

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO - CAMPUS RIO VERDE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS -
AGRONOMIA

**SENSORES PORTÁTEIS PARA AVALIAÇÃO DO
NITROGÊNIO NA SOJA E AVALIAÇÃO DO
CRESCIMENTO DE RAIZ DE MILHO COM
BIOESTIMULANTE**

Autora: MSc. Polyanna Ribeiro Trindade
Orientador: Prof. DSc. Carlos Ribeiro Rodrigues

RIO VERDE - GO
Novembro - 2020

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO - CAMPUS RIO VERDE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS -
AGRONOMIA

**SENSORES PORTÁTEIS PARA AVALIAÇÃO DO
NITROGÊNIO NA SOJA E AVALIAÇÃO DO
CRESCIMENTO DE RAIZ DE MILHO COM
BIOESTIMULANTE**

Autora: MSc. Polyanna Ribeiro Trindade
Orientador: Prof. DSc. Carlos Ribeiro Rodrigues

Tese apresentada como parte das exigências para obtenção do título de DOUTORA EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS - AGRONOMIA no Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias - Agronomia do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde – Área de concentração Produção Vegetal Sustentável do Cerrado.

Rio Verde - GO
Novembro - 2020

Sistema desenvolvido pelo ICMC/USP
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas - Instituto Federal Goiano

T833s Trindade, Polyanna Ribeiro
Sensores portáteis para avaliação do nitrogênio na
soja e avaliação do crescimento de raiz de milho com
bioestimulante / Polyanna Ribeiro Trindade;
orientador Carlos Ribeiro Rodrigues; co-orientador
Gustavo Castoldi. -- Rio Verde, 2021.
120 p.

Tese (Doutorado em Ciências Agrárias - Agronomia)
-- Instituto Federal Goiano, Campus Rio Verde, 2021.

1. fluorescência da clorofila. 2. fotossíntese. 3.
gessagem. 4. calagem. 5. *Ascophyllum nodosum*. I.
Rodrigues, Carlos Ribeiro, orient. II. Castoldi,
Gustavo, co-orient. III. Título.

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| <input checked="" type="checkbox"/> Tese | <input type="checkbox"/> Artigo Científico |
| <input type="checkbox"/> Dissertação | <input type="checkbox"/> Capítulo de Livro |
| <input type="checkbox"/> Monografia – Especialização | <input type="checkbox"/> Livro |
| <input type="checkbox"/> TCC - Graduação | <input type="checkbox"/> Trabalho Apresentado em Evento |
| <input type="checkbox"/> Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Polyanna Ribeiro Trindade

Matrícula: 2016102320140046

Título do Trabalho: Sensores portáteis para avaliação do nitrogênio na soja e avaliação do crescimento de raiz de milho com bioestimulante.

Restrições de Acesso ao Documento

Documento confidencial: Não Sim, justifique: _____

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: 01/05/2021

O documento está sujeito a registro de patente? Sim Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? Sim Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

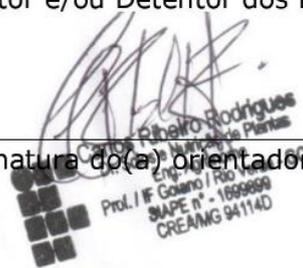
- o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Rio Verde, 27/04/2021.

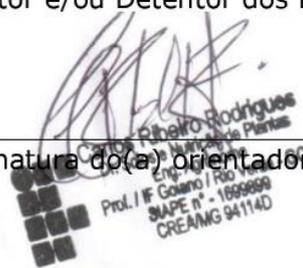


Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

Ciente e de acordo:



Assinatura do(a) orientador(a)





SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Ata nº 60/2020 - NREPG-RV/CPG-RV/DPGPI-RV/CMPRV/IFGOIANO

ATA Nº/73 BANCA EXAMINADORA DE DEFESA DE TESE

Aos vinte e seis dias do mês de novembro do ano de dois mil e vinte, às 07:00h (sete horas), reuniram-se os componentes da Banca Examinadora: Prof. Dr. Carlos Ribeiro Rodrigues (Orientador), Prof. Dr. Gustavo Castoldi (Avaliador interno), Prof^ª. Dra. Virgínia Damin (Avaliadora externa), Dra. Mellissa Ananias Soler da Silva (Avaliadora externa), e Dr. Carlos Henrique dos Santos (Avaliador externo), sob a presidência do(a) primeiro(a), em sessão pública realizada por vídeo conferência do IF Goiano – Campus Rio Verde, para procederem a avaliação da defesa de Tese, em nível de Doutorado, de autoria de **POLYANNA RIBEIRO TRINDADE**, discente do Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias – Agronomia do Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde. A sessão foi aberta pelo(a) presidente da Banca Examinadora, Prof. Dr. Carlos Ribeiro Rodrigues, que fez a apresentação formal dos membros da Banca. A palavra, a seguir, foi concedida o(a) autor (a) da Tese para, em 40 min., proceder à apresentação de seu trabalho. Terminada a apresentação, cada membro da banca arguiu o(a) examinado(a), tendo-se adotado o sistema de diálogo sequencial. Terminada a fase de arguição, procedeu-se a avaliação da defesa. Tendo-se em vista as normas que regulamentam o Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias – Agronomia, e procedidas às correções recomendadas, a Tese foi APROVADA, considerando-se integralmente cumprido este requisito para fins de obtenção do título de **DOCTOR(a) EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS-AGRONOMIA**, na área de concentração Produção Vegetal Sustentável no Cerrado, pelo Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde. A conclusão do curso dar-se-á quando da entrega na secretaria do PPGCA-AGRO da versão definitiva da Tese, com as devidas correções. Assim sendo, esta ata perderá a validade se não cumprida essa condição, em até **60** (sessenta) dias da sua ocorrência. A Banca Examinadora recomendou a publicação dos artigos científicos oriundos dessa Tese em periódicos de circulação nacional e/ou internacional, após procedida as modificações sugeridas. Cumpridas as formalidades da pauta, a presidência da mesa encerrou esta sessão de defesa de Tese de Doutorado, e para constar, eu, Vanilda Maria Campos, secretária do PPGCA-AGRO, lavrei a presente Ata, que, após lida e achada conforme, será assinada pelos membros da Banca Examinadora em três vias de igual teor.

Prof. Dr. Carlos Ribeiro Rodrigues (Presidente)
Prof. Dr. Gustavo Castoldi (Membro interno)
Prof^ª. Dra. Virgínia Damin (Membro externo)
Dra. Mellissa Ananias Soler da Silva (Membro externo)
Prof. Dr. Carlos Henrique dos Santos (Membro externo)

Documento assinado eletronicamente por:

- **Virgínia Damin, Virgínia Damin - 203405 - Pesquisador das ciências agrárias - Universidade Federal de Goiás (01567601000143)** em 26/11/2020 14:27:23.
- **CARLOS HENRIQUE DOS SANTOS, CARLOS HENRIQUE DOS SANTOS - 203405 - Pesquisador das ciências agrárias - Associação Prudentina de Educação e Cultura (44860740000173)**, em 26/11/2020 14:27:21.
- **Mellissa Ananias Soler da Silva, Mellissa Ananias Soler da Silva - 203405 - Pesquisador das ciências agrárias - Embrapa Arroz e Feijão (00348003001435)**, em 26/11/2020 14:26:41.
- **Gustavo Castoldi, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 26/11/2020 14:26:08.
- **Carlos Ribeiro Rodrigues, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 26/11/2020 14:23:54.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 25/11/2020. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 214830
Código de Autenticação: 6898239ee3



INSTITUTO FEDERAL GOIANO
Campus Rio Verde
Rodovia Sul Goiana, Km 01, Zona Rural, None, RIO VERDE / GO, CEP 75901-970
(64) 3620-5600



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Documentos 19/2020 - DPGPI-RV/CMPRV/IFGOIANO

SENSORES PORTÁTEIS PARA AVALIAÇÃO DO NITROGÊNIO NA SOJA E AVALIAÇÃO DO CRESCIMENTO DE RAÍZ DE MILHO COM BIOESTIMULANTE

Autora: Polyanna Ribeiro Trindade
Orientador: Dr. Carlos Ribeiro Rodrigues

TITULAÇÃO: Doutorado em Ciências Agrárias-Agronomia - Área de
Concentração em Produção Vegetal Sustentável no Cerrado

APROVADA em 26 de novembro de 2020.

Prof. Dr. Carlos Ribeiro Rodrigues (Presidente)
Prof. Dr. Gustavo Castoldi (Membro interno)
Prof^a. Dra. Virgínia Damin (Membro externo)
Dra. Mellissa Ananias Soler da Silva (Membro externo)
Prof. Dr. Carlos Henrique do Santos (Membro externo)

Documento assinado eletronicamente por:

- **Virgínia Damin, Virgínia Damin - 203405 - Pesquisador das ciências agrárias - Universidade Federal de Goiás (01567601000143)**, em 26/11/2020 14:18:12.
- **CARLOS HENRIQUE DOS SANTOS, CARLOS HENRIQUE DOS SANTOS - 203405 - Pesquisador das ciências agrárias - Associação Prudentina de Educação e Cultura (44860740000173)**, em 26/11/2020 14:18:06.
- **Mellissa Ananias Soler da Silva, Mellissa Ananias Soler da Silva - 203405 - Pesquisador das ciências agrárias - Embrapa Arroz e Feijão (00348003001435)**, em 26/11/2020 14:17:55.
- **Gustavo Castoldi, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 26/11/2020 14:17:39.
- **Carlos Ribeiro Rodrigues, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 26/11/2020 14:16:08.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 26/11/2020. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 215355
Código de Autenticação: ad392a4465



INSTITUTO FEDERAL GOIANO
Campus Rio Verde
Rodovia Sul Goiana, Km 01, Zona Rural, None, RIO VERDE / GO, CEP 75901-970
(64) 3620-5600

DEDICO

A Deus,
Pelos milagres operados,
Pela minha família, e por todos os sonhos realizados.
Ao meu pai Ricardo Trindade da Silva (*in memoriam*).
E aos meus avôs Lécio Ribeiro Peixoto (*in memoriam*) e
Rivaldo Belo da Silva (*in memoriam*),
Por me cuidarem de longe.

