerio LFV, Tivelli SW, (2006). Manejo do ambiente em cultivo protegido. Manual técnico de orientação: projeto hortalimento. São Paulo: **Codeagro**. p. 15-29. Disponível em: <http://www.iac.sp.gov.br>.

- Purquerio LFV, Santos FFB e Factor TL. (2016). Nutrient Uptake by Tomatoes 'Dominador' 'Serato' Grown in São Paulo State, Brazil. Artigo aceito para publicação. **Acta Horticulturae**
- Raven PH, Evert RF, Eichhorn SE. Biologia vegetal. (2010) 7ed. Rio de Janeiro: **Guanabara Koogan**. 830 p.
- Reis LS, Souza JL, Azevedo CAV. De, (2009) Evapotranspiração e coeficiente de cultivo do tomate caqui cultivado em ambiente protegido. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.13, p.289-296.
- Ritter, G et al. (2018) Rooting of Tineke and Natal Briar rose stem cuttings in different substrates. *Cienc. Rural*, Santa Maria, v. 48, n. 8, e20180117.
- Rocha MQ, Peil RMN, Cogo CM, (2010). Rendimento do tomate cereja em função do cacho foral e da concentração de nutrientes em hidroponia. **Horticultura Brasileira** 28: 466-471.
- Rocha MS, (2010) Irrigação por gotejamento de tomate de mesa com efluente de abatedouro de bovinos. **Dissertação Mestrado em Engenharia Agrícola**, Universidade Estadual de Goiás, Anápolis. 110p.
- Romano MR. (2001) Análise de crescimento, produção de biomassa, fotossíntese, e biossíntese de aminoácidos em plantas transgênicas de tabaco (*Nicotiana tabacum* L.) que expressam o gene *Lhcb1*2* de ervilha. 66f.
- Dissertação** (Mestrado em Ciências, área de concentração: Fisiologia e Bioquímica de plantas) - Esalq/USP.
- Rorie RL, LC Purcell, DE. Karcher, AC King, MC Marsh, and DE Longer. (2011a). Association of "greenness" in corn with yield and leaf nitrogen concentration. **CropSci**. 51:2174–2180.
- Rorie RL, LC Purcell, M Mozaffari, DE Karcher, AC King, MC Marsh, and DE Longer. (2011b). Association of "greenness" in corn with yield and leaf nitrogen concentration. **Agron.J**. 103: 529-535.
- Rousse JW, Haas RH, Schell JA, Deering DW. (1973) Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. In: **Proceeding of ERTS-1 Symposium**. NASA, United States, n. 3. p. 309-317.
- Russ JC. The Image Processing Handbook. (2007) 5. ed. CRC **Handbook Published in Cooperation with IEEE Press**. 817 p. ISBN 978-0849325168.
- Russel S, Norvig P. (2010) Artificial intelligence: A modern Approach. New Jersey: Pearson Education, Inc.
- Shanahan, JF. et al. Responsive in-season nitrogen management for cereals. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.61, n.1, p.51-62, 2008. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2007.06.006>>.
- Silva AL; Cintra, ME. (2015) Reconhecimento de padrões faciais: Um estudo. XII Encontro Nacional de Inteligência Artificial e Computacional (ENIAC), Natal - RN, p.224-231.
- Silva EC, Miranda JRP, Alvarenga MAR, (2001). Concentração de nutrientes e produção do tomateiro podado e adensado em função do uso de fósforo, de gesso e de fontes de nitrogênio. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 19, n. 1, p. 64-69.
- Silva JÁ, Müller JJV, Prando HF. (1992). Poda de alta densidade de plantio de tomate. **Agropecuária Catarinense** 5: 57-61.
- Silva, J. B. C. et al. 2006, Cultivo de tomate para industrialização. Disponível em: https://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Tomate/TomateIndustrial_2ed/deficiencias.htm
Acesso em: 06 jul. 2018.
- Silva PV, Rodrigues AF, Arruda Filho NT de, Oliveira FA de. (2011) Efeito da aplicação de calcário e de fósforo sobre o crescimento e desenvolvimento do tomate. **Revista Verde**, v.6, n.4, p.65-69.
- Silva LFM, Silva CJ, Silva CA, Silva NEP, Freitas CA, Golynski, A. (2015) Área foliar e índice de área foliar de plantas de tomateiro em função de níveis de reposição da evapotranspiração da cultura. In: XXV CONIRD – Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem, UFS São Cristóvão/SE. **Anais...Sergipe: XXV CONIRD**, 2015, CD-ROM

