

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS DA PRODUÇÃO AGRÍCOLA**

Diogo Bon Diniz

**APLICAÇÃO FOLIAR DE FE É UMA ALTERNATIVA EM RELAÇÃO A
RADICULAR PARA CONCILIAR ALTA PRODUTIVIDADE E QUALIDADE DE
GRÃOS DE QUINOA**

**JABOTICABAL
2021**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS DA PRODUÇÃO AGRÍCOLA**

**APLICAÇÃO FOLIAR DE FE É UMA ALTERNATIVA EM RELAÇÃO A
RADICULAR PARA CONCILIAR ALTA PRODUTIVIDADE E QUALIDADE DE
GRÃOS DE QUINOA**

Diogo Bon Diniz

Orientador: Prof.Dr. Renato de Mello Prado
Coorientador: M.Sc. Luís Felipe Lata Tenesaca

Trabalho apresentado à Faculdade de Ciências
Agrárias e Veterinária - UNESP, Câmpus de
Jaboticabal, para graduação em ENGENHARIA
AGRONÔMICA.

Jaboticabal – SP
2º Semestre/ 2021

D585a	<p>Diniz, Diogo Bon</p> <p>Aplicação foliar de Fe é uma alternativa em relação a radicular para conciliar alta produtividade e qualidade de grãos de quinoa / Diogo Bon Diniz. -- Jaboticabal, 2021</p> <p>47 f. : tabs., fotos</p> <p>Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Agrônômica) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal</p> <p>Orientador: Renato de Mello Prado</p> <p>Coorientador: Luís Felipe Lata Tenesaca</p> <p>1. Plantas Nutrição. 2. Elementos traços na nutrição. 3. Cultivos agrícolas Rendimento. 4. Vitamina C. 5. Fotossíntese. I. Título.</p>
-------	--

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

DEPARTAMENTO: CIÊNCIAS E PRODUÇÃO AGRÍCOLA

CERTIFICADO

TRABALHO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA

**TÍTULO: APLICAÇÃO FOLIAR DE FE É UMA ALTERNATIVA EM RELAÇÃO
A RADICULAR PARA CONCILIAR ALTA PRODUTIVIDADE E QUALIDADE
DE GRÃOS DE QUINOA**

ACADÊMICO: Diogo Bon Diniz

CURSO: ENGENHARIA AGRONÔMICA

ORIENTADOR: Prof. Dr. Renato de Mello Prado

PERÍODO: junho/2020 À outubro/2020

Este trabalho é recomendado para compor a base de dados CAPELO.

Sim

Não

BANCA EXAMINADORA:

(Nomes)

(Assinaturas)

Presidente Prof. Dr. Renato de Mello Prado**Membro M.Sc. José Lucas Farias da Silva****Membro M.Sc. Dalila Lopes da Silva****Jaboticabal 14 / 10 / 2021****Aprovado em reunião do conselho do departamento em: 24 / 11 / 2021****_____
Chefe do Departamento**

Dedico à minha família e meus amigos,
por toda a ajuda até esse momento.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por abençoar meus caminhos e minhas decisões tomadas ao longo da minha vida.

À minha família, meus pais, Francisco do Nascimento Diniz e Leacir Bon Diniz, juntamente do meu irmão Diego Bon Diniz por não medirem esforços para com que pudesse ter uma formação e educação de qualidade, juntamente com todo aporte emocional e motivacional nessa etapa de crescimento, tanto pessoal como profissional.

À minha vó, Dulce do Nascimento Diniz, e minhas tias Lúcia e Dulcineide Diniz, ao qual sempre recorria aos seus conselhos em momentos difíceis.

Aos meus grandes amigos, Luís Eduardo Chies de Moraes, Giovana alfe, Fernanda (Taio), Fábio (Mereço), Roberta (Nety), e Lorena (Megusta) pelas divertidas conversas no campus, refeitório e intervalos das aulas, além dos momentos de conforto e paciência comigo durante a graduação, vocês foram essenciais para tornar esses momentos mais leves e divertidos.

A meu orientador o Prof. Dr. Renato de Mello Prado e meu coorientador o doutorando Luís Felipe Lata Tenesaca por todos os sábios conselhos e ajuda no decorrer desse trabalho.

À Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita de Filho” – UNESP/FCAV e seus funcionários e professores, em especial aos professores doutores Mara Cristina Pessôa da Cruz, Luciana Cristina Souza Merlino, Pedro Luiz Martins Soares, Rita de Cássia Panizzi, Guilherme Duarte Rossi, Ana Margarita T. Caminhas, Antônio Sergio Ferraudó e Newton La Scala Júnior e aos funcionários Maria Clara Borges e Fernanda Suzuki e seus demais

companheiros do setor de graduação e assistência social da Unesp, campus de Jaboticabal, que sempre buscaram me auxiliar da melhor e empática forma possível no meu sonho da formação superior.

À República Mata Bixera por ser minha segunda casa e me proporcionar as melhores experiências e aprendizados nessa fase da minha vida, deixo aqui meus mais sinceros agradecimentos aos meus irmãos da “casa roxa cheia de trouxa”, Marcos Túlio Almeida (K-pão), Gustavo Leite (Dildo), Henrique Boselli Bussioli (Taradão), Juliano Telesca (Brunão), Neil Canettieri (Vápu), Eduardo Buzinaro (Buzina), Guilherme Pereira Soragni (Xangríla), Pedro Henrique Mesquita (Despachado), Eduardo Carnimeo (Michuta), Lucas antoszczeszen (Saliente), Guilherme Seber (Jack), Gabriel Terrassi (Vak-H) e Lucas Di Sessa (Seu-Cuca), além dos seus ilustres ex-moradores pelas risadas e conselhos de suma valia nos churrascos de ex-moradores e em suas visitas especiais a nossa casa.

Agradeço imensamente a todos vocês por tornar o meu sonho da graduação possível, e a aqueles não citados aqui, sintam-se confortados, pois guardo vocês em meu coração.

A todos o meu muito obrigado e minha eterna gratidão.

“Pouco conhecimento faz com que as pessoas se sintam orgulhosas. Muito conhecimento, que se sintam humildes. É assim que as espigas sem grãos se erguem desdenhosamente para o céu, enquanto que as cheias baixam para a terra, sua mãe.”

(Leonardo da Vinci).

RESUMO

Aplicação foliar de Fe é uma alternativa em relação radicular para conciliar alta produtividade e qualidade de grãos de quinoa

O Ferro favorece o crescimento, produtividade e a qualidade dos grãos das plantas de quinoa. Para entender melhor o efeito do Fe nas plantas, é importante considerar o melhor modo de fornecimento, mas essas informações não são conhecidas em plantas como a quinoa. Para isso, realizou-se esta pesquisa, objetivando-se avaliar o efeito de diferentes modos de aplicação de Fe na produção de compostos antioxidantes, antinutricionais, crescimento e produtividade da quinoa. Os tratamentos foram: aplicação de Fe via solução nutritiva ($0,09 \text{ mmol L}^{-1}$), via foliar (9 mmol L^{-1}), e solução nutritiva somada a via foliar e o tratamento controle (- sem aplicação de Fe). A fonte utilizada para o fornecimento tanto via foliar como solução nutritiva foi o quelato de ferro (Fe-EDDHMA). Os resultados demonstraram que a aplicação foliar de Fe destacou-se da aplicação via solução nutritiva em promover o crescimento da quinoa devido ao aumento dos pigmentos fotossintéticos e da eficiência quântica do fotossistema II. No entanto, para atingir o maior teor de Fe nos grãos foi necessária a aplicação conjunta de Fe (via radicular e foliar), além de melhorar a qualidade dos grãos por aumentar o teor de ácido ascórbico. Todavia, apenas aplicações foliares de Fe foram suficientes para diminuir o teor de taninos nos grãos.

Palavras Chave: Plantas nutrição, elementos traços na nutrição, cultivo agrícolas rendimento, fotossíntese, biofortificação, cultivo hidropônico, ácido ascórbico, taninos, clorofilas, fotossistema II, carotenoides.

ABSTRACT

Foliar application of Fe is an alternative to the root route to reconcile high yield and quality of quinoa grains

The Iron (Fe) favors the growth, yield and grain qualities of quinoa plants. In order to improve the understanding of the effects of Fe in plants, it is important to consider the best mode of supply of this micronutrient are relevant, but this information is not known in some plants such as quinoa. This study aimed at evaluating the effect of different modes of application of Fe in the production of antioxidant and anti-nutritional compounds, as well as in plants growth and productivity. The treatments were established: application of Fe in the nutrient solution (0.09 mmol L^{-1}), foliar application (9 mmol L^{-1} of Fe), and combined in the nutrient solution added to the leaf and a control (without Fe). The source of Fe used in this study was iron chelate (Fe-EDDHMA). The results showed that the foliar application of Fe stood out from application via nutrient solution in promoting the growth of quinoa plants, as a result of improved physiological variables, such as the photosynthetic pigments and quantum efficiency of the photosystem II. However, to reach higher Fe content in the grains, it was necessary to apply Fe together (via root and leaf), besides improved grain quality by increasing Ascorbic acid content. However, only Fe foliar applications were enough to reduce the tannin content in the grains.

Keyword: Plants nutrition, trace elements in nutrition, agricultural crop yield, photosynthesis, biofortification, hydroponic cultivation, ascorbic acid, tannins, chlorophylls, photosystem II, carotenoids.