OFEREÇO

Ao meu noivo Phelippe Mendonça de Paiva,
À minha mãe Raquel Ribeiro Pereira,
Às minhas irmãs Lara Rodrigues Lima Ribeiro
e Maria Clara Ribeiro Badini,
Às minhas avós Leni Regina Pereira Ribeiro e Ruth Trindade da Silva.
Ao meu Orientador Carlos Ribeiro Rodrigues.

“Sempre antes de realizar um sonho, a Alma do Mundo resolve testar tudo aquilo que foi aprendido na caminhada.” - Paulo Coelho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela força durante a caminhada, por todos os milagres operados e por me guiar nos momentos difíceis.

Agradeço ao CNPq, pela bolsa de estudos, à CAPES, pela bolsa de doutorado sanduíche, à Universidade de Nottingham por me receber com tanto carinho e ao IFGoiano – Campus Rio Verde, pela oportunidade de cursar o doutorado, pelos últimos sete anos de caminhada, por ter se tornado meu segundo lar e minha segunda família.

À minha mãe, Raquel Ribeiro Pereira e avó, Leni Regina Pereira Ribeiro pelo apoio, ajuda e aconselhamentos, pela compreensão da minha ausência e cansaço constantes, pela celebração de cada pequena vitória e consolação nas pequenas derrotas. Às minhas irmãs, Lara Rodrigues Lima Ribeiro e Maria Clara Ribeiro Badini, por me ajudarem a levar a vida de forma mais leve e pela companhia constante.

Ao meu avô Lécio, que sempre foi o meu pai de coração, por ter investido em minha educação, por ter cuidado de mim sempre, por ter me aconselhado e apoiado, por sempre demonstrar seu orgulho de meus estudos. Mesmo sem ter vivido suficiente para me ver formada, tenho certeza que ainda acompanha a minha trajetória de aonde estiver, e que se orgulharia de me ver concluindo o doutorado.

Ao meu noivo, Phelippe Mendonça de Paiva, por ser meu porto seguro. Por me ajudar a levantar em todas as quedas e estar sempre comigo, mesmo com meus sonhos me levando para outro continente por um ano. Pelos conselhos e opiniões sinceras, por me ouvir quando eu precisava ser escutada, pelo apoio em todos os momentos em que duvidei de mim mesma e pela paciência e compreensão inabaláveis.

À minha amiga Ellen Cristina da Silva, pela imensa paciência com meus surtos durante os últimos cinco anos, por fazer minha vida mais leve, pelos conselhos, carinho e companhia. Boa parte dessa conquista também é sua.

Ao meu orientador, Carlos Ribeiro Rodrigues, por ter sido quase um pai nos últimos sete anos. Por ter me apoiado em todas as decisões e se preocupado comigo,

principalmente enquanto eu estava morando em outro país. Por todos os ensinamentos, pela confiança depositada em mim, pelo apoio, companhia, inspiração profissional, paciência, compreensão e pela grande amizade, que com certeza seguirá por muitos anos.

Ao professor Sacha Mooney, por ter me recebido com tanto carinho como orientada em Nottingham, por toda a ajuda, pelo conhecimento compartilhado e pela confiança.

Ao professor Gustavo Castoldi, por toda a ajuda, apoio, conselhos e pela amizade e companhia.

Aos meus colegas de laboratório, que se tornaram todos queridos amigos, Kássia de Paula Barbosa, Tâmara Pontes Abreu, Renato Gouveia, Vítor Veneziano, Guilherme Goulart, Geovani Caetano e Raphael Lopes do Couto, pela imensa ajuda na condução do meu experimento, pela ajuda com as análises, por todas as risadas, pelo apoio e por terem feito minha experiência no doutorado muito mais leve, pois sempre soube que podia contar com vocês.

Aos amigos que fiz durante o intercâmbio, Anne Rocha, Brian Atkins, Hayat Al-Jabiry, Martha Ledger, Alex Williams, Sam Booth, Hannah Cooper, Olivia Cousins, Caroline Roy, Enora Le Berre, Julie Lê Quan Tho. Não há espaço suficiente para agradecer a todos vocês por terem se tornado minha família longe de casa. Por terem cuidado de mim quando fiquei doente, por celebrarem comigo as conquistas e chorarem as derrotas, pela companhia e carinho enquanto eu estava longe de casa. Guardarei vocês comigo pra sempre.

BIOGRAFIA DA AUTORA

Polyanna Ribeiro Trindade, nasceu em Quirinópolis – GO, em 20 de março de 1991, filha de Raquel Ribeiro Pereira Trindade e Ricardo Trindade da Silva.

Cursou Engenharia Ambiental na Universidade de Rio Verde, graduando em agosto de 2013.

Em 2014 ingressou no IF Goiano – Campus Rio Verde, no programa de pós-graduação *Stricto Sensu*, Mestrado em Ciências Agrárias – Agronomia, com linha de pesquisa em tecnologias sustentáveis em sistemas de produção e uso do solo e água sob orientação do Prof. Dr. Carlos Ribeiro Rodrigues. Em fevereiro de 2016 obteve diploma de Mestre em Ciências Agrárias – Agronomia.

Em março de 2016 ingressou no curso de Doutorado Ciências Agrárias – Agronomia, no IF Goiano – Campus Rio Verde sob orientação do Prof. Dr. Carlos Ribeiro Rodrigues. Entre setembro de 2018 e setembro de 2019 foi bolsista sanduíche na Universidade de Nottingham – Inglaterra sob orientação do Prof. Dr. Sacha Mooney.

No ano de 2020, defendeu sua tese de doutorado, parte indispensável para a obtenção do diploma de Doutora em Ciências Agrárias – Agronomia.

ÍNDICE GERAL

ÍNDICE DE TABELAS	xv
ÍNDICE DE FIGURAS	xvii
ÍNDICE DE APÊNDICES	xx
LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIACÕES E UNIDADES	xxii
RESUMO.....	xxiv
ABSTRACT.....	xxvi
1. INTRODUÇÃO GERAL	3
1.1. Sensores portáteis e nutrição nitrogenada	3
1.2. Bioestimulantes.....	7
2. REFERÊNCIAS.....	11
3. OBJETIVOS	16
3.1. Geral.....	16
3.2. Específicos.....	16
4. CAPÍTULO I:	17
SENSORES PORTÁTEIS DE CLOROFILA, FLUORESCÊNCIA, E IMAGENS DE CÂMERA MULTIESPECTRAL NA ESTIMAÇÃO DA NUTRIÇÃO NITROGENADA E PRODUTIVIDADE DE GRÃOS NA CULTURA DA SOJA.....	17
4.1. INTRODUÇÃO	20
4.2. METODOLOGIA	21
4.3. RESULTADOS.....	26
4.4. DISCUSSÃO	31
4.4.1. Componentes principais	33
4.5. CONCLUSÃO	39
4.6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39

CAPÍTULO II:	45
EFEITOS DO <i>ASCOPHYLLUM NODOSUM</i> E CORREÇÃO DE SOLO NO DESENVOLVIMENTO DE PLÂNTULAS DE MILHO CULTIVADAS SOB TOXIDEZ DE ALUMÍNIO.....	45
4.7. INTRODUÇÃO	48
4.8. METODOLOGIA	49
4.8.1. Experimento I	50
4.8.2. Experimento II	52
4.9. RESULTADOS.....	54
4.9.1. Experimento I	54
5.3.2. Experimento II	67
5.4. DISCUSSÃO	70
5.5. CONCLUSÕES	75
5.6. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	76
6. CONCLUSÃO GERAL	81
6.1. APÊNDICE A: CAPÍTULO I.....	83
6.2. APÊNDICE B: CAPÍTULO II.....	88

ÍNDICE DE TABELAS

CAPÍTULO I

TABELA 1 Características químicas e físicas do solo amostrado nas áreas avaliadas.....	21
TABELA 2 Índices de fluorescência de clorofila a obtidos com o FluorPen FP100	24
TABELA 3 Índices espectrais de vegetação utilizados neste estudo e suas fórmulas.....	25
TABELA 4 Coeficientes de correlação entre as coordenadas individuais de cada tratamento nas componentes principais (CP) 1 a 5 e as médias das variáveis obtida em cada tratamento.....	34

CAPÍTULO II

TABELA 1 Caracterização química e granulométrica do horizonte B do LATOSSOLO VERMELHO Distrófico (LVd), utilizado nos Experimentos I e II.....	49
TABELA 2 Resumo da ANOVA (Quadrado médio) das variáveis de crescimento: peso seco de parte aérea (SDW) (g plant^{-1}) e raiz (RDW) (g plant^{-1}), altura (Height) (cm), número de folhas (LQ), diâmetro da base do caule (mm), superfície de raiz (mm^2) e volume de raiz (mm^3).....	55
TABELA 3 Resumo da ANOVA (Quadrado médio) das variáveis nutricionais: Acúmulo de N, C, Mg, P, S, Ca, K e Al (mg plant^{-1}) na parte aérea e raízes de mudas de milho com 14 dias (estádio V2) sob os tratamentos de correção (Amendment), e suas interações com a aplicação de extrato de <i>Ascophyllum nodosum</i> (An).....	58
TABELA 4 Resumo da ANOVA (Quadrado médio) das variáveis de partição de C para parte aérea e raiz, e transporte do C, N, P, K, Ca, Mg, S e Al (mg plant^{-1}).....	61
TABELA 5 Resumo da ANOVA (Quadrado Médio) das variáveis de teor relativo de clorofila (Relative Chl) determinado por SPAD, índices de fluorescência determinados por Fluorpen FP110 e índices de fotossíntese determinados através de leitura com LiCor (LI 6400-XT).....	63

TABELA 6 Resumo da ANOVA (Quadrado médio) das variáveis de crescimento: peso seco de parte aérea (SDW) (g plant^{-1}) e raiz (RDW) (g plant^{-1}), superfície de raiz (Root Surface) (cm^2), profundidade de raiz (Root Depth) (cm) e das variáveis acúmulo de nitrogênio (N) em parte aérea (NCS) e em raiz (NCR) (mg planta^{-1}), e transporte de N na planta (%).66

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO I

FIGURA 1 Gráfico de precipitação acumulada mensal e temperaturas máximas e mínimas médias mensal no município de Rio Verde – GO durante os meses de plantio da soja nas safras 2017/2018 e 2018/2019. Fonte: INMET (2021).....22