- Solari F. (2006) Developing a crop based strategy for on-the-go nitrogen management in irrigated cornfields. 157p. **Thesis (PhD)** – University of Nebraska, Lincoln.
- Souza ER, Melo HF, Almeida BG, Melo DVM. (2013). Comparação de métodos de extração da solução do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.17, n.14, p.510-517.
- Souza LF, Souza CHE, Machado VJ, Caixeta CG, Ribeiro VJ, Castro JS. (2013) Disponibilidade de P em latossolo argiloso após incubação de doses de superfosfato triplo revestido com polímeros, Patos de Minas – MG: **Universidade de Patos de Minas (UNIPAM)**, p 58 – 70.
- Spooner DM, Peralta IE, Knapp S. (2005) Comparison of AFLPs with other markers for phylogenetic inference in wild tomatoes [Solanum L. section Lycopersicon (Mill.) Wettst.]. **Taxon, Logroño**, v. 54, n.1, p. 43-61.
- Steidle Neto AJ, Grossi JAS, Pinto FAC. (2009) Postharvest shape characterization of calla lily flowers using digital imaging. **Israel Journal of Plant Sciences**, v. 57, p.421-428.
- Streck NA, Buriol GA, Schneider FM. (1996). Efeito da densidade de plantas sobre a produtividade do tomateiro cultivado em estufa de plástico. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 31: 105-112.
- Streit MN. et al. (2005) As clorofilas. **Ciência Rural**, v.35, n.3, p.748-755. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0103-84782005000300043&script=sci_arttext>.
- Taiz L, Ziegler E. (2004) **Fisiologia vegetal**. 3.ed. Porto Alegre : Artmed. p.693. (Trad .SANTARÉM E.R. et al.).
- Taiz L, Ziegler E. (2009) **Fisiologia vegetal**. 3.ed. Porto Alegre : Artmed. p.819.
- Trani, PE et al. (2015) **Calagem e adubação do tomate de mesa**. Boletim Técnico IAC 215. Campinas: Instituto Agrônômico, 35p.
- Vesali F et al. (2015) Development of an android app to estimate chlorophyll content of corn leaves based on contact imaging. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 116, p. 211–220.
- Vieira G. (1996) Gap dynamics in managed Amazonian forest: Structural and ecophysiological aspects. 162f. **Tese** (Doutorado em Ecologia Tropical) - University of Oxford, Grã-Bretanha.
- Von Elbe JH (2000) Colorantes. In: FENNEMA, O.W. **Química de los alimentos**. 2.ed. Zaragoza : Wisconsin - Madison. Cap.10, p.782-799.
- Wilks DS. (2006) Statistical methods in the atmospheric sciences. 2.ed. **San Diego: Academic Press**. 629p.
- Yan Li L, Lyu Q, He S L, Yi S L, Liu X F, Xie R J, et al. Prediction of nitrogen and phosphorus contents in citrus leaves based on hyperspectral imaging. **Int J Agric & Biol Eng**, 2015; 8(2): 80—88.
- Yang Z, Willis P, Mueller, R. (2008) Impact of Band-Ratio Enhanced AWIFS Image to Crop Classification Accuracy. In: Pecora – The Future of Land Imaging... Going Operational, 17, Denver, Colorado, USA. **Proceedings...** Maryland: (ASPRS).
- Yara (2018). Produção Mundial de tomate. Disponível em: <https://www.yarabrasil.com.br/nutricao-de-plantas/tomate/producao-mundial-de-tomate/>. Acesso em: 10 abr. 2018.
- Zhu Q et al. (2017) Effect of Phosphorus Rates on Growth, Yield, and Postharvest Quality of Tomato in a Calcareous Soil. **Hortscience**, v. 10, n. 52, p.1406-1412.

ANEXOS

P11D50			P1D0
P12D75			P2D25
P13D25			P3D75
P14D0			P4D50
P15D100			P5D100
P16D75			P6D0
P17D50			P7D75
P18D100			P8D100
P19D25			P9D25
P20D0			P10D50