SUMÁRIO

RESUMO	ix
ABSTRACT	x
1 INTRODUÇÃO.....	13
2 REVISÃO DE LITERATURA	16
2.1 Importância econômica da quinoa.....	16
2.2 Adaptação no Brasil e características agronômicas da variedade Piabiru..	18
2.3 Contextualização geral de compostos antinutrientes e antioxidantes	19
2.4 Importância do ferro nas plantas e sua relação com compostos taninos, clorofilas, pigmentos e ácido ascórbico.....	21
2.5 Implicações e recomendações das aplicações foliares e radiculares com ferro	23
3 OBJETIVO.....	25
4 MATERIAL E MÉTODOS	26
4.1 Delineamento e condições experimentais	26
4.2 Soluções nutritivas	28
4.3 Aplicação radicular	30
4.4 Aplicação foliar	30
4.5 Variáveis avaliadas no experimento	31
4.6 Teores de pigmentos: carotenoides e clorofilas a e b	31
4.7 Teor de Ferro	32
4.8 Teor de ácido ascórbico	32
4.9 Eficiência quântica do fotossistema II (Fv/Fm)	33
4.10 Análises de antinutrientes: taninos	33
4.11 Produção de biomassa	34
4.12 Análise estatística.....	34
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	35

5.1	Efeito dos modos de aplicação de Fe sobre variáveis fisiológicas e crescimento da quinoa	35
5.2	Efeito dos modos de aplicação de Fe sobre a produção de biomassa e produtividade da quinoa.....	36
5.3	Efeitos dos modos de aplicação de ferro nos teores de taninos, Fe e ácido ascórbicos nos grãos de quinoa.....	38
6	CONCLUSÃO	42
	REFERÊNCIAS	44

1 INTRODUÇÃO

A quinoa (*Chenopodium quinoa Wild.*), pertence à família Amaranthaceae, provinda das regiões dos Andes sendo cultivada por séculos (SPEHAR; ROCHA; SANTOS, 2011) é atualmente cultivada na Bolívia, Peru, Estados Unidos, Equador, Colômbia, Chile e Argentina (GEWEHR et al., 2012).

A quinoa é uma cultura que tem ganhado grande atenção devido a sua composição nutricional, contém aproximadamente 15% de proteína de excelente qualidade com relevantes concentrações de aminoácidos essenciais, além de apresentar quantidades apreciáveis de ácidos graxos essenciais, vitaminas e minerais (KOZIOŁ, 1992). No entanto, em relação a sua composição nutricional de ferro, quando comparado com outros grupos de plantas, como os cereais e leguminosas, são considerados baixos (BAZILE, 2014; HUSSAIN et al., 2020).

Diante disso, é necessário garantir absorção de Ferro (Fe) pela quinoa que pode ocorrer via radicular especialmente em solos ácidos que apresentam teores de Fe adequados no solo (PRADO, 2021). No entanto, em solos deficientes como os alcalinos com restrição a sua aplicação tem-se opção da pulverização foliar que emprega quantidade relativamente baixa do nutriente comparado a radicular via solução nutritiva (fertirrigação) ou no solo (FERNÁNDEZ; SOTIROPOULOS; BROWN, 2015; AZIZ et al., 2019).

A ótima absorção de Fe pelas plantas é importante para promover incremento nos teores de pigmentos fotossintéticos e a eficiência fotossintética favorecendo o crescimento e a produtividade das plantas (MOLASSIOTIS et al.,

2006). Além disso, o Fe é também importante para a qualidades dos grãos a partir da biofortificação agrônômica, que é uma técnica que permite o fornecimento direcionado de nutrientes nas partes comestíveis das plantas afim de promover a composição nutricional, teor de antioxidantes e reduzir o teor de antinutrientes dos produtos colhidos (BOUIS; SALTZMAN, 2017; HOTZ; MCCLAFFERTY, 2007; HUSSAIN et al., 2012, 2020; MÁRQUEZ-QUIROZ et al., 2015; VASCONCELOS; GRUISSEM; BHULLAR, 2017; VELU et al., 2014). Desse modo, favorecendo o crescimento e a produtividade das culturas (VASCONCELOS; GRUISSEM; BHULLAR, 2017; VELU et al., 2014). Entretanto, mesmo com emprego de técnicas de fornecimento de nutriente, ainda assim para haver alta qualidade dos grãos não basta ter alta concentração do elemento no grão e sim haver biodisponibilidade que é reduzida com a presença de antinutrientes como fitato e tanino (DAS et al., 2011).

Os taninos geralmente afetam a digestibilidade de proteínas e levam à redução dos aminoácidos essenciais, formando complexos tanino-proteína reversíveis e irreversíveis entre o grupo hidroxila dos taninos e o grupo carbonila das proteínas (RAES et al., 2014). Assim, pode haver redução da sua digestibilidade e biodisponibilidade causando deficiência de ferro em humanos (IDRIS et al., 2006). No entanto, ainda não é conhecido se o fornecimento de Fe com quelato de maior estabilidade (EDDHMA) poderia afetar o conteúdo dos taninos nos grãos e conseqüentemente na qualidade dos grãos. Essa qualidade dos grãos de quinoa poderia ser melhorada com o aumento do ácido ascórbico havendo necessidade de estudos.

Assim, evidenciamos a necessidade de pesquisas que possam aumentar a eficiência da aplicação do Fe seja foliar ou radicular para favorecer aspectos fisiológicos e a produtividade da quinoa, e que possa diminuir o teor de antinutrientes e aumentar o teor de ácido ascórbico nos grãos para a sustentabilidade do sistema de produção da quinoa, no entanto, ainda falta informações nesta espécie.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Importância econômica da quinoa

Além dos inúmeros benefícios à saúde que são atribuídos a quinoa outro aspecto de suma importância é o impacto econômico que a cultura causou na população que a cultiva, pois, a cultura se tornou importante mercadoria de exportação em países como Bolívia, Peru, Equador e Chile proporcionando uma melhor renda as famílias, em sua maioria camponesa envolvidas em seu cultivo (BAZILE, 2014).

Em relação a sua produção, os dois maiores países exportadores de quinoa são Bolívia e Peru (AQUINO, 2019). Pesquisas indicam que a Bolívia iniciou a sua produção e exportação da quinoa real, um grão diferenciado e de alta qualidade comparado aos demais produzidos em outras regiões em meados de 1950 (BAZILE, 2014).

Por outro lado, Peru concorrente da Bolívia, iniciou suas exportações em 2008 de forma bem discreta, no entanto, em 2016 as exportações peruanas ficaram em 44.340 toneladas consolidando o Peru como o maior exportador mundial do grão (AQUINO, 2019). Um ponto importante nessa disputa pela hegemonia na venda do grão foram os anos de 2013 e 2014 após a declaração da ONU sobre a escolha da quinoa como alimento do ano, a Bolívia em 2011 tinha exportado US\$ 63 milhões e em 2014 aumentou em 213% maior valor já anotado por eles, já o seu concorrente direto fez entre 2013 e 2014 os incríveis US\$ 196 milhões de renda e aumento de 98,5% em toneladas vendidas (AQUINO, 2019).

Em dados mais recentes, a Bolívia arrecadou um total de US\$ 94,64 milhões e exportou 38.016 toneladas em 2020 (INSTITUTO BOLIVIANO DE COMÉRCIO EXTERIOR, 2021) e o Peru obteve nos nove meses iniciais de 2020 um valor de US\$ 94 milhões e uma taxa de exportação de 37.798 toneladas e grandes expectativas para o fim do ano (MINISTÉRIO DE AGRICULTURA E IRRIGAÇÃO PERUANA, 2021).

Na atualidade os dois países são protagonistas no cenário econômico, já que a soma das produções de ambos representa 90% da produção mundial (MINISTÉRIO DE AGRICULTURA E IRRIGAÇÃO PERUANO, 2021).

No Brasil, o instituto brasileiro de geografia e estatística (IBGE) ainda não divulga dados referente à exportação da quinoa produzida no Brasil, mas segundo Aquino (2019) o Brasil começou sua produção visando a exportação no ano de 2014 nas localidades do Centro oeste nacional, possuindo um total de área plantada de 26 hectare (ha) e no ano seguinte com 75 hectare (ha). Em 2016 a produção total Brasileira alcançou 4.200 kg/ha com expectativas de 8.000 kg/ha para os próximos anos (AQUINO, 2019).

2.2 Adaptação no Brasil e características agronômicas da variedade Piabiru

A resistência da quinoa, principalmente aos ambientes estressantes ou regiões diferentes a seu ambiente de origem como o Brasil, se deve a uma série de modificações na planta, sendo essas em níveis morfológicos e fisiológicos, tais como: menor tamanho da planta, menor tamanho e número de estômatos, maior concentração na parte abaxial das folhas, síntese de prolina e redução do período de floração (MUJICA; CHURA; MARTINEZ, 2010).

Outra característica peculiar dessa espécie é a ocorrência e a deposição de oxalato de cálcio nas folhas, onde estas possibilitam preservar a umidade, atributo favorável em ambientes com elevados grau de estresse térmico (SPEHAR; SANTOS; NASSER, 2003).

A introdução da quinoa em solos Brasileiros se iniciou na década de 90 com o objetivo de diversificar os conjuntos de produções agrícolas no cerrado Brasileiro. Parcerias recentes entre a Embrapa Cerrados, Universidade de Brasília (UNB) e agricultores locais vem ajudando a inserir e integrar mais a cultura no território nacional (SPEHAR; ROCHA; SANTOS, 2011). A cultivar BRS Piabiru foi pioneira como cultivo granífero no Brasil (SPEHAR; SANTOS, 2002) resultante de populações originárias de Quito, Equador (SPEHAR; SANTOS, 2002).

Em relação a suas características morfológicas, a cultivar possui hipocótilo com cor variável entre verde e rósea, as folhas exibem deposição de oxalato de cálcio, com caule podendo ser ereto verde com estrias ou liso, a

inflorescência apresenta coloração amarela na época de maturação e os grãos do tipo aquênios, cilíndricos e achatados (SPEHAR; SANTOS, 2002). Sua altura é em média de 190 cm, desse valor a inflorescência representa 45 cm.

Após 30 dias da germinação as suas flores começam se transformar e aos 45 dias tem início o processo de antese, ou seja, da germinação até a fase final da planta transcorre um período de 145 dias. Vale ressaltar que uma particularidade desse cultivar é sua notória resistência ao acamamento (SPEHAR; SANTOS, 2002).