FIGURA 2 Correlação entre a produtividade de grãos da soja (PG) (kg ha⁻¹) e o teor foliar de N em R3 (g kg⁻¹) (A), o número de vagens por planta (B) e o peso de mil grãos (PMG) (C).....26

FIGURA 3 Correlação entre os teores foliares de nitrogênio (N) (g kg⁻¹) (eixo x) e os índices (eixo y) obtidos com o clorofilômetro: clorofila a (ChlA), b (ChlB) e total (ChlT), e relação ChlA:ChlB; com o fluorômetro: Fo, Fj, Fi, Fm, Fv, Vj, Vi, Fm/Fo, Fv/Fo, Mo, Area, FixArea, Sm, Ss, N_{fluo}, Φ_{Po}, Ψ_O, Φ_{Eo}, Φ_{Do}, Φ_{Pav}, Π_{ABS}, ABS/RC, TR₀/RC, ET₀/RC e DI₀/RC; com câmeras multiespectrais: NDVI, CVI, CCCI, DVI e WDRVI. **, * e ^{ns}Significativo a 1 e 5% e não significativo, respectivamente pelo teste de F.....28

FIGURA 4 Correlação entre a Produtividade de grãos (kg ha⁻¹) (eixo x) e os índices (eixo y) obtidos com o clorofilômetro: clorofila a (ChlA), b (ChlB) e total (ChlT), e relação ChlA:ChlB; com o fluorômetro: Fo, Fj, Fi, Fm, Fv, Vj, Vi, Fm/Fo, Fv/Fo, Mo, Area, FixArea, Sm, Ss, N_{fluo}, Φ_{Po}, Ψ_O, Φ_{Eo}, Φ_{Do}, Φ_{Pav}, Π_{ABS}, ABS/RC, TR₀/RC, ET₀/RC e DI₀/RC; com câmeras multiespectrais: NDVI, CVI, CCCI, DVI e WDRVI. **, * e ^{ns}Significativo a 1 e 5% e não significativo, respectivamente pelo teste de F.....30

FIGURA 5 Autovalores e porcentagem acumulativa da variância das componentes principais 1 a 5 com todas as variáveis (A e B, respectivamente), e somente com as variáveis com correlação significativa a 1 e 5% (pelo teste de F) com as coordenadas das componentes principais (C e D, respectivamente).....32

FIGURA 6 Mapa de projeção espacial da ordenação dos vetores dos componentes principais CP1 e CP2 por contribuição na variação dos dados (A), em que: Fo – fluorescência a 50 μs; Fj - fluorescência a 2 ms; Fi - fluorescência a 60 ms; Fm – fluorescência máxima; Vj – fluorescência variável a 2 ms; Vi - fluorescência variável a 60 ms; Fm.Fo – Produção quântica basal dos processos não fotoquímicos no PSII; Fv.Fo

– eficiência quântica potencial do PSII; Mo - taxa líquida do fechamento dos centros de reação do PSII; Area - quantidade de aceptores de elétrons; Ss - quantidade de energia necessária para reduzir a Q_A uma única vez; Phi_Po (Φ_{Po}) - eficiência máxima do PSII; Psi_o (Ψ_o) - probabilidade da energia de excitação mover um elétron após a Q_A ; Phi_Eo (Φ_{Eo}) - probabilidade da energia de um fóton absorvido mover um elétron após a Q_A ; Phi_Do (Φ_{Do}) - rendimento de dissipação de energia; Phi_Pav (Φ_{Pav}) - rendimento quântico médio de reações fotoquímicas primárias; Prod – produtividade de grãos ($kg\ ha^{-1}$); e ajuste de modelos da contribuição individual de cada tratamento com as componentes principais (CP1 e CP2) em função das doses de N ($L\ ha^{-1}$) (B e C). ***, ** e * Significativo a 1, 5 e 10%, respectivamente, pelo teste de F.....35

FIGURA 7 Produtividade média da soja das três áreas avaliadas em função das doses de N. ***, ** e * Significativo a 1, 5 e 10%, respectivamente, pelo teste de F.....37

CAPÍTULO II

FIGURA 1 Crescimento inicial do milho cv. ARCADE®: peso seco de parte aérea (SDW) e raiz (RDW) ($g\ planta^{-1}$) (A), altura de plantas (Height) (cm) (B) e superfície de raiz (mm^2) (C), em função dos tratamentos de correção do solo e com aplicação de *A. nodosum*. Nottingham, 2019.....56

FIGURA 2 Imagens de raiz de plantas de milho aos 14 dias após a germinação (estádio V2) obtidas por tomografia computadorizada de Raio X 3D. A – Gypsum; B – Gypsum e *A. nodosum*; C – Liming; D – Liming e *A. nodosum*; E – Liming and Gypsum; F – Liming and Gypsum and *A. nodosum*; G – Control; H - *A. nodosum*. Nottingham, 2019.....58

FIGURA 3 Acúmulo de macronutrientes na parte aérea e raiz das plantas em função dos tratamentos de correção do solo e com aplicação de *A. nodosum*. Nottingham, 2019.....60

FIGURA 4 Partição de C (A) e transporte (%) de N e S (B), K e Ca (C) e Al (D) em função dos tratamentos de correção do solo e com aplicação de *A. nodosum*. Nottingham, 2019.....62

FIGURA 5 Índice SPAD de clorofila (Relative Chl) determinado por SPAD, índices de fluorescência variável (V_i e V_j), taxa líquida do fechamento dos centros de reação do PSII (Mo), quantidade de energia necessária para simples *turn over* (Ss), probabilidade da energia de excitação mover um elétron após a Quinona a (Ψ_o), probabilidade da energia de um fóton absorvido mover um elétron após a Quinona a (Φ_{Eo}), índice de desempenho (π_{ABS}), fluxo de absorção (ABS/RC), captura (TRo/RC) e transporte de elétrons (Dio/RC) determinados pelo Fluorpen FP110 em função dos tratamentos de correção do solo. Nottingham, 2019.....65

FIGURA 6 Fotossíntese Líquida (A), condutância estomática (gS), transpiração (E) e déficit de pressão de vapor (VPD), determinados por LiCor LI 6400-XT, em função dos tratamentos de correção do solo. Nottingham, 2019.....66

FIGURA 7 Crescimento inicial do milho cv. P3754 PWU: peso seco de parte aérea (SDW) e raiz (RDW) ($g\ planta^{-1}$) (A), área de raiz (Root Area) (cm^2) (B), acúmulo de N em parte aérea ($mg\ planta^{-1}$) (C) e transporte de N para parte aérea (%) (NT) (D), em

função dos tratamentos de correção do solo e com aplicação de extrato de *A. nodosum*. Rio Verde, 2019.....68

FIGURA 8 Imagens de rhizotron com 60 cm, mostrando a raiz de mudas de milho com 15 dias (estádio V2) A – Gypsum; B – Gypsum e *A. nodosum*; C – Liming; D – Liming e *A. nodosum*; E – Liming and Gypsum; F – Liming and Gypsum and *A. nodosum*; G – Control; H - *A. nodosum*. Todas as imagens estão na mesma escala de tamanho. Rio Verde, 2019.....69

FIGURA 9 Caracterização anatômica das raízes de milho coradas com Chrome azurol após 15 dias de cultivo (estádio V2), sob os tratamentos: controle (A-B), controle + *Ascophyllum nodosum* (C-D), calcário + *Ascophyllum nodosum* (E) e calcário. Barras 200 µm, Meio. Setas amarelas indicam acúmulo alumínio nas células. Todas as imagens estão na mesma escala de tamanho. Rio Verde, 2019.....73

FIGURA 10 Fluorescência de imagem das raízes de milho tratadas com fluorocromo Morin após 15 dias de cultivo (estádio V2), sob os tratamentos: controle (A-B), controle + *Ascophyllum nodosum* (C-D), calcário + *Ascophyllum nodosum* (E) e calcário. Barras 200 µm, Meio. Setas amarelas indicam acúmulo alumínio nas células. Todas as imagens estão na mesma escala de tamanho. Rio Verde, 2019.....74

ÍNDICE DE APÊNDICES

APÊNDICE A: CAPÍTULO I

FIGURA 1 Análise de dados discrepantes do número de vagens (NV) (A), da produtividade de grãos da soja (PG) (kg ha^{-1}) (B), do peso de mil grãos (PMG) (g) (C), teores foliares em R3 (N) (g kg^{-1}) (D) e dos índices Clorofilog da clorofila a (Chla) (E), b (Chlb) (F) e total (ChlT) (G) e a relação entre os índices Clorofilog de Chla:Chlb (H).....83

FIGURA 2 Análise de dados discrepantes dos índices FluorPen de fluorescência de clorofila a (Chla) Fo (A), Fj (B), Fi (C), Fm(D), Fv (E), Vj (F) e Vi (G).....84

FIGURA 3 Análise de dados discrepantes dos índices FluorPen de fluorescência de clorofila a (Chla) Fm/Fo (A), Fv/Fo (B), Mo (C), Area (D), Fix Area (E), Sm (F), Ss (G) e N (H).....85

FIGURA 4 Análise de dados discrepantes dos índices FluorPen de eficiência máxima do fotossistema dois (PSII) (Phi-Po) (A), da probabilidade da energia de excitação mover um elétron após a quinona A (Psi-o) (B), da probabilidade da energia de um photon absorvido mover um elétron após a quinona A (Phi-Eo) (C), do rendimento de dissipação de energia (Phi-Do) (D), do rendimento quântico médio de reações fotoquímicas primárias (Phi-Pav) (E), do índice de desempenho do PSII (Pi-Abs) (F), do fluxo de absorção de elétrons pelo centro de reação (RC) (ABS/RC) (G), do fluxo de captura de elétrons pelo RC (TRo/RC) (H), do fluxo de transporte de elétrons pelo RC (ETo/RC) (I) e fluxo de dissipação de elétrons pelo RC (Dio/RC) (J).....86

FIGURA 5 Análise de dados discrepantes dos índices do infravermelho próximo obtidos por imagem área NDVI (A), CVI (B), CCCI (C), DVI (D) e WDRVI (E).....87