2.3 Contextualização geral de compostos antinutrientes e antioxidantes

Os antinutrientes são compostos que afetam a composição nutricional das plantas, gerando características não desejáveis pelos produtores e consumidores finais. Entretanto, recentes estudos ilustram aspectos positivos desses compostos, principalmente na área da saúde humana sendo eficazes em inúmeras doenças que assolam a vida humana, tais como doenças inflamatórias, cânceres, alergias, patologias microbianas e enfermidades cardiovasculares (DINI; TENORE; DINI, 2010; GARCÍA-TIRADO; RIEGER-REYES; SAZ-PEIRÓ, 2012; MARTÍNEZ, 2014; TROISI et al., 2014).

Os antinutrientes mais conhecidos e estudados são compostos fenólicos, taninos, flavonoides e antocianinas. Esses compostos mesmo tendo benefícios a saúde humana e capacidade antioxidante, são capazes de inibir a composição e a distribuição de micronutrientes nas plantas, entre eles os mais estudados são o Fe e o Zn.

Já os compostos antioxidantes são substâncias com a capacidade de reduzir a oxidação de grupos oxidantes, tais como espécies reativas de oxigênio (ROS) (CERQUEIRA; DE MEDEIROS; AUGUSTO, 2007). A neutralização dessas estruturas ocorre mediante a interferência em processos de síntese ou neutralização de ROS e as ligações de íon metálicos com proteínas evitando a criação de substâncias oxidantes (CERQUEIRA; DE MEDEIROS; AUGUSTO, 2007).

Vale ressaltar, que quando ocorre um desbalanceamento na composição nutricional das plantas temos o fenômeno denominado estresse oxidativo, onde as atividades da ROS são maiores que de seus combatentes (CERQUEIRA; DE MEDEIROS; AUGUSTO, 2007).

Neste trabalho, centramos nossos esforços sobre os taninos como composto antinutricional, pois, este embora seja um composto com ação de oxidação, também tem um efeito negativo na absorção de Fe pelas plantas, sendo assim, há necessidade de aplicações do mineral. Em relação aos compostos antioxidantes, o ácido ascórbico (AsA) foi escolhido pelo seu papel fundamental na tolerância das plantas a fatores abióticos (AKRAM; SHAFIQ; ASHRAF, 2017; AZIZ; AKRAM; ASHRAF, 2018). Suas funções na planta são foto proteção, cofator enzimático e auxílio no desenvolvimento destes seres (GEST; GAUTIER; STEVENS, 2013).

O poder do AsA é devido à ação do radical ascorbila (CERQUEIRA; DE MEDEIROS; AUGUSTO, 2007). O radical ascorbila por ser pouco reativo fornece a molécula de AsA propriedades antioxidantes para eliminar compostos reativos

e transformá-los em elementos de pouca reatividade (CERQUEIRA; DE MEDEIROS; AUGUSTO, 2007). Contudo, os níveis de ácido ascórbico em plantas de quinoa são relativamente baixos, apresentando teores entre 1,4 a 5,0 mg 100 g⁻¹ (GORDILHO - BASTIDAS et al., 2016; KOZIOŁ, 1992).

Em vista dos dados elucidados neste capítulo, notamos que os compostos taninos afetam a disponibilidade de Fe na planta, logo, a solução desse gargalo seria o fornecimento desse micronutriente através de aplicações foliares ou radiculares, no entanto, essas aplicações poderiam não só aumentar os teores do micronutriente em questão, mas também afetar outras variáveis de importância para a conservação e posterior aumento da produtividade.

2.4 Importância do ferro nas plantas e sua relação com compostos taninos, clorofilas, pigmentos e ácido ascórbico

O Fe é um micronutriente essencial para o desenvolvimento das plantas, que exerce várias funções no metabolismo, respiração, biossíntese de clorofilas e proteínas, fixação de nitrogênio (N), assimilação de N e enxofre (S), fotossíntese e cofator para enzimas na transferência de elétrons (KOBAYASHI; NOZOYE; NISHIZAWA, 2019). O Fe é absorvido pelas raízes na forma de Fe²⁺, entretanto, também pode ser absorvido como Fe³⁺ e Fe-quelutado (MOLASSIOTIS et al., 2006).

A deficiência de Fe nas plantas estabelece consequências como clorose em folhas jovens, diminuição das clorofilas, reduz a quantidade e atividade de enzimas cruciais para continuidade da planta (MOLASSIOTIS et al., 2006).

Em seu estudo Molassiotis et al., (2006), enfatizou a importância deste mineral na biossíntese das clorofilas, pois, o Fe foliar se centraliza principalmente nos cloroplastos e com a deficiência de Fe afetando essa organela, a quantidade de Fe nas folhas fica prejudicada e por consequência diminui os níveis de clorofila e taxa fotossintética nas plantas.

Já o AsA é um grande beneficiador da biodisponibilidade de Fe (GERMANO, 2002). Este composto tem duas funções extremamente importantes na disponibilidade de nutrientes em alimentos, influenciando a melhor alimentação dos seres humanos que são: manter o ferro na forma ferrosa em alimentos e criar o quelato ferro-ascorbato que terá a finalidade de conservar o ferro solúvel mesmo com acréscimos de pH no intestino delgado proximal (GERMANO, 2002).

No que se refere aos carotenoides, esses em sua maioria são precursores da vitamina A, sendo denominados como provitamina A, nessa conversão existem relatos na literatura que o Fe exerce papel fundamental entre a transformação de B-caroteno em vitaminas A (GERMANO, 2002).

Outro fator que merece atenção é a relação dos antinutrientes com o Fe, como o ácido fítico, que tem um efeito negativo na biodisponibilidade de inúmeros minerais. Além disso, compostos como os taninos, apresentam efeitos negativos no ser humano, como a redução da digestibilidade de proteínas, inibição de enzimas digestivas e nas plantas, a interferência na absorção do ferro em leguminosas e cereais (SILVA; SILVA, 1999). Essa interferência dos taninos ocorre através da capacidade deste polifenol em criar cadeias entre suas

hidroxilas e as moléculas do nutriente, o tornando escasso para a absorção pela planta (CANNIATTI-BRAZACA; MARTINI, 2002).

2.5 Implicações e recomendações das aplicações foliares e radiculares com ferro

Como já citado, os modos mais empregados na aplicação de Fe nas plantas, são as aplicações de fertilizantes via radicular e foliar (ACIKSOZ et al., 2011; HUSSAIN et al., 2020), contudo, ainda faltam dados referente as estratégias de aplicações na cultura da quinoa.

A biodisponibilidade de Fe no solo pode ser afetada principalmente em condições de pH alto ou altos teores de bicarbonatos que causam a oxidação do Fe deixando-o inacessível às plantas (LIU; HANLON; LI, 2012; RAMZANI et al., 2016). Há de salientar também que as aplicações de micronutrientes diretamente via solo não são aconselháveis, pois como o Fe, Cu, Mn e Zn são cátions, ou seja, são elementos envolvidos por cargas positivas, esses na fase líquida do solo irão se ligar a íons de oxigênio ou hidróxido resultando em elementos indisponível para as plantas (LIU; HANLON; LI, 2012).

Nesse cenário, os fertilizantes quelatizados surgem como opção de fornecer Fe no solo evitando situações de perda, pois conservam o micronutriente de reações inesperadas na solução e no solo em pH elevados (LIU; HANLON; LI, 2012), seu funcionamento se resume basicamente em ser um conectivo entre a raiz, solução e o solo ajudando a absorção do nutriente pelas plantas (LIU; HANLON; LI, 2012).

Por outro lado, as aplicações de nutrientes via foliar é considerada complementar a outros tipos de aplicações, se recomendando somente em situações específicas, por exemplo lavouras com deficiências severas ou indisponibilidade de determinado nutriente no solo (HUSSAIN et al., 2012, 2020). Contudo, para se obter êxito na aplicação de micronutrientes localizados via folha vai depender que a solução pulverizada penetre a cutícula da folha, sofra difusão e posteriormente seja transportado para as demais partes da planta (ACIKSOZ et al., 2011; FERNÁNDEZ; EBERT, 2005; FERNÁNDEZ; SOTIROPOULOS; BROWN, 2015). Já os fatores ambientais como luz, temperatura e umidades relativa influenciam a penetração da solução, onde quanto mais alta a umidade relativa melhor será a absorção cuticular (FERNÁNDEZ; EBERT, 2005).

Como mencionado anteriormente a distribuição de micronutrientes no solo ou em solos de calcários se mostra não efetiva em decorrência da disponibilidade desses nutrientes para a planta, com exceção do Mo (AZIZ et al., 2019). Nessa situação que se assemelha à de países com clima semiárido a aplicação foliar será mais eficaz e econômica que a radicular (AZIZ et al., 2019).

Referente as fontes, as mais usadas para o fornecimento de Fe tanto na folha como na raiz citadas na literatura são sulfato ferroso (FeSO_4) e quelatos de ferro (FeEDTA e Fe-EDDHMA) (ACIKSOZ et al., 2011; GHAFARI; RAZMJOO, 2013; HUSSAIN et al., 2020). Onde em experimentos, Aciksoz et al., (2011) e Hussain et al., (2020), demonstraram que os melhores rendimentos e teores de Fe na cultura do trigo surgiram através de aplicações foliares com a distribuição

de 500 mg kg⁻¹ N no solo, e aplicação de Fe-EDTA na época de inicialização, e volume de 0,25% Fe, aumentando a concentração de ferro no grão para 39 mg Fe/Kg (56%).

Já o FeSO₄, fornecido em estágios iniciais + 10 dias depois do florescimento + estágio de maturação, com volume de 1000 L/ha e 0,67% Fe nos dois primeiros sprays e 0,50% Fe na última borrifada aumentou a concentração no grão em torno de 26-40 mg Fe /kg (21-35%) (HUSSAIN et al., 2020).

Em contra partida, Aciksoz et al., (2011) aplicaram Fe-EDTA e FeSO₄ na quantidade de 10 mg Fe Kg⁻¹ no solo e distintos valores de (N), notando que quanto maiores as concentrações de (N) junto com as fontes de Fe, maior era o ganho em matéria seca final, todavia, a concentração de Fe nos grãos permanecia a mesma, evidenciando que a aplicação via solo não altera a concentração deste nutriente no grão.

3 OBJETIVO

O objetivo do trabalho foi avaliar o efeito de diferentes modos de aplicação de Fe na produção de composto antioxidante, antinutriente, crescimento e produtividade da cultura quinoa.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Delineamento e condições experimentais

O experimento foi conduzido em casa de vegetação do Departamento de Ciências e Produção Agrícola, pertencente a Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP/FCAV), sediada na cidade de Jaboticabal, SP. Foram cultivadas plantas de quinoa (*Chenopodium quinoa Wild*) cultivar BRS Piabiru (SPEHAR, C, SANTOS, 2002) em sistema de cultivo hidropônico, com a temperatura e umidade relativa média em $29,7 \pm 4,15^{\circ}\text{C}$ e $47 \pm 32\%$ respectivamente durante o dia.

A Figura 1 indica os valores de temperaturas e umidades relativas obtidos durante o desenvolvimento do projeto em fases específicas da quinoa.

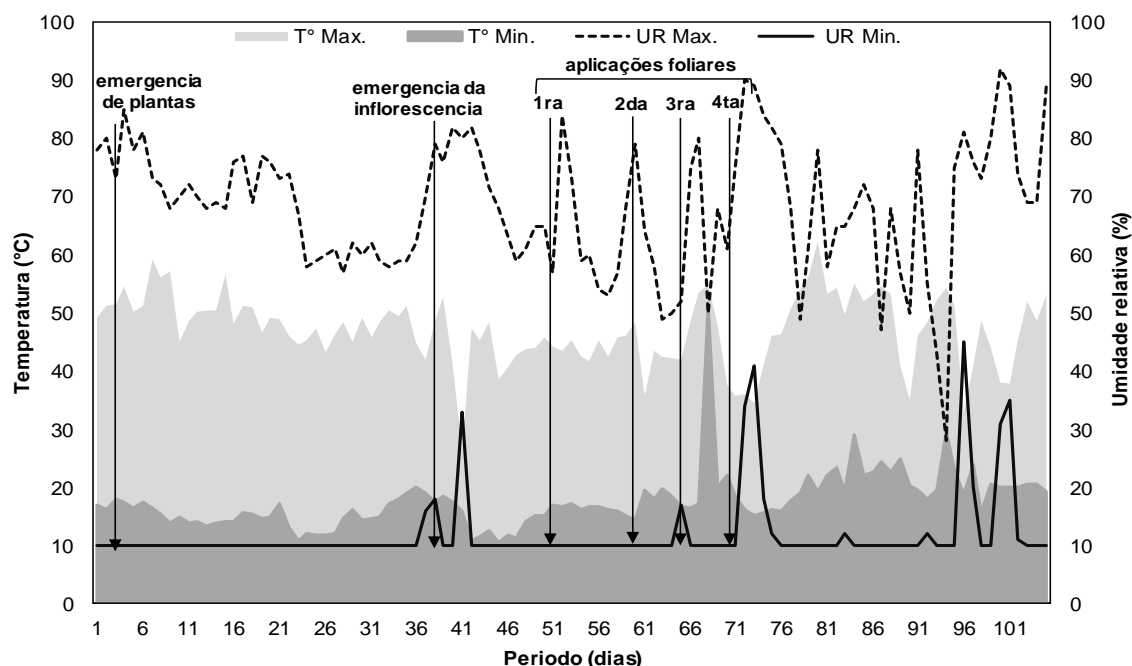


Figura 1. Valores obtidos de temperatura (T° Max = temperatura máxima e T° Min = temperatura mínima) e umidade relativa (UR Max = umidade relativa máxima e UR Min = umidade mínima) no decorrer do experimento.

Fonte: Diniz, 2021.

Foram considerados quatro tratamentos que correspondem às formas de aplicação de Fe: aplicação radicular na solução nutritiva ($0,09 \text{ mmol L}^{-1}$), aplicação foliar (9 mmol L^{-1} de Fe), aplicação combinada (foliar + radicular) e, o controle (sem fornecimento de Fe). Os tratamentos foram arranjados em delineamento em blocos casualizados com cinco repetições, como indicado na tabela 1.

A fonte utilizada para o fornecimento do Fe tanto para a solução nutritiva como para as pulverizações foliares foi o quelato de ferro (Fe-EDDHMA), que tem concentração de 6% de Fe.

A unidade experimental correspondeu a um vaso de polietileno de 7dm³, preenchido com areia de textura média, previamente lavada com água deionizada e desinfetada com solução de HCl 1% (FILHO et al., 2018).

As plantas foram irrigadas no período da manhã entre 8h e 9h da manhã e no período da tarde às 16h e 17h da tarde. A quantidade de solução nutritiva fornecida variou segundo o requerimento hídrico da planta, nos estágios de maior requerimento e desenvolvimento, foi aplicada a quantidade de 800 mL sendo 600 mL na areia e 200 mL nos pratos dos vasos.

Tabela 1- Descrição dos tratamentos.

Tratamentos	Identificação	Modos de aplicação
T1	-Fe	Sem aplicação de Fe
T2	Fe (R)	Aplicação de Fe na solução nutritiva
T3	Fe (F)	Aplicações de Fe via pulverizações foliares
T4	Fe (R+F)	Combinação de solução nutritiva somada a foliar

4.2 Soluções nutritivas

A areia lavada foi colocada nos vasos de 7dm³ com dez sementes de quinoa em cada vaso, a semeadura ocorreu no dia 12 de julho de 2020, e após a emergência das plantas (3 dias após a semeadura) foi realizado o fornecimento de solução nutritiva conforme Hoagland & Arnon (1950), havendo alteração da

fonte original de Fe propostos por esses autores, ou seja, ao invés de Fe-EDTA usou-se Fe-EDDHMA.

A solução nutritiva fornecida inicialmente com a força iônica de 10% durante os primeiros 10 dias após a emergência, e posteriormente para 25% na fase inicial vegetativa (até oito folhas verdadeiras), em sequência, aumentou-se para 50% até o início da floração e, em seguida, atingiu 100% até a fase final do experimento.

O valor pH da solução nutritiva foi ajustado diariamente em $5,5 \pm 0,2$ com soluções de ácido clorídrico (HCl) ou hidróxido de sódio (NaOH). O valor pH da calda para a aplicação foliar do Fe foi ajustado em 5,0 com os mesmos controladores (HCl) e (NaOH).

A Figura 2 ilustra os distintos momentos das plantas. No primeiro (Figura 2a), as plantas estavam recebendo a solução nutritiva com 25% da força iônica, e na (Figura 2b) as plantas se encontravam em estágio de desenvolvimento da inflorescência, onde começou a receber as aplicações foliares direcionadas no órgão reprodutivo e iria receber a solução nutritiva com 100% de força iônica.

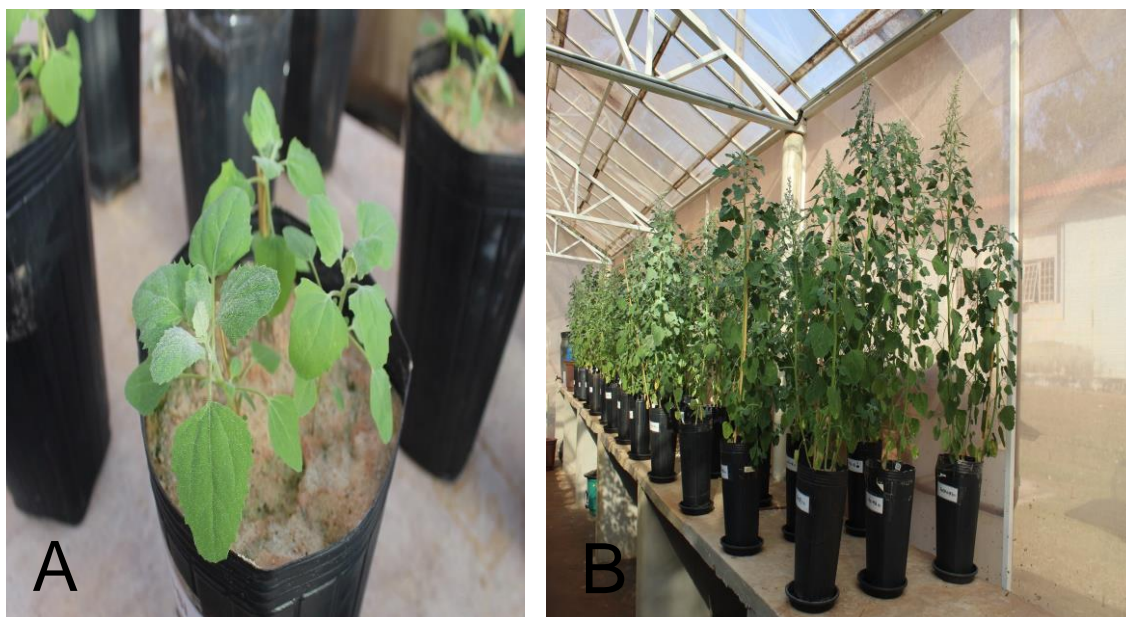


Figura 2. (A) Vista superior de planta de quinoa em fase inicial antes de receber a solução nutritiva com força iônica de 25%. 2. (B) Plantas de quinoa em estágio de desenvolvimento da inflorescência, após receber solução nutritiva com força iônica de 100% e aplicação foliar no dia anterior.

Fonte: Lata, 2020.