APÊNDICE B: CAPÍTULO II

FIGURA 1 Imagens de raiz de plantas de milho sob tratamento controle (C) e controle + *Ascophyllum nodosum* (C x An) aos 14 dias após a germinação (estádio V2) obtidas por tomografia computadorizada de Raio X 3D. Nottingham, 2019.....88

FIGURA 2 Imagens de raiz de plantas de milho sob tratamento gesso (G) e gesso + *Ascophyllum nodosum* (G x An) aos 14 dias após a germinação (estádio V2) obtidas por tomografia computadorizada de Raio X 3D. Nottingham, 2019.....89

FIGURA 3 Imagens de raiz de plantas de milho sob tratamento calcário (L) e o calcário + <i>Ascophyllum nodosum</i> (L x An) aos 14 dias após a germinação (estádio V2) obtidas por tomografia computadorizada de Raio X 3D. Nottingham, 2019.....	90
FIGURA 4 Imagens de raiz de plantas de milho sob tratamento calcário + gesso (LG) e o calcário + gesso + <i>Ascophyllum nodosum</i> (LG x An) aos 14 dias após a germinação (estádio V2) obtidas por tomografia computadorizada de Raio X 3D. Nottingham, 2019.....	91
FIGURA 5 Imagens de rhizotron com raiz de plantas de milho sob tratamento controle (C) e controle + <i>Ascophyllum nodosum</i> (C x An) aos 14 dias após a germinação (estádio V2). Rio Verde, 2019.....	92
FIGURA 6 Imagens de rhizotron com raiz de plantas de milho sob tratamento gesso (G) e gesso + <i>Ascophyllum nodosum</i> (G x An) aos 14 dias após a germinação (estádio V2). Rio Verde, 2019.....	93
FIGURA 7 Imagens de rhizotron com raiz de plantas de milho sob tratamento calcário (L) e calcário + <i>Ascophyllum nodosum</i> (L x An) aos 14 dias após a germinação (estádio V2). Rio Verde, 2019.....	94
FIGURA 8 Imagens de rhizotron com raiz de plantas de milho sob tratamento calcário + gesso (LG) e calcário + gesso + <i>Ascophyllum nodosum</i> (LG x An) aos 14 dias após a germinação (estádio V2). Rio Verde, 2019.....	95

LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIACÕES E UNIDADES

Símbolo / Sigla	Significado
μA	Micro Amperes
A	Fotossíntese Líquida
Al	Alumínio
AlSO_4OH	Hidroxisulfato de Alumínio
ATP	Adenosina Trifosfato
C	Carbono
Ca	Cálcio
CaCl_2	Cloreto de Cálcio
CaCO_3	Carbonato de Cálcio
CaO	Óxido de Cálcio
$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Sulfato de cálcio dihidratado
Chl	Clorofila
ChlA	Clorofila a
ChlB	Clorofila b
ChlT	Clorofila total
CO_2	Dióxido de Carbono
CTC	Capacidade de troca de cátions
Cu	Cobre
Cyt	Citocromo
E	Transpiração
EROs	Espécies Reativas de Oxigênio
EUN	Eficiência de Uso de Nitrogênio
FBN	Fixação Biológica de Nitrogênio
Fd	Ferredoxina
Fe	Ferro
gs	Condutância Estomática
H^+	Hidrogênio
ha	Hectare (10.000 m ²)
HCl	Ácido Clorídrico
K	Potássio
KCl	Cloreto de Potássio

kV	Quilovolt
m	Saturação por Alumínio
Mg	Magnésio
MgO	Óxido de magnésio
Mn	Manganês
Mo	Molibdênio
MO	Matéria Orgânica
N	Nitrogênio
NADH	Dinucleótico de Nicotinamida e Adenina
NADP	Fosfato Dinucleótico de Nicotinamida e Adenina
NaOH	Hidróxido de Sódio
°C	Graus Celsius
P	Fósforo
P ₂ O ₅	Pentóxido de fósforo
PC	Plastocianina
pH	Potencial hidrogeniônico
PQ	Plastoquinona
PSI	Fotossistema I
PSII	Fotossistema II
Q _A	Quinona a
Q _B	Quinona b
S	Enxofre
SO ₄ ⁻²	Sulfato
T	CTC Potencial
V	Saturação por Bases
VDP	Déficit de Pressão de Vapor
WUE	Eficiência de Uso da Água
Zn	Zinco

RESUMO

TRINDADE, POLYANNA RIBEIRO. Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde – GO, novembro de 2020. **Sensores portáteis para avaliação do nitrogênio na soja e avaliação do crescimento de raiz de milho com bioestimulante.** Orientador: DSc. Carlos Ribeiro Rodrigues.

Esta tese, composta de dois capítulos, objetivou avaliar o potencial de sensores portáteis para a avaliação do N foliar na cultura da soja e o efeito de bioestimulante no desenvolvimento de raízes do milho em Latossolo ácido do Cerrado Brasileiro. O estudo foi conduzido em duas áreas diferentes na safra 2017/2018 e em uma terceira área na safra 2018/2019, todas no município de Rio Verde - GO. Todos os experimentos receberam adubação nitrogenada via foliar no estágio R2 de desenvolvimento nas seguintes doses: 0, 4, 6, 8, 12, 16 e 20 L ha⁻¹, e foram avaliadas com os sensores e amostradas para análise química foliar em R3. De maneira geral, a soja apresentou aumento da produtividade com o fornecimento de N em R2, porém os teores de N foliar e os índices de clorofila a obtidos com o clorofilômetro decresceram com o aumento da produtividade de grãos. O sensor portátil de fluorescência de clorofila tem potencial para a predição de produção na cultura da soja, especialmente os índices Ψ_o (probabilidade de a energia de excitação mover um elétron após a quinona a) e Φ_{E_o} (probabilidade de a energia de um fóton absorvido mover um elétron após a quinona a). No experimento com plântulas de milho foram testados os efeitos da aplicação de calcário e gesso em combinação com tratamento de sementes + aplicação foliar de *Ascophyllum nodosum* no crescimento de parte aérea e raiz, nutrição e fotossíntese em dois experimentos. O Experimento I foi conduzido em colunas de tubo pvc de 6,8 cm de diâmetro e 20 cm de profundidade, e o experimento II em rhizotrons de

vidro de 60 cm de altura, 40 cm de comprimento e 3 cm de largura. Em geral, as plantas do tratamento controle foram as que tiveram pior performance, tanto em crescimento de parte aérea e raiz, quanto em absorção de nutrientes e atividade fotossintética. Os tratamentos com o extrato de *A. nodosum* levaram ao incremento na superfície de raiz nos tratamentos com calcário, e ao menor transporte de alumínio para a parte aérea das plantas. Os tratamentos com calcário e gesso foram eficientes em minimizar os efeitos deletérios da toxidez por alumínio.

Palavras-chave: fluorescência da clorofila; fotossíntese; gessagem; calagem; *Ascophyllum nodosum*.

ABSTRACT

TRINDADE, POLYANNA RIBEIRO. Instituto Federal Goiano – *Campus* Rio Verde – GO, november de 2020. **Portable sensors for estimating nitrogen in soybeans and assessing corn root growth with biostimulant.** Supervisor: DSc. Carlos Ribeiro Rodrigues.

This thesis, composed of two chapters, aimed to evaluate the potential of portable sensors to evaluate leaf N in soybean culture and the biostimulant effect on corn roots development in acidic Oxisol from the Brazilian Cerrado. The experiment was carried out in two different areas in the 2017/2018 harvest and in a third area in the 2018/2019 harvest, all in the municipality of Rio Verde - GO. All experiments received nitrogen fertilization by leaf at the R2 stage of development in the following doses: 0, 4, 6, 8, 12, 16 and 20 L ha⁻¹, and were evaluated with sensors and sampled for foliar chemical analysis in R3. In general, soybean increased yield with the N supply in R2, however the levels of N leaf and the chlorophyll indexes obtained with the chlorophyllmeter decreased with the increased grain yield. The portable chlorophyll fluorescence sensor has the potential to predict production in soybean crops, specially Ψ_o (probability that a trapped exciton moves an electron beyond quinone a) and Φ_{Eo} (probability that an absorbed photon moves an electron beyond quinone a). In the experiment with maize seedlings, the effects of lime and gypsum application in combination with seed treatment + foliar application of *Ascophyllum nodosum* on shoot and root growth, nutrition and photosynthesis were tested in two experiments. Experiment I was conducted on 6.8 cm diameter and 20 cm deep PVC tube columns, and Experiment II on 60 cm high, 40 cm long and 3 cm wide rhizotrons. In general, the plants of the control treatment had the

worst performance, both in shoot and root growth, as in nutrient absorption and photosynthetic activity. The treatments with *A. nodosum* extract led to an increase in the root surface in treatments with limestone, and to a lesser transport of aluminum to the plants shoot. The limestone and gypsum treatments were efficient in minimizing the deleterious effects of aluminum toxicity.

Key words: chlorophyll fluorescence; photosynthesis; gypsum; liming; *Ascophyllum nodosum*.

1. INTRODUÇÃO GERAL

1.1. Sensores portáteis e nutrição nitrogenada

No Cerrado brasileiro, o fornecimento de nitrogênio (N) para as plantas geralmente é realizado de acordo com a recomendação para a cultura a ser implantada, podendo variar desde pouca ou nenhuma aplicação de N, como no caso da soja, ou em doses mais altas para culturas sem fixação biológica e alta necessidade desse nutriente, como é o caso do milho. Porém, apesar da adubação ser realizada de acordo com a cultura implantada, a dinâmica do N no solo e o estágio de desenvolvimento das plantas podem afetar o aproveitamento do nutriente fornecido, levando ao aumento de gastos e menor rendimento da cultura. Nesse contexto, é importante associar o monitoramento da necessidade de N com o fornecimento de adubação nitrogenada, para que a aplicação possa ser realizada na época e quantidade adequada.

Recentemente, técnicas que podem ser utilizadas durante a safra da cultura para fazer uma rápida avaliação dos teores de N vêm sendo testadas. Uma delas envolve o uso de aparelhos que determinam o teor de clorofila ou a fluorescência da clorofila nas folhas para monitorar o teor de N durante o período de cultivo (Varvel et al., 1997). Esse método é fundamentado na correlação positiva entre teor de clorofila e teor de N na planta (Soratto et al., 2006; Barbosa Filho et al., 2008, 2009). O desenvolvimento de métodos de diagnóstico mais rápidos permite aos agricultores monitorar rotineiramente o status de N das culturas, melhorar o tempo de fertilização e ajuste de taxa, reduzir as perdas de N e, conseqüentemente, aumentar a eficiência do uso de fertilizantes (Errecart et al. 2012).