4.3 Aplicação radicular

A aplicação radicular de Fe foi realizada todos os dias e dependendo da temperatura do dia, variavam de uma a duas vezes, manhã e tarde. A solução nutritiva com Fe na concentração de $0,09 \text{ mmol L}^{-1}$ de Fe (fonte Fe-EDDHMA) foi fornecida nos tratamentos Fe (R) e Fe (R+F) (Tabela 1), após a emergência da planta como ilustrado na Tabela 1.

4.4 Aplicação foliar

As aplicações foliares foram realizadas com base nos estádios fenológicos das plantas, foi usada concentração de 9 mmol L^{-1} de Fe. Visto isso, a primeira pulverização foi conduzida quando as plantas apresentaram 10 pares de folhas (51 dias após a emergência das plântulas), a segunda aplicação foi realizada no período de primeira antese (60 dias após a emergência das

plântulas), a terceira pulverização em fase de anteses completa (65 dias após a emergência das plântulas) e uma última durante o desenvolvimento dos grãos aquosos (70 dias após a emergência das plântulas).

As pulverizações foliares ocorreram no final do dia, com a finalidade de ter maior índice de umidade relativa (acima de 60%) para favorecer a absorção foliar. Além disso, as pulverizações foram realizadas no final do dia para evitar degradação do Fe em forma quelatada (FERNÁNDEZ; SOTIROPOULOS; BROWN, 2015). Antes de cada aplicação foliar a superfície do vaso foi coberta com papel toalha para evitar que a solução pulverizada derramasse sobre o solo (FERNÁNDEZ; SOTIROPOULOS; BROWN, 2015).

4.5 Variáveis avaliadas no experimento

As variáveis estudadas foram clorofila *a*, clorofila *b*, carotenoides, eficiência quântica do fotossistema II, biomassa da planta e massa dos grãos, teores de ferro nos grãos, composto antinutricional como o tanino e antioxidante como o ácido ascórbico nos grãos da quinoa.

4.6 Teores de pigmentos: carotenoides e clorofilas a e b

Na quantificação dos teores de pigmentos, foi seguida a metodologia proposta por Lichtenthaler (1987) coletando discos foliares da primeira folha totalmente expandida a partir do ápice da planta. As leituras utilizadas foram: 663 nm para clorofila *a* (Chl *a*), clorofila *b* (Chl *b*) em 647 nm e 470 nm para carotenoides. As análises foram realizadas no espectrofotômetro Beckman DU 640 e os teores mensurados foram com base na massa fresca.

4.7 Teor de Ferro

O teor de Fe foi determinado nos grãos da quinoa após sua extração usando o método descrito por Bataglia et al., (1983).

4.8 Teor de ácido ascórbico

A determinação do teor de ácido ascórbico nos grãos de quinoa (AsA) foi feita pelo método de Tillman, conforme (STROHECKER; HENNING, 1967) com utilização dos reagentes 2,6 diclorofenol indofenol – DFI (0,02%), ácido oxálico (0,5), bicarbonato de sódio e ácido ascórbico. Após esse início, padronizou-se a solução de Tillman (0,02%), para isso se utilizou 5 mL da solução de AsA (50 µg/mL) em um Erlenmeyer de 125 mL até completar ± 50 mL com água destilada, em seguida, foi titulado com a solução de Tillman, até o ponto de viragem na cor róseo claro mantido por até 15 segundos, onde a cor da solução depende do pH do meio. Em seguida foi encontrado a quantidade de AsA para titular 1 mL da solução de Tillman, por meio de uma simples equação algébrica com uma variável.

Encontrado a quantidade necessária de AsA para sua determinação no extrato analisado, deve ser coletado de 1 a 5 mL ou 1 a 5g da amostra, em Erlenmeyer de 125 mL, completar até os 50 mL de ácido oxálico (0,5%) gelado e titular a solução de Tillman, até o ponto de viragem.

$$\text{AA (mg/100 g)} = \frac{(100 \cdot f \cdot v)}{\underline{m}} \cdot 1000$$

Sendo:

f: Título ou fator;

v: Vol. gasto de DFI

m: massa (g) ou volume (mL) da amostra.

4.9 Eficiência quântica do fotossistema II (Fv/Fm)

Foi utilizado um fluorômetro de clorofila (Opti-sciences – Os30P) que mediu a fluorescência da clorofila. Previamente, as plantas foram colocadas no escuro em um período de 30 minutos antes de receber a intensidade de luz vermelha. Depois foram quantificados os F₀ (Fluorescência mínima para excitação da clorofila) e F_m (Fluorescência máxima para excitação da clorofila). Tanto F₀ como F_m são variáveis usadas para o cálculo de variação na fluorescência (F_v), razão de fluorescência variável e fluorescência máxima (F_v/F_m) e razão de fluorescência mínima (F_v/F₀).

O processo de coleta de valores ocorreu no período diurno, sendo analisada a primeira folha totalmente expandida a partir do ápice da planta.

4.10 Análises de antinutrientes: taninos

Para obter os valores de taninos totais na planta foi utilizada uma curva padrão, esta foi feita com solução padrão de ácido tânico 0,1 mg ml⁻¹ e a leitura realizada em um espectrofotômetro, em absorvância, a 725 nm zerando equipamento com o branco, conforme (PANSERA et al., 2003).

4.11 Produção de biomassa

As plantas foram segmentadas em raízes, caule, folha e grãos, estas estruturas passaram por lavagem em água corrente com solução de detergente (0,1% v/v), solução de HCl (0,3% v/v) e água deionizada. Em sequência o material coletado foi seco em uma estufa de circulação forçada de ar ($65\pm 5^{\circ}\text{C}$), até se obter peso constante.

4.12 Análise estatística

Para análise dos dados foi empregado o programa estatístico AgroEstat desenvolvido por Barbosa & Maldonado Junior (2010) com análise de variância pelo teste F e, quando significativo, o teste de comparação de médias (Tukey) com significância de 5% de probabilidade.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Efeito dos modos de aplicação de Fe sobre variáveis fisiológicas e crescimento da quinoa

Os tratamentos que receberam pulverizações foliares de ferro, Fe (F) mostraram as maiores concentrações de clorofila a com 0,42 ($\text{mg g}^{-1}\text{MF}$), e valores estatisticamente semelhantes aos tratamentos combinados Fe (R+F) na clorofila b e carotenoides em comparação ao tratamento testemunha -Fe (Figura 3).

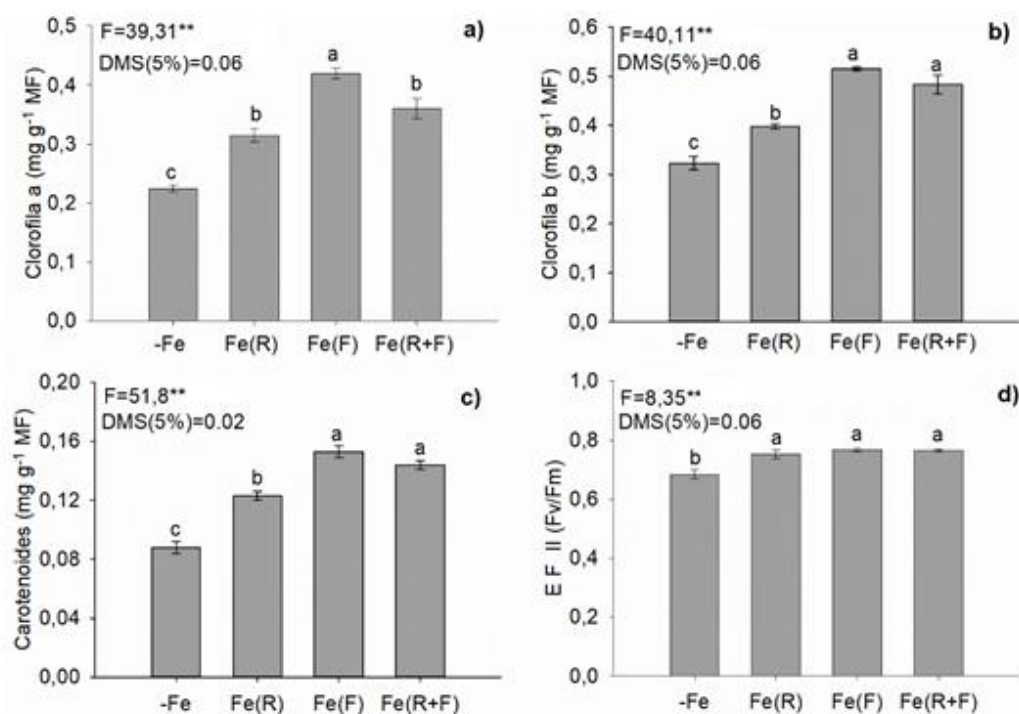


Figura 3. Teores de clorofila a (a), clorofila b (b), carotenoides (c) e eficiência quântica do FSII (Fv/Fm) (d) em plantas de quinoa de acordo com diferentes formas de aplicação de Fe; controle sem aplicação de Fe (-Fe); aplicação radicular de Fe (R); aplicação foliar de Fe (F); aplicação combinada de Fe radicular e foliar (R+F). As letras indicam diferenças significativas entre as médias das diferentes formas aplicação do Fe ($p < 0,05$); valores de F da ANOVA: * $P < 0,05$, ** $P < 0,01$; diferenças mínimas significativas (DMS) ao 5%. As barras verticais representam o padrão da média.

Segundo Mollassiotis et al., (2006), a falta de Fe está intimamente ligada a redução das concentrações de pigmentos fotossintéticos nas plantas, como as clorofilas, pois esse mineral tem um papel fundamental no processo de

biossínteses destes compostos (MOLLASSIOTIS et al., 2006). Outro aspecto importante é que o Fe possui uma mobilidade mediana na planta (FERNÁNDEZ; SOTIROPOULOS; BROWN, 2015) logo, quando aplicado de forma localizada na parte aérea, a maior parte do Fe se centraliza nos cloroplastos e potencializa a síntese de clorofilas, evidenciando os resultados encontrados.

Os carotenoides como os demais pigmentos foram mais afetados pelos tratamentos que tiveram aplicações localizadas Fe (F) e Fe (R+F), a causa desse resultado é a notória participação do Fe no processo de biossíntese dos pigmentos fotossintéticos, visto que a aplicação localizada propicia uma disponibilidade maior e mais rápida do mineral as plantas, e por consequência estimula a maior produção de fotossíntese (GERMANO, 2002; MOLASSIOTIS et al., 2006; HUSSAIN et al., 2020).

Todos os modos de aplicação de Fe promoveram a eficiência quântica do FSII (F_v/F_m) em relação ao tratamento controle (-Fe). Esse fato pode ser explicado pelo papel do Fe no estímulo da síntese de clorofila que acarretará diretamente na eficiência do aparato fotossintético nas plantas (MOLASSIOTIS et al., 2006; KOBAYASHI; NOZOYE; NISHIZAWA, 2019).

5.2 Efeito dos modos de aplicação de Fe sobre a produção de biomassa e produtividade da quinoa

O Fe é um nutriente determinante da eficiência fotossintética das plantas, portanto, conseqüentemente, seu fornecimento nas plantas poderia impactar diretamente sobre a produção de biomassa e produtividade das culturas. Para

quantificar o crescimento e produtividade da quinoa consideramos os dados das seguintes variáveis: massa seca, rendimento dos grãos e massa de 1000 grãos.

A aplicação Fe (R+F) e aplicação foliar Fe (F) promoveram a massa seca da parte aérea (Figura 4a). Esse achado pode ser explicado pelas funções do Fe como um metal ativo na fotossíntese, assimilação do nitrogênio e síntese de clorofila que, conseqüentemente, pode melhorar o crescimento das plantas (SCHMIDT; THOMINE; BUCKHOUT, 2020). Esta evidência fica mais explicativa com auxílio da (Figura 4b, c) que demonstra os valores encontrados nos tratamentos nas variáveis relacionadas a produtividade e massa dos grãos da cultura.

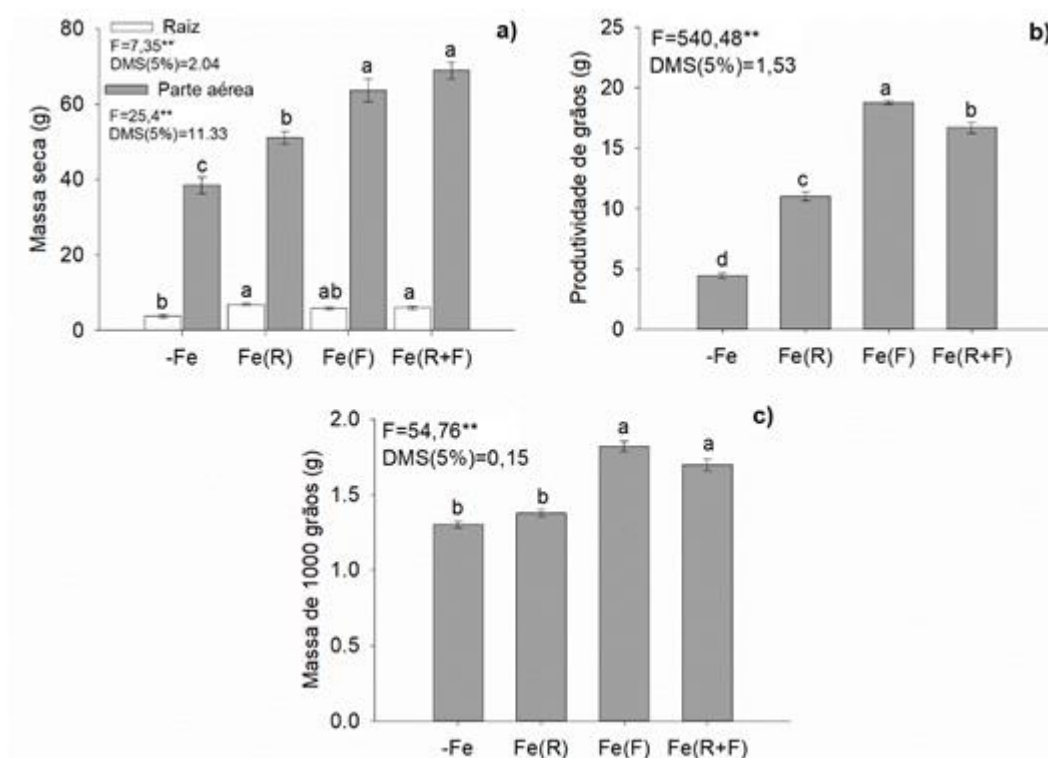


Figura 4. Massa seca da parte aérea e raiz (a), produtividade de grão (b) e massa de 1000 grãos (c) de quinoa de acordo com diferentes formas de aplicação de Fe; controle sem aplicação de Fe (-Fe); aplicação radicular de Fe (R); aplicação foliar de Fe (F); aplicação combinada de Fe radicular e foliar (R+F). As letras indicam diferenças significativas entre as médias de aplicação

de Fe ($p < 0,05$); valores de F da ANOVA: $**P < 0,01$; diferenças mínimas significativas (DMS) ao 5%. As barras verticais representam o erro padrão da média.

Em relação à produtividade da cultura, ficou nítido que o tratamento Fe (F) apresentou melhores valores para a produtividade de grãos e massa de 1000 grão, com uma média de produtividade de aproximadamente 20g por planta. Resultados semelhantes no aumento da produtividade com aplicação foliar de Fe (Fe-EDDHA) foram encontrados por Ackisoz et al. (2011) na cultura de trigo. Isso pode ser explicado pelo fato de que a aplicação foliar de Fe foi direcionada às folhas da planta e grãos no período reprodutivo, aumentando assim a capacidade fotossintética, teores de outros micronutrientes e capacidade antioxidante (FERNÁNDEZ; SOTIROPOULOS; BROWN, 2015). Ao contrário da aplicação radicular, os nutrientes aplicados na superfície foliar ficam imediatamente disponíveis nas plantas (HUSSAIN et al., 2020).

Assim, fica evidente o aumento do crescimento e produtividade da planta de quinoa, visto que os grãos com aplicação foliar de Fe atingiram maior biomassa, ou seja, esses resultados comprovam a linha de pensamento em relação a aplicação na folhagem e suas consequências no desenvolvimento das plantas.

5.3 Efeitos dos modos de aplicação de ferro nos teores de taninos, Fe e ácido ascórbicos nos grãos de quinoa

Baseados nos resultados obtidos, podemos inferir que os tratamentos que receberam fornecimento de Fe, tanto via pulverização foliar, quanto aplicação radicular ou a combinação de ambas as formas reduziram a composição de taninos nos grãos de quinoa (Figura 5).

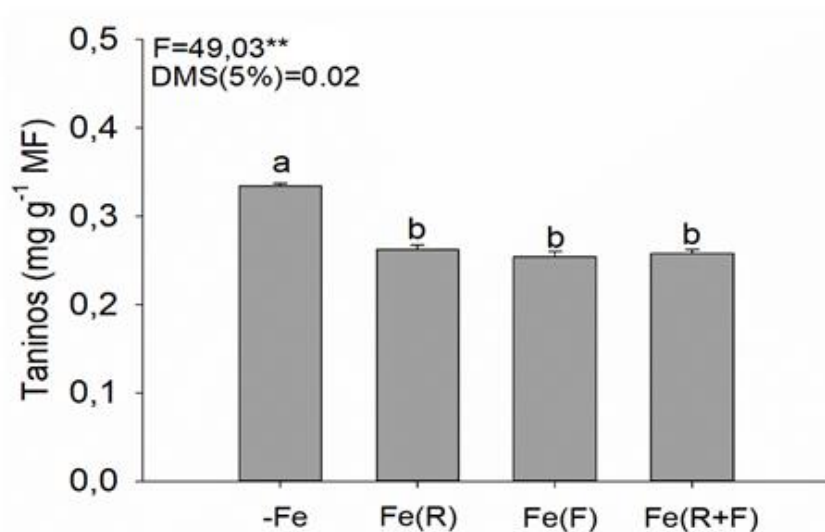


Figura 5. Teores de taninos em grãos de quinoa de acordo com diferentes formas de aplicação de Fe; controle sem aplicação de Fe (-Fe); aplicação radicular de Fe (R); aplicação foliar de Fe (F); aplicação combinada de Fe radicular e foliar (R+F). As letras indicam diferenças significativas entre as médias de aplicação de Fe ($p < 0,05$); valores de F da ANOVA: * $P < 0,05$; ** $P < 0,01$; diferença mínima significativas (DMS) ao 5%. As barras verticais representam erro padrão da média.

Como já mencionado os taninos são considerados compostos inibidores da biodisponibilidade de Fe (SILVA; SILVA, 1999), então, partindo desse pressuposto fica claro a relação antagônica entre eles, a partir do momento que a planta recebeu fornecimento de Fe tanto via solução nutritiva Fe (R), quanto a foliar Fe (F) e sua respectiva combinação Fe (R+F). Nesta variável, os modos de aplicação de Fe tiveram o mesmo efeito na redução das concentrações dos taninos nos grãos de quinoa, onde não houve diferença significativa entre os tratamentos biofortificados com Fe.

Nesse sentido, ficou elucidado que só aplicação de Fe através das folhas já se torna suficiente e efetiva na redução dos teores de taninos. Esses resultados concordam com outros estudos onde a aplicação foliar de Fe reduziu os compostos antinutrientes em grãos de cereais (FERNÁNDEZ; SOTIROPOULOS; BROWN, 2015; HUSSAIN et al., 2020).

Assim sendo, o modo de aplicação de Fe agiu diretamente nos resultados observados na (Figura 5), onde também foi comprovada a relação negativa que os taninos possuem com o Fe, pois, tratamento controle (- Fe) que não recebeu aplicação de Fe, apresentou os maiores níveis de taninos, como já era esperado (SILVA; SILVA, 1999).