1.1.1. Clorofilômetro

Existem várias formas de se avaliar o teor de clorofila na planta, uma delas é através do clorofilômetro. Por ser leve, fácil de operar e avaliar a planta de forma não destrutiva, esse aparelho é uma boa opção para o auxílio no manejo da adubação nitrogenada. Seu funcionamento é simples, com base em diodos que emitem luz (650-940 nm) através da folha, para fornecer medida indireta da concentração de clorofila relativa, expressa como o índice relativo de clorofila (IRC) (Maia et al., 2012).

Esse equipamento vem sendo utilizado em campo desde os anos 1980, estabelecendo-se como bom indicador da nutrição nitrogenada, especialmente quando utilizado em comparação à área de referência, sendo sensível suficiente para detectar a deficiência de N a tempo de correção e prevenir perdas em produção (Blackmer e Schepers, 1995).

Fontes (2016) descreve que a decisão de aplicar N em cobertura baseada nas leituras do clorofilômetro pode ser tomada de duas maneiras. A primeira utiliza a leitura absoluta do equipamento e a compara com um valor crítico tabelado. A leitura abaixo do nível crítico indica a necessidade de fornecimento de N. A segunda abordagem propõe a obtenção do índice crítico relativo por meio da divisão da leitura do clorofilômetro na folha da planta a ser analisada, pela leitura da folha de plantas desenvolvidas em uma área referência. Essa área referência é conduzida da mesma forma que a área a ser analisada, porém, adubada com uma dose elevada de N. Quando a razão das leituras for menor que um valor crítico (0,95 ou 0,90, por exemplo) é diagnosticada a necessidade de fornecimento desse nutriente.

Com o uso do clorofilômetro para determinar o índice relativo de clorofila (IRC) como indicador de necessidade de N no feijão, Maia et al. (2012) concluíram que o IRC obtido com o aparelho se correlacionou com os teores de N nas folhas das plantas, e que o monitoramento do IRC com o clorofilômetro orientou a aplicação de N em cobertura na cultura, aumentando sua eficiência e evitando aplicações desnecessárias.

Em busca de indicadores para o diagnóstico do status de N em arroz, baseado em leitura de clorofilômetro, Yuan et al. (2016), determinaram que o sensor oferece um método rápido, conveniente e confiável para agricultores e consultores diagnosticarem o status de N na cultura. Nos resultados de Silva et al. (2012), porém, não houve significância na correlação entre as medidas do aparelho com o conteúdo de N foliar,

quando comparadas leituras obtidas com clorofilômetro com os valores do conteúdo de N total contido nas folhas de crambe sob diferentes adubações de cobertura.

Vollmann et al. (2011), utilizando famílias isogênicas de soja noduladora e não noduladora, correlacionaram as leituras de clorofilômetro à nodulação da soja a partir do estágio V3, e conseqüentemente à nutrição nitrogenada das plantas, além de também identificar o sensor como possível auxiliador na previsão do teor proteico de sementes e qualidade final de semente na colheita.

Apesar de extensivas pesquisas utilizando o clorofilômetro como indicador do status nutricional de nitrogênio nas plantas, é necessário lembrar que o teor de clorofila é afetado direta ou indiretamente pelos teores de magnésio, ferro, zinco, cobre e demais micronutrientes relacionados a pigmentos do cloroplasto (Maschner, 2012).

Teklić et al. (2009), testaram a influência da aplicação foliar de magnésio (Mg) antes da floração nos índices de pigmento do cloroplasto em cinco cultivares de soja. O tratamento foliar com Mg influenciou significativamente as leituras SPAD, tanto em interação com as cultivares, nas plantas que receberam Mg apenas uma vez, quanto como fator único, em plantas fertilizadas duas vezes. Sendo assim, a utilização do clorofilômetro como auxiliador na tomada de decisão da adubação nitrogenada deve ser realizada com cautela, e em associação com análises de solo, para o conhecimento dos teores dos demais macro e micronutrientes que podem afetar a leitura do sensor.

1.1.2. Fluorômetro

Além da radiação refletida, que garante a coloração esverdeada na maioria das plantas, as folhas emitem luz fluorescente cuja intensidade é indicadora da concentração de clorofila nas folhas. Através da medição da fluorescência induzida da clorofila, pode ser realizada também a detecção de deficiência nutricional nas plantas, principalmente do nitrogênio.

O equipamento que mede a fluorescência da clorofila é chamado de fluorômetro. Ele é portátil e avalia as plantas de forma não destrutiva, e fornece a eficiência quântica do fotossistema II (PSII). Esse índice precisa ser devidamente calibrado no espaço, tempo e ambiente para ter utilidade na avaliação do estado de N na planta (Fontes, 2016).

Feng et al. (2015) avaliaram a relação entre fluorescência da clorofila e nutrição nitrogenada em duas cultivares de trigo com cinco diferentes doses de nitrogênio. As

medições foram realizadas em pontos diferentes das plantas (1ª a 3ª folhas e 4ª folha completamente expandida). O aparelho foi sensível a diferenças de relocação de nitrogênio de folhas mais velhas para folhas mais novas, o que é comum em plantas com deficiência de nitrogênio, porém, sob nutrição adequada, a diferença de valores de fluorescência entre folhas velhas e novas foi menor. Este resultado demonstra que é possível estabelecer índices universais e de fácil operação para diagnosticar o nitrogênio em culturas utilizando a tecnologia de sensores de fluorescência da clorofila.

Em ensaio conduzido por Lu e Zhang (2000), em milho cultivado por 30 dias com soluções com alta e baixa quantidade de nitrato, as plantas com pouca nutrição nitrogenada apresentaram menor teor de clorofila por área, que diminuiu a absorção de energia luminosa. A deficiência de N induziu modificações fotoquímicas no PSII no estado estacionário da fotossíntese, que reduziu o rendimento quântico do transporte de elétrons do PSII para corresponder aos requisitos reduzidos para ATP e NADPH, devido à diminuição da capacidade de assimilação de CO₂ induzida pela deficiência de N.

O trabalho de Huang et al. (2004), em mudas de arroz cultivadas em solução completa e com deficiência de N, demonstra que os resultados do fluorômetro, principalmente a irradiação de saturação se relacionam com a nutrição nitrogenada. Nas plantas com deficiência de N, em comparação com as plantas de solução completa, a capacidade fotossintética mais baixa na irradiação de saturação das plantas foi acompanhada pelo aumento na concentração de CO₂ intercelular, indicando que em plantas deficientes, o declínio na irradiação de saturação não foi por limitação estomática, mas pela reduzida eficiência de carboxilação.

A excitação do PSII correlacionou linearmente com o conteúdo de clorofila e inversamente com o conteúdo de proteína solúvel. Portanto, o aumento da pressão de excitação sob deficiência de N é provavelmente o resultado da saturação da cadeia de transporte de elétrons por limitação do uso de redutores pelo ciclo de Calvin. As plantas de arroz responderam à deficiência de N e alta irradiação ao diminuir a capacidade de colheita de luz e ao aumento da dissipação térmica da energia absorvida.

Nos estudos de Torres-Netto et al. (2005) em café, a fluorescência máxima (F_m), que corresponde ao estado de completa redução da quinona *a* e pode ser considerada proporcional ao total de clorofila na amostra, demonstrou correlação positiva com o teor de clorofila total até 300 $\mu\text{mol m}^{-2}$, a partir desse ponto, seus valores se estabilizaram.

Entretanto, uma relação linear foi obtida entre fluorescência máxima e relação entre clorofila *a* e *b* (Chl *a/b*), mostrando que quanto maior a relação Chl *a/b* maior a máxima fluorescência da planta. Os valores reduzidos de fluorescência máxima podem estar relacionados ao quenching não fotoquímico e danos no processo fotoquímico.

Em milho avaliado nos estádios V6, R1 e R3 sob diferentes doses de N, os parâmetros rendimento quântico potencial (F_v/F_m) e eficiência quântica do PSII (Φ_{P_o}) foram afetados diretamente pelas doses de nitrogênio. Ambos os parâmetros aumentaram continuamente até a dose de 185 kg N ha⁻¹, demonstrando melhora na eficiência do PSII em maiores doses de nitrogênio em milho. Além disso, o parâmetro Φ_{P_o} obteve correlação significativa com a produção nos estádios R1 e R3, sugerindo que a performance do PSII tem efeitos significativos na produção de grãos, especialmente nos estádios reprodutivos (Liu et al., 2018).

Levando em consideração a bibliografia levantada, o uso de sensores de clorofila e fluorescência da clorofila são promissores no auxílio da manutenção da nutrição nitrogenada das culturas, fornecendo informações sobre deficiência de nitrogênio ainda a tempo de correção, sem maiores perdas na produção. Nesta tese, ambos os sensores foram utilizados na avaliação de nutrição nitrogenada em soja, no primeiro capítulo, e dos efeitos do extrato de *Ascophyllum nodosum* em plântulas de milho, no segundo capítulo.

1.2. Bioestimulantes

Bioestimulantes são definidos pelo Conselho da Indústria Europeia de Bioestimulantes (EBIC, 2012) como “um material que contém substância(s) e / ou microrganismos cuja função, quando aplicada a plantas ou à rizosfera é estimular processos naturais para beneficiar a absorção de nutrientes, eficiência de nutrientes, tolerância ao estresse abiótico e / ou qualidade da cultura, independentemente de seu conteúdo nutricional”.

A partir dessa definição, Brown e Saa (2015) teorizam que os bioestimulantes beneficiam a produtividade vegetal ao interagir com os processos de sinalização da planta, reduzindo a resposta negativa da mesma ao estresse. Os mesmos podem interagir diretamente com as cascatas de sinalização da planta ou agir através do estímulo de bactérias endofíticas e não endofíticas, leveduras e fungos para a produção de moléculas benéficas para o crescimento vegetal.