Com relação aos resultados registrados nos teores de Fe em grãos de quinoa a aplicação em combinação de solução nutritiva mais foliar Fe (R+F) proporcionou maior valor em comparação aos demais tratamentos, conforme (Figura 6).

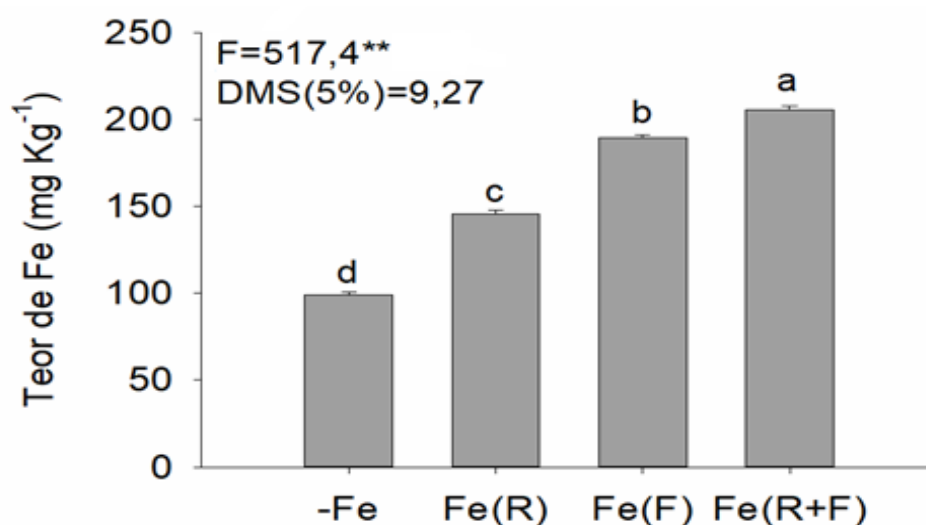


Figura 6. Teor de Fe em grãos de quinoa de acordo com diferentes formas de aplicação de Fe; controle sem aplicação de Fe (-Fe); aplicação radicular de Fe (R); aplicação foliar de Fe (F); aplicação combinada de Fe radicular e foliar (R+F). As letras indicam diferenças significativas entre as médias de aplicação de Fe ($p < 0,05$); valores de F da ANOVA: * $P < 0,05$; ** $P < 0,01$; diferenças mínimas significativa (DMS) em 5%. As barras verticais representam o erro padrão da média.

Esse resultado já era esperado, pois, mesmo que a aplicação via solução nutritiva não caracterize um potencial ganho de Fe nos grãos (ACIKSOZ et al., 2011; HUSSAIN et al., 2020), o fornecimento de Fe em combinação radicular e

foliar permite a entrada do nutriente por duas vias, e quando aplicadas em etapas específicas do desenvolvimento das plantas irá acarretar uma maior concentração do nutriente a planta e grãos posteriormente (HUSSAIN et al., 2020).

Vale destaque mais uma vez para a aplicação foliar que obteve o segundo melhor resultado nesta variável, apresentando excelentes resultados em comparação a aplicação radicular. Isto se deve a mobilidade mediana do Fe em cereais, logo, sua aplicação localizada incrementa os teores de Fe nos grãos da cultura (FERNÁNDEZ; SOTIROPOULOS; BROWN, 2015; HUSSAIN et al., 2020).

Já os teores de compostos antioxidantes, como o AsA nosso estudo revelou mais uma vez o predomínio do tratamento combinado de aplicação foliar e solução nutritiva de Fe (R+F) aumentando o teor de AsA nos grãos de quinoa para 112,35 mg 100mg MF (Figura 7).

O fato da aplicação de Fe (R+F) ter aumentado os níveis de AsA nos grãos de quinoa, pode ser explicado pelo papel do AsA na formação de complexos solúveis com íons de Fe (HE et al., 2013). Além disso, é sabido que o AsA pode melhorar a absorção do Fe, tanto em organismos humanos como em vegetais, exercendo papel fundamental no combate de enfermidades como as anemias acarretadas pela baixa ingestão de Fe (CANNIATTI-BRAZACA; MARTINI, 2002; CERQUEIRA; DE MEDEIROS; AUGUSTO, 2007; GERMANO, 2002).

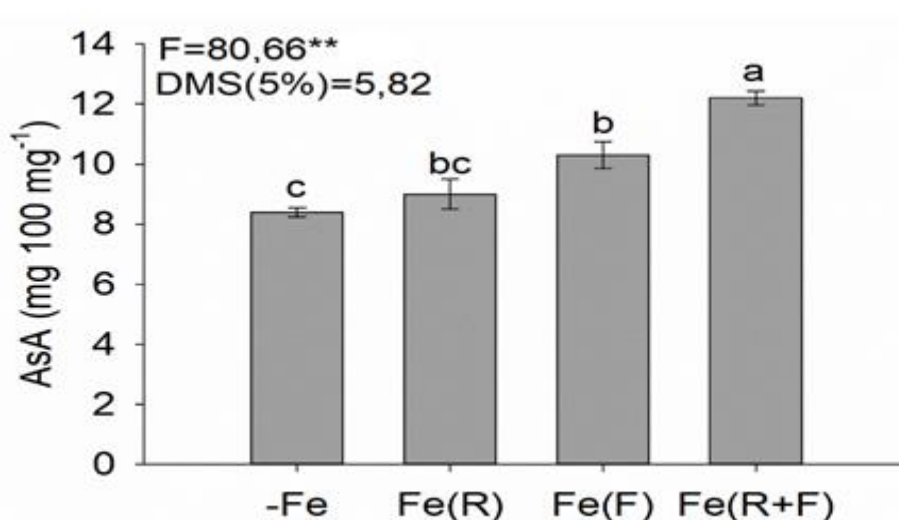


Figura 7. Teor de ácido ascórbico, em grãos de quinoa de acordo com diferentes formas de aplicação de Fe; controle sem aplicação de Fe (-Fe); aplicação radicular de Fe (R); aplicação foliar de Fe (F); aplicação combinada de Fe radicular e foliar (R+F). As letras indicam diferenças significativas entre as médias de aplicação de Fe ($p < 0,05$); valores de F da ANOVA: * $P < 0,05$; ** $P < 0,01$; diferença mínima significativa (DMS) em 5%. As barras verticais representam o erro padrão da média.

Mesmo sendo conhecido que o excesso de quaisquer nutriente pode vir a acarretar prejuízos em determinadas funções das plantas (JUCOSKI et al., 2016), uma maior concentração do mineral mediante as aplicações direcionadas do elemento, implicam em uma maior produção de cloroplastos e clorofilas e desse modo um maior aumento na taxa fotossintética possibilitando o melhor desenvolvimento da planta e assim uma maior produção de AsA (AKRAM; SHAFIQ; ASHRAF, 2017; AZIZ; AKRAM; ASHRAF, 2018; GEST; GAUTIER; STEVENS, 2013).

6 CONCLUSÃO

A aplicação foliar de Fe em relação a radicular é uma opção viável para promover alta produtividade de plantas de quinoa, a partir das melhorias fisiológicas e por promover maior biofortificação dos grãos com ferro.

O fornecimento de Fe via radicular associado a aplicações foliares em períodos determinantes do desenvolvimento da cultura destacou-se para promover melhor qualidade havendo maior biofortificação de grãos de quinoa com Fe e teor de ácido ascórbico nos grãos, mas não promoveu a maior produtividade.

Mediante as conclusões apresentadas o tema ainda demanda mais pesquisas sobre o assunto, afim de reafirmar os resultados encontrados nesse trabalho, com a avaliação de experimentos a nível de campo e testar outras fontes ou concentrações de Fe. Além disso, outros compostos antinutricionais, a exemplo dos ácidos fítics e antioxidantes como os flavonoides e as antocianinas que promovem efeitos benéficos à saúde humana e poderiam ser analisados nos grãos.

REFERÊNCIAS

- ACIKSOZ, S. B. et al. Biofortification of wheat with iron through soil and foliar application of nitrogen and iron fertilizers. **Plant and Soil**, v. 349, n. 1–2, p. 215–225, 2011.
- AKRAM, N. A.; SHAFIQ, F.; ASHRAF, M. Ascorbic acid-a potential oxidant scavenger and its role in plant development and abiotic stress tolerance. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, n. 2017.
- AQUINO, C. O mercado da quinoa no Brasil e investigação de artrópodes e outras matérias estranhas com o foco na segurança do alimento para o consumidor. p. 97, 2019.
- AZIZ, A.; AKRAM, N. A.; ASHRAF, M. Influence of natural and synthetic vitamin C (ascorbic acid) on primary and secondary metabolites and associated metabolism in quinoa (*Chenopodium quinoa Willd.*) plants under water deficit regimes. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 123, n. 2017, p. 192–203, 2018.
- AZIZ, M. Z. et al. Foliar application of micronutrients enhances crop stand, yield and the biofortification essential for human health of different wheat cultivars. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 18, n. 6, p. 1369–1378, 2019.
- BARBOSA, J. C.; MALDONADO JUNIOR, W, 2010. **AgroEstat: sistema para análises estatísticas de ensaios agrônômicos**. Jaboticabal: Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Unesp.
- BATAGLIA OC, FURLANI AMC, TEIXEIRA JPF, FURLANI PR, GALLO JR (1983) **Métodos de análise química de plantas**. Métodos de análises química de plantas. Campinas.
- BAZILE, D. ET AL (EDITOERES). **Estado del arte de la quinua en el mundo en 2013**. [s.l: s.n.].
- BOUIS, H. E.; SALTZMAN, A. Improving nutrition through biofortification: A review of evidence from HarvestPlus, 2003 through 2016. **Global Food Security**, v. 12, n, p. 49–58, 2017.
- CANNIATTI-BRAZACA, S. G.; MARTINI, F. C. C. Comparação da disponibilidade de ferro na presença de vitamina a e β -caroteno em alimentos e medicamentos. **Ciencia e Tecnologia de Alimentos**, v. 31, n. 2, p. 334–340, 2002.
- CERQUEIRA, F. M.; DE MEDEIROS, M. H. G.; AUGUSTO, O. Antioxidantes dietéticos: Controvérsias e perspectivas. **Quimica Nova**, v. 30, n. 2, p. 441–449, 2007.
- DAS A, RAYCHAUDHURI U, CHAKRABORTY R. Cereal basead functional food of indian subcontinent: a review. **J Food Sci Tech**.2011.
- DINI, I.; TENORE, G. C.; DINI, A. Antioxidant compound contents and antioxidant activity before and after cooking in sweet and bitter *Chenopodium quinoa* seeds. **LWT- Food Science and Techonology**, v. 43, n. 3, p. 447-451, 2010.
- FERNÁNDEZ, V.; EBERT, G. Foliar iron fertilization: A critical review. **Journal of Plant Nutrition**, v. 28, n. 12, p. 2113–2124, 2005.
- FERNÁNDEZ, V.; SOTIROPOULOS, T.; BROWN, P. **Adubação foliar: Fundamentos científicos e técnicas de campo**. [s.l: s.n.], 2015.
- FILHO, O. F. DE L. et al. Limpeza de Areia para Experimentos em Nutrição de Plantas. **Comunidade Técnico - Embrapa Agropecuária Oeste**, n. 232, p. 1–

5, 2018.

GARCÍA-TIRADO, J.; RIEGER-REYES, C.; SAZ-PEIRÓ, P. Efecto de los flavonoides em la prevención del cáncer de pulmón: Revisión sistemática. **Medicina Clínica**, v. 139, n. 8, p. 358-363, 2012.

GERMANO, R. M. D. A. Disponibilidade de ferro na presença do β -caroteno e o efeito dos interferentes em combinações de alimentos. p. 95, 2002.

GEST, N.; GAUTIER, H.; STEVENS, R. Ascobarto visto pela evolução da planta: o surgimento de uma molécula de sucesso? **Journal of Experimental Botany**, v. 64, n. 2, p. 33–53, 2013.

GEWEHR, M. F. et al. Análises químicas em flocos de quinoa: caracterização para a utilização em produtos alimentícios. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 15, n. 4, p. 280–287, 2012.

GORDILHO-BASTIDAS E, DÍAZ-RIZZOLO DA, ROURA E, MASSANÉS T, GOMIS R. Quinoa (*Chenopodium quinoa Willd*), from Nutritional Value to Potential Health Benefits: An Integrative Review. **Journal of Nutrition & Food Sciences**, v. 06, n. 03, 2016.

GHAFAARI, H.; RAZMJOO, J. Effect of Foliar Application of Nano-iron Oxidase , Iron Chelate and Iron Sulphate Rates on Yield and Quality of Wheat. **International Journal of Agronomy and Plant Production**, v. 4, n. 11, p. 2997–3003, 2013.

HE, W. et al. Iron concentration, bioavailability, and nutritional quality of polished rice affected by different forms of foliar iron fertilizer. **Food Chemistry**, v. 141, n. 4, p. 4122–4126, 2013.

HOAGLAND, D.R.; ARNON, D.L., 1950. The water culture methods for growing plants without soil. **Circular**, v. 347, p. 32.

HOTZ, C.; MCCLAFFERTY, B. From harvest to health: Challenges for developing biofortified staple foods and determining their impact on micronutrient status. **Food and Nutrition Bulletin**, v. 28, n. 2 SUPPL., p. 271–279, 2007.

HUSSAIN, S. et al. Biofortification and estimated human bioavailability of zinc in wheat grains as influenced by methods of zinc application. **Plant and Soil**, v. 361, n. 1–2, p. 279–290, 2012.

HUSSAIN, S. et al. Biofortification of Cereals through Foliar Application of Minerals. **Vitamins and Minerals Biofortification of Edible Plants**, n. Stein 2010, p. 191–221, 2020.

IDRIS WH, ABDELRAHAMAN SM, ELMAKI, BABIKER EE, EL TINAY AH. Effect of malt preteament on phytates and tannin level of two sorghoum (*Sorghoum bicolor*) cultivars. *Int J Food Sci Tech*. 2006; 41: 1229-1233.

INSTITUTO BOLIVIANO DE COMERCIO EXTERIOR (IBCE). **Boletím Electrónico Bisemanal**, n. 923, 2021. Disponível em: <<https://ibce.org.bo/publicaciones-ibcecifras-pdf.php?id=876>>. Acesso em 09 de Abril.2021.

JUCOSKI, G. DE O. et al. Excess iron on growth and mineral composition in *Eugenia uniflora* L. **Revista Ciencia Agronomica**, v. 47, n. 4, p. 720–728, 2016.

KOBAYASHI, T.; NOZOYE, T.; NISHIZAWA, N. K. Iron transport and its regulation in plants. **Free Radical Biology and Medicine**, v. 133, n. 2018, p. 11–20, 2019.

KOZIOŁ, M. J. Chemical composition and nutritional evaluation of quinoa (*Chenopodium quinoa Willd.*). **Journal of Food Composition and Analysis**, v.

5, n. 1, p. 35–68, 1992.

LICHTENTHALER, H. K, 1987. Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes. *Methods Enzymol*, v. 148, p. 350-382.

LIU, G.; HANLON, E.; LI, Y. Understanding and Applying Chelated Fertilizers Effectively Based on Soil pH. **Horticultural Sciences Department, Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida**, n, p. 1–7, 2012.

MÁRQUEZ-QUIROZ, C. et al. Biofortification of cowpea beans with iron: Iron's influence on mineral content and yield. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 15, n. 4, p. 839–847, 2015.

MARTÍNEZ, A. Quinoa: Aspectos nutricionales del arroz de los incas In: BAZILE, D. et al. (EDITORES). **Estado de la arte de la quinua en el mundi em 2013**. FAO: Santiago, Chile e CIRAD: Montpellier, Francia, 2014. p. 331-341.

MINISTÉRIO DE AGRICULTURA E IRRIGAÇÃO PERUANA. **Plataforma única digital única del estado de peruano**. Disponível em:<<https://www.gob.pe/institucion/midagri/noticias/324394-el-peru-se-consolida-como-el-primeir-productor-y-exportador-mundial-de-quinua>> Acesso em 09 de Abril. 2021.

MOLASSIOTIS, A. et al. Effects of 4-month Fe deficiency exposure on Fe reduction mechanism, photosynthetic gas exchange, chlorophyll fluorescence and antioxidant defense in two peach rootstocks differing in Fe deficiency tolerance. **Journal of Plant Physiology**, v. 163, n. 2, p. 176–185, 2006.

MUJICA, A, CHURA, E, MARTINEZ, R. Mecanismos de resistencia a seuia de la quinua (*Chenopodium quinoa Wild*). **Primer congreso peruano de mejoramiento genético y biotecnología agrícola**, p. 117–121, 2010.

PANSERA, M. et al. Caracteres morfo-anatômicos de folha e caule de Bauhinia microstachya Análise de taninos totais em plantas aromáticas e medicinais cultivadas no Nordeste do Rio Grande do Sul. **revista Brasileira de Farmacognosia**, v. 13, p. 17–22, 2003.

PRADO, R.M. Mineral nutrition of tropical plants. Switzerland: **Springer Nature**, 2021. 339p.

RAES, K. et al. Role of processing on bioaccessibility of minerals: Influence of localization of minerals and anti-nutritional factors in the plant. **Trends in Food Science and Technology**, v. 37, n. 1, p. 32–41, 2014.

RAMZANI, P. M. A. et al. Iron biofortification of wheat grains through integrated use of organic and chemical fertilizers in pH affected calcareous soil. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 104, p. 284–293, 2016.

SCHMIDT, W.; THOMINE, S.; BUCKHOUT, T. J. Editorial: Iron Nutrition and Interactions in Plants. **Frontiers in Plant Science**, v. 10, n. p. 1–4, 2020.

SILVA, M. R.; SILVA, M. A. A. P. DA. Aspectos nutricionais de fitatos e taninos. **Revista de Nutrição**, v. 12, n. 1, p. 21–32, 1999.

SPEHAR, C, SANTOS, R, NASSER, L. Diferenças entre *Chenopodium quinoa* e a planta daninha *Chenopodium album*. v. 21, n. 3, p. 487–491, 2003.

SPEHAR, C, SANTOS, R. NOVAS CULTIVARES Quinoa BRS Piabiru : alternativa para diversificar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, n. 1, p. 889–893, 2002.

SPEHAR, C. R.; ROCHA, J. E. DA S.; SANTOS, R. L. DE B. Desempenho Agrônômico E Recomendações Para Cultivo De Quinoa (Brs Syetetuba) No

- Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 41, n. 1, p. 145–147, 2011.
- STOHECKER, R., HENNING, H.M. Analisis de vitaminas: métodos comprobados. Madrid: Paz Montalvo, 1967. 428p.
- TROISI, J.; DI FIORE, R.; PULVENTO, C.; D'ADRIA, R.; VEJA-GÁLVEZ, A.; MIRANDA, M.; MARTÍNEZ, E.A.; LAVINI, A. Saponinas In: BAZILE, D. et al. (EDITOERES). **Estado de la arte de la quinua en el mundo em 2013**. FAO: Santiago, Chile e CIRAD: Montpellier, Francia, 2014. p. 317-330.
- VASCONCELOS, M. W.; GRUISSEM, W.; BHULLAR, N. K. Iron biofortification in the 21st century: setting realistic targets, overcoming obstacles, and new strategies for healthy nutrition. **Current Opinion in Biotechnology**, v. 44, p. 8–15, 2017.
- VELU, G. et al. Biofortification strategies to increase grain zinc and iron concentrations in wheat. **Journal of Cereal Science**, v. 59, n. 3, p. 365–372, 2014.