Por serem amplos em sua composição, atuação e efeitos nas plantas, eles podem ser divididos em categorias, baseados principalmente em seu material de origem e / ou principal composto ativo. A divisão definida por Du Jardin (2015) agrupa os bioestimulantes em sete categorias: Ácidos húmicos e fúlvicos; Hidrolisados de proteína e outros compostos contendo N; Extratos de algas marinhas e botânicos; Quitosana e outros biopolímeros; Compostos inorgânicos; Fungos benéficos; e Bactérias benéficas.

O uso de algas marinhas na agricultura, como fonte de matéria orgânica ou condicionante de solo é bastante antigo, porém seu efeito bioestimulante vem sendo estudado apenas nas últimas décadas (Du Jardin, 2015). Um dos principais efeitos de seu uso na agricultura são: aumento no crescimento de plantas, maior teor de clorofila, maior floração, germinação e produção, aumento de propagação *in vitro*, e aumento da resistência à patógenos, pragas e estresses abióticos. Além disso, também aumentam a absorção de nutrientes, pois afetam tanto processos no solo, como a estrutura de poros e solubilidade de micronutrientes, quanto a fisiologia das plantas, através de mudanças na morfologia da raiz e aumento da colonização radicular por fungos micorrízicos arbusculares (Halpern et al., 2015).

Dentre as algas marinhas, as algas pardas são o segundo maior grupo de algas, e, também, são as mais utilizadas na agricultura. Dentre as algas pardas comumente aplicadas como bioestimulante estão a *Ascophyllum nodosum* (L) Le Jolis, e também demais algas do gênero *Fucus* spp., *Laminaria* spp., *Sargassum* spp., e *Turbinaria* spp. (Khan et al., 2009).

Neste trabalho, por causa da maior disponibilidade e o uso já estabelecido na agricultura, o extrato de alga escolhido para os ensaios foi o oriundo de *Ascophyllum nodosum*.

1.2.1. *Ascophyllum nodosum*

O extrato de *Ascophyllum nodosum* (L.) Le Jol., é retirado de plantas marinhas frescas, colhidas nas águas do Atlântico Norte na costa do Canadá, sendo uma fonte natural de macro e micronutrientes como N, P, K, Ca, Mg, S, B, Fe, Mn, Cu e Zn, aminoácidos (alanina, ácido aspártico e glutâmico, glicina, isoleucina, leucina, lisina, metionina, fenilalanina, prolina, tirosina, triptofano e valina), citocininas, auxinas e ácido abscísico (Ugarte, et al., 2006; Vieira et al., 2010).

Essas substâncias são eficientes quando aplicadas em pequenas concentrações e favorecem o alto desempenho dos processos vitais da planta, permitindo assim, a obtenção de elevada produção. Podendo ainda, em condições ambientais adversas, garantir o rendimento das mesmas (Vieira et al., 2010).

Dentre os efeitos positivos inerentes à aplicação de extratos de algas em cultivos podem ser citados: o aumento do sistema radicular, melhoria na germinação de sementes e estabelecimento das plântulas, na mobilização, absorção e distribuição de nutrientes, no enraizamento, crescimento, florescimento de plantas, aumento de produtividade, elevado conteúdo de clorofila foliar, entre outros, além de conferir tolerância a estresses bióticos e abióticos (Sharma et al., 2014).

Os mecanismos que explicam o estímulo do extrato de algas no desenvolvimento de plantas consistem na modulação dos fitormônios, aumento na eficiência fotossintética, melhor condutância estomática e regulação da biossíntese (Popescu, 2013). Dentre os fitormônios, o extrato de *A. nodosum* em plantas tem efeitos similares aos das citocininas, conhecidas por sua estimulação da síntese de proteínas, influência na divisão e diferenciação celular e sua interação com outros hormônios vegetais, mais notavelmente, as auxinas (Norrie, 2016).

Em termos de respostas das culturas, as citocininas estão implicadas em todas as fases do crescimento da planta, incluindo a formação de raízes, brotos, caule e folhas. O fato de que a produção destas substâncias naturais pode ser induzida pelo extrato de *Ascophyllum nodosum* fornece aporte nutricional, que podem complementar os programas convencionais de fertilizantes. Exemplos de benefícios específicos que afetam o rendimento e a qualidade podem incluir melhores frutos, desenvolvimento de raízes vigorosas e tolerância aprimorada ao estresse (Norrie, 2016).

Silveira et al. (2015), examinaram o efeito do extrato de *A. nodosum* na acumulação de biomassa de plântulas de cana-de-açúcar, brotadas de segmentos retirados de partes apical, medial e basal dos colmos. O extrato da alga produziu aumento significativo no acúmulo de massa seca de raiz em plantas que foram brotadas de gemas basais. Os autores concluíram que o uso da *A. nodosum* pode ajudar a minimizar as falhas de brotação e melhorar o crescimento inicial de plantas de cana de açúcar.

Os estudos de Alam et al. (2013) com aplicação do extrato de *A. nodosum* em diferentes cultivares de cenoura indicaram estímulo no crescimento radicular e aumento

da produção, bem como aumento na quantidade de colônias de microrganismos no solo, aumento da taxa respiratória e atividade metabólica dos mesmos.

Esse efeito na microbiota do solo corrobora com os resultados obtidos por Sen et al. (2014), que trabalharam com aplicação de *A. nodosum* no solo e foliar em trigo cultivado em plantio direto. Além de melhorar significativamente o crescimento, o rendimento e o teor de proteína do trigo, o efeito estimulante sobre a atividade bacteriana no solo indica que o extrato pode ser usado para a rápida e eficiente decomposição de resíduos de culturas deixado na superfície do solo em sistemas de plantio direto.

Em *Arabidopsis* sob estresse hídrico, a desidratação afetou fortemente o desempenho fotossintético de plantas não tratadas, enquanto as plantas de *Arabidopsis* tratadas com extrato de *A. nodosum* conseguiram manter a capacidade de dissipação de energia fotoquímica e não fotoquímica relativamente maior por maior período durante a desidratação, preservando o aparato fotossintético de dano irreversível (Santaniello et al., 2017).

Shukla et al. (2019), em sua revisão sobre bioestimulantes à base de *A. nodosum*, relatam que o seu uso aumenta o crescimento vegetativo, aquisição, acúmulo e biossíntese de nutrientes como N, P, K, Ca, S, Mg, Zn, Mn e Fe em tomate, K, Fe e Cu em olivas e N e sulfato em canola, demonstrando que o *A. nodosum* tem papel importante no crescimento de plantas por aumentar a absorção de nutrientes através da regulação de genes envolvidos na aquisição de nutrientes, além de fornecer e/ou estimular a biossíntese de fitormônios como auxinas, citocininas e giberelinas. O *Ascophyllum nodosum* também leva a mudanças fisiológicas que alteram a relação raiz:rizosfera, como, por exemplo, a indução na produção de exsudatos de raiz, como os flavonoides, que podem atrair bactérias para a superfície da raiz, levando a incrementos em nodulação por rhizobium em vegetais noduladores.

Os efeitos promissores do uso do extrato de *A. nodosum* nas culturas ainda são pouco estudados em solos ácidos, principalmente oriundos do Cerrado brasileiro, onde maior enraizamento, resistência à seca, melhor nutrição e maior produção são necessários para a boa condução de uma safra, independente da cultura. Sendo assim, no segundo capítulo desta tese, foram testados os efeitos da aplicação de *A. nodosum* em plântulas de milho, semeadas em solo ácido.

2. REFERÊNCIAS

ALAM, M. Z., et al. *Ascophyllum* extract application can promote plant growth and root yield in carrot associated with increased root-zone soil microbial activity. **Canadian Journal of Plant Science**, v. 94 p. 337-348, 2013. DOI: 10.4141/cjps2013-135

BARBOSA FILHO, M. P. et al. Determinação da necessidade de adubação nitrogenada de cobertura no feijoeiro irrigado com auxílio do clorofilômetro portátil. **Ciência Rural**, v. 38, n. 7, p. 1843-1848, 2008. DOI: 10.1590/S0103-84782008000700007.

BARBOSA FILHO, M. P. et al. Época de aplicação de nitrogênio no feijoeiro irrigado monitorada com auxílio de sensor portátil. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 33, n. 2, p. 425-431, 2009. DOI: 10.1590/S1413-70542009000200010.

BLACKMER, T.M. e SCHEPERS, J.S. Use of chlorophyll meter to monitor nitrogen status and schedule fertigation for corn. **Journal of Production Agriculture**, v. 8, p. 56-60, 1995. DOI: 10.2134/jpa1995.0056.

BROWN, P. & SAA, S. Biostimulants in agriculture. **Frontiers in Plant Science**, v.6, art. 671, 2015. DOI: 10.3389/fpls.2015.00671.

DU JARDIN, P. Plant biostimulants: definition, concept, main categories and regulation. **Scientia Horticulturae**. v. 196, p.3–14, 2015. Doi: 10.1016/j.scienta.2015.09.021

EBIC. **What are biostimulants?** 2012. Disponível online em: <http://www.biostimulants.eu/about/what-are-biostimulants>

ERRECART, P. M. et al. Leaf nitrogen concentration and chlorophyll meter readings as predictors of tall fescue nitrogen nutrition status. **Field Crops Research**, v. 129, p. 46-58, 2012. DOI: 10.1016/j.fcr.2012.01.008.

FENG, W. et al. Assessment of plant nitrogen status using chlorophyll fluorescence parameters of the upper leaves in winter wheat. **European Journal of Agronomy**, v. 64, p. 78 – 87, 2015. DOI: 10.1016/j.eja.2014.12.013.

FONTES, P. C. R. **Nutrição mineral de plantas: Anamnese e diagnóstico**. Viçosa: Editora UFV, 2016, 315p.

HALPERN, M., et al. The use of biostimulants for enhancing nutrient uptake. **Advances in Agronomy**. v.130, p.141–174. 2015. DOI: 10.1016/bs.agron.2014.10.001.

HUANG, Z. A. et al. Effects of nitrogen deficiency on gas exchange, chlorophyll fluorescence, and antioxidant enzymes in leaves of rice plants. **Photosynthetica**, v. 42, n. 2, p. 357-364, 2004. DOI: 10.1023/B:PHOT.0000046153.08935.4c.

KHAN, W., et al. Seaweed extracts as biostimulants of plant growth and development. **Journal of Plant Growth Regulation**, v. 28, p.386–399. 2009. DOI 10.1007/s00344-009-9103-x.

LIU Z., et al. Photosynthetic characteristics and chloroplast ultrastructure of summer maize response to different nitrogen supplies. **Frontiers in Plant Science**. v. 9 art. 576. 13p. 2018. DOI: 10.3389/fpls.2018.00576.

LU, C. & ZHANG, J. Photosynthetic CO₂ assimilation, chlorophyll fluorescence and photoinhibition as affected by nitrogen deficiency in maize plants. **Plant Science**, v. 151, p. 135-143, 2000. DOI: 10.1016/s0168-9452(99)00207-1.

MAIA, S. C. M. et al. The nitrogen sufficiency index underlying estimates of nitrogen fertilization requirements of common bean. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 183-191, 2012. DOI: 10.1590/S0100-06832012000100019.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. Academic Press. London, 2012.

NORRIE, J. *Ascophyllum nodosum* extracts: gifts from Poseidon to Theoi Georgikoi (the Greek gods of agriculture). **Acta Horticulturae**, v. 1148. p. 1-12, 2016. DOI: 10.17660/ActaHortic.2016.1148.1.

POPESCU, M. Agricultural uses of seaweeds extracts. **Current Trends in Natural Sciences**, v. 2, p. 36-39, 2013.

SANTANIELLO, A., et al. *Ascophyllum nodosum* seaweed extract alleviates drought stress in *Arabidopsis* by affecting photosynthetic performance and related gene expression. **Frontiers in Plant Science**, v.8 art. 1362. 2017. DOI: 10.3389/fpls.2017.01362.

SEN, A., et al. Soil and Plant Responses to the Application of *Ascophyllum nodosum* Extract to No-Till Wheat (*Triticum aestivum* L.). **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 46 n. 1, p. 123-136. 2015. DOI: 10.1080/00103624.2014.956938.

SHARMA, H. S. S., et al. Plant biostimulants: a review on the processing of macroalgae and use of extracts for crop management to reduce abiotic and biotic stresses. **Journal of Applied Phycology**, Dordrecht, v. 26, n. 1, p. 465–490, 2014. DOI: 10.1007/s10811-013-0101-9.

SHUKLA P. S., et al. *Ascophyllum nodosum*-based biostimulants: sustainable applications in agriculture for the stimulation of plant growth, stress tolerance, and disease management. **Frontiers in Plant Science**. v. 10, art. 655, 2019. DOI: 10.3389/fpls.2019.00655

SILVA, T. R. B. et al. Relationship between chlorophyll meter readings and total N in crambe leaves as affected by nitrogen topdressing. **Industrial Crops and Products**, v. 39, p. 135-138, 2012. DOI: 10.1016/j.indcrop.2012.02.008.

SILVEIRA, L. C. I. et al, Effect of kelp extract on sugarcane plantlets biomass accumulation. **IDESIA**, v. 33, n. 3, p. 31-33, 2015. DOI: 10.4067/S0718-34292015000300005.

SORATTO, R. P. et al. Nitrogênio em cobertura no feijoeiro cultivado em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, n. 2, p. 259-266, 2006. DOI: /10.1590/S0100-06832006000200007.

TEKLIĆ, T., et al. Relationships among chloroplast pigments concentration and chlorophyllmeter readings in soybean under influence of foliar magnesium application. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.40 p.706–725, 2009. DOI: 10.1080/00103620802697939

TORRES NETTO, A. et al. Photosynthetic pigments, nitrogen, chlorophyll *a* fluorescence and SPAD-502 readings in coffee leaves. **Scientia Horticulturae**, v. 104, p. 199-209, 2005. DOI: 10.1016/j.scienta.2004.08.013

UGARTE R. A., et al. Changes in the brown seaweed *Ascophyllum nodosum* (L.) Le Jol. Plant morphology and biomass produced by cutter rake harvests in southern New Brunswick, Canada. **Journal of Applied Phycology**, v. 18 p. 351–359. 2006. DOI: 10.1007/s10811-006-9044-8.

VARVEL, G. E. et al. Ability for in-season correction of nitrogen deficiency in corn using chlorophyll meters. **Soil Science Society of America Journal**, v. 61, p. 1233-1239, 1997. DOI: 10.2136/sssaj1997.03615995006100040032x

VIEIRA, E. L. et al. **Manual de Fisiologia Vegetal**. São Luis: EDUFMA, 2010. 186p.

VOLLMANN, J., et al. Digital image analysis and chlorophyll metering for phenotyping the effects of nodulation in soybean. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.75 p. 190–195, 2011. DOI: 10.1016/j.compag.2010.11.003

YUAN, Z., et al. Indicators for diagnosing nitrogen status of rice based on chlorophyllmeter readings. **Field Crops Research.** v.185 p. 12-20, 2016. DOI: 10.1016/j.fcr.2015.10.003.

3. OBJETIVOS

3.1. Geral

Objetivou-se avaliar o potencial de sensores portáteis para a avaliação do N foliar na cultura da soja e o efeito de bioestimulante no desenvolvimento de raízes do milho e absorção de N e demais nutrientes em Latossolo ácido do Cerrado Brasileiro.

3.2. Específicos

- Avaliar se sensores portáteis de clorofila, fluorescência de clorofila e os índices obtidos de imagens de câmeras multiespectrais correlacionam com o estado nutricional nitrogenado da soja sob diferentes doses de nitrogênio aplicado via foliar;

- Avaliar os efeitos dos corretivos de solo e do extrato de *A. nodosum* no desenvolvimento inicial do sistema radicular do milho e absorção de N e demais nutrientes em Latossolo ácido do Cerrado Brasileiro.

4. CAPÍTULO I:

**SENSORES PORTÁTEIS DE CLOROFILA, FLUORESCÊNCIA, E IMAGENS
DE CÂMERA MULTIESPECTRAL NA ESTIMAÇÃO DA NUTRIÇÃO
NITROGENADA E PRODUTIVIDADE DE GRÃOS NA CULTURA DA SOJA**

RESUMO - O objetivo deste trabalho foi avaliar se os índices obtidos com clorofilômetro e fluorômetro portátil e os índices obtidos de imagens de câmeras multiespectrais se correlacionam com a variação dos teores foliares de nitrogênio (N) em soja. O estudo foi conduzido em duas áreas diferentes na safra 2017/2018 e em uma terceira área na safra 2018/2019, todas no município de Rio Verde - GO. Todos os experimentos receberam adubação nitrogenada via foliar no estágio R2 de desenvolvimento nas seguintes doses: 0, 4, 6, 8, 12, 16 e 20 L ha⁻¹, e foram avaliadas com os sensores e amostradas para análise química foliar em R3. De maneira geral, a soja apresentou aumento da produtividade com o fornecimento de N em R2, porém os teores de N foliar e os índices de clorofila a obtidos com o clorofilômetro decresceram com o aumento da produtividade de grãos. Dos índices obtidos com a câmera multiespectral, nenhum apresentou correlação maior de 0,5 para teor de N ou produtividade de planta. Os índices de fluorescência, principalmente Fj e Fi, também diminuíram com o aumento da produtividade, apontando para a melhor eficiência fotoquímica das plantas mais produtivas, e pode ser corroborado através de outros índices obtidos com o fluorômetro, como: M₀; Ψ_0 e Φ_{E_0} . Com a projeção espacial de vetores dos componentes principais foi determinado que os índices Ψ_0 e Φ_{E_0} , seguidos de Fo/Fm, Fv/Fo, $\Phi_{P_{av}}$ e Φ_{P_0} , todos eles obtidos com o fluorômetro foram diretamente proporcionais à produtividade de grãos, e Vi, Vj, Mo, Fo, Fj e Fi foram inversamente proporcionais. Em conclusão, os índices obtidos com os sensores apresentaram maior correlação com a produtividade de grãos do que com os teores de N foliar, e aponta para o potencial uso desses sensores na predição de produtividade da soja, além da sua usual função de detecção de deficiência nutricional.

Palavras-chave: fluorômetro; clorofilômetro; drone; predição de produtividade; componentes principais.

CHLOROPHYLL AND FLUORESCENCE PORTABLE DEVICES, AND
MULTISPECTRAL CAMERA IMAGES TO ESTIMATE NITROGEN NUTRITION
AND GRAIN YIELD IN SOYBEAN

ABSTRACT - The objective of this study was to evaluate whether chlorophyllmeter and fluorometer indices and the indices obtained from multispectral images correlate with the leaf nitrogen (N) content variation in soybean. The study was carried out in two different areas in the 2017/2018 harvest and in a third area in the 2018/2019 harvest, all in the municipality of Rio Verde - GO. All experiments received nitrogen fertilization by leaf at the R2 stage of development in the following doses: 0, 4, 6, 8, 12, 16 and 20 L ha⁻¹, and were evaluated with sensors and sampled for foliar chemical analysis in R3. In general, soybean increased yield with the supply of N in R2, however the levels of N leaf and the chlorophyll indexes obtained with the chlorophyllmeter decreased with the increased grain yield. Of the indices obtained with the multispectral camera, none showed a correlation greater than 0.5 for N content or grain yield. The fluorescence indices, especially Fj and Fi, also decreased with the increase in productivity, indicating to a better photochemical efficiency of the most productive plants, which can be corroborated through other indexes obtained with the fluorometer such as: M₀; Ψ_0 and Φ_{E_0} . With the vector plot of the principal components, it was determined that the indices Ψ_0 and Φ_{E_0} , followed by Fo/Fm, Fv/Fo, Φ_{Pav} and Φ_{Po} , obtained with the fluorometer, were directly proportional to grain yield, while the indices Vi, Vj, Mo, Fo, Fj and Fi were inversely proportional. In conclusion, the indices obtained with the sensors showed a greater correlation with grain yield than with the N leaf content, which indicates the potential use of these sensors in the prediction of soybean productivity, in addition to their usual function of detecting nutritional deficiency.

Key words: fluorometer; chlorophyllmeter; drone; yield prediction; principal component analysis.

4.1. INTRODUÇÃO

A soja [*Glycine max.* (L) Merrill] é uma das culturas mais importantes no mundo, sendo uma fonte de proteína e óleo para consumo humano e animal. É a cultura mais cultivada no Brasil, o maior produtor e exportador de soja do mundo (USDA, 2021), e com a alta demanda por comida e energia, é crucial que a alta produtividade se mantenha. Ao gerir uma cultura leguminosa como a soja, principalmente em áreas de alta produtividade, é necessário balancear cuidadosamente os nutrientes fornecidos às plantas, principalmente o nitrogênio (N), que pode ser facilmente negligenciado pela presença da fixação biológica de nitrogênio (FBN) nas plantas.

Em média, apenas 50 a 60% da necessidade de N da soja é suprida pela FBN (Salvagiotti, 2008), assim, o restante da necessidade nutricional deve ser suprido via solo ou adubação foliar. Considerando que a produtividade da soja pode ser aumentada em 13 kg por kg de N acumulado em parte aérea (Salvagiotti, 2008), monitorar a nutrição nitrogenada da cultura é essencial para mitigar possíveis déficits de N e prevenir perdas em produção.

Nesse sentido, é necessário desenvolver e estabelecer técnicas de monitoramento de N em culturas, preferencialmente que possam ser realizadas *in situ*, e sejam mais econômicas e rápidas que análises laboratoriais. É fato conhecido que o N desempenha papel fundamental tanto na molécula de clorofila, quanto no processo fotossintético, por fazer parte da molécula de clorina no centro da clorofila, e por ser um dos principais nutrientes formadores de aminoácidos, precursores das proteínas que fazem parte do processo fotossintético (Souza et al., 2020; Jia et al. 2021). Sendo assim, o teor e a fluorescência da clorofila podem fornecer boa referência sobre o teor de N nas plantas.

Sensores de clorofila e fluorescência, junto com sensoriamento remoto através de câmeras multiespectrais, têm sido usados para gestão de culturas ao longo dos anos, especialmente na estimativa de teor de nitrogênio (Vollmann et al., 2011; Clevers & Gitelson, 2013; Song & Wang, 2016; Padilla et al., 2020; Simkó et al., 2020; Jia et al. 2021). Esses sensores possibilitam leituras rápidas *in loco*, que, quando comparadas com análises laboratoriais, são métodos mais rápidos para avaliar a nutrição nitrogenada na cultura, e, é essencial no campo, em que estresses nutricionais normalmente trazem perdas de produtividade, e, por consequência, nos lucros do produtor.

Na cultura da soja, esses sensores vêm sendo utilizados com sucesso, demonstrando correlação dos teores obtidos com o teor de N das plantas (Kao & Forseth, 1992; Van Heerden et al., 2003; Vollmann et al., 2011; Song & Wang, 2016; Yokoyama, et al. 2021). O objetivo deste trabalho foi avaliar se os índices obtidos com clorofilômetro e fluorômetro portátil e os índices obtidos de imagens de câmeras multiespectrais se correlacionam com a variação dos teores foliares de N em soja.

4.2. METODOLOGIA

Na primeira safra, foram realizados experimentos em dois locais diferentes, no município de Rio Verde – GO, entre novembro de 2017 e fevereiro de 2018. A Área 1 sobre LATOSSOLO VERMELHO Distrófico (Santos et al., 2013), localizada aos 17°51'52"S 50°55'09"O e a Área 2 sobre LATOSSOLO AMARELO Distrófico (Santos et al., 2013), localizada aos 17°31'26"S 51°08'48"O. Na segunda safra, foi realizado o terceiro experimento no mesmo município, entre novembro de 2018 e fevereiro de 2019 na Área 3, localizada aos 17°48'22"S 50°54'6"O, sobre LATOSSOLO VERMELHO Distrófico (Santos et al., 2013).

A precipitação e as temperaturas máximas e mínimas durante a época dos experimentos estão apresentadas na Figura 1. Antes da implantação dos experimentos foram realizadas amostragens e análises químicas do solo, onde, a camada de 0 – 0,2 m apresentou as características expostas na Tabela 1.

TABELA 1: Características químicas e físicas do solo amostrado nas áreas avaliadas.

	pH	MO g dm ⁻³	Ca	Mg	K	T	Al	H + Al	P -mg dm ⁻³ -	V -%-	Argila	Silte	Areia
			-----cmol _c dm ⁻³ -----								-----g kg ⁻¹ -----		
Área 1	5,0	70	1,5	0,5	0,12	5,5	0,0	3,38	20	45	410	82	508
Área 2	5,4	30,95	2,11	0,91	0,2	6,29	0,0	3,06	5,44	51,3	490	40	47
Área 3	5,8	47,15	4,78	2,55	0,42	11,4	0,0	3,40	4,67	69,3	554	79	367

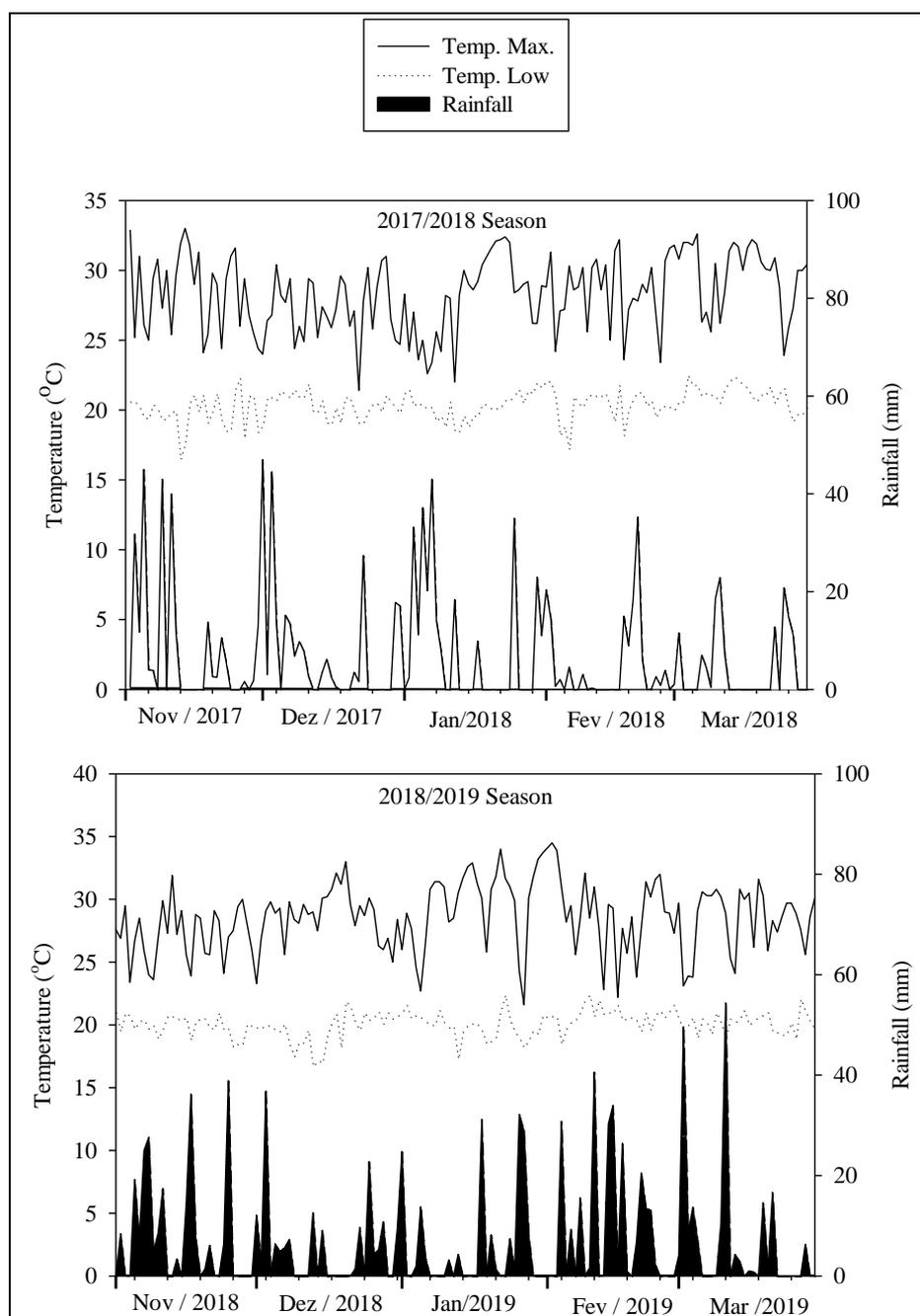


FIGURA 1 Gráfico de precipitação acumulada mensal e temperaturas máximas e mínimas médias mensais no município de Rio Verde – GO durante os meses de plantio da soja nas safras 2017/2018 e 2018/2019. Fonte: INMET (2021).

O delineamento experimental utilizado foi de blocos ao acaso de 5 m de comprimento por 2,7 m de largura, com seis doses de N foliar (0, 4, 6, 8, 12, 16 e 20 L ha⁻¹). A fonte de N utilizada foi solução de ureia (45% de N) a 27% (p:p). A Área 1, com histórico de pastagem degradada, foi utilizada para cultivo pela primeira vez neste experimento, e o plantio da soja cv. Intacta RR2 PRO M7110 Monsoy foi realizado utilizando inoculação com *Bradyrhizobium japonicum* e 204 Kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 44 Kg ha⁻¹ de N, e 150 Kg ha⁻¹ de KCl 20 dias após o plantio, enquanto na Área 2, já estabelecida

como área de cultivo de alta produtividade, o plantio foi realizado com cv. Única 68168 RSF IPRO BRASMAX, adubação de plantio com 90 Kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 90 Kg ha⁻¹ de KCl, sem inoculação de bactérias diazotróficas por causa de seu uso recorrente em plantios anteriores. Na Área 3, também em área consolidada de plantio, foi semeada a cv. Power 73170 RSF IPRO BRASMAX, utilizando 100 Kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 60 Kg ha⁻¹ de K₂O e inoculação com *Bradyrhizobium japonicum*. Todos os experimentos foram conduzidos com 0,45 m de espaço entrelinhas. O manejo fitossanitário foi realizado de acordo com recomendações técnicas para a cultura.

Em todos ensaios, a aplicação de N foliar foi realizada no estágio R2 de desenvolvimento, e sete dias após a aplicação foram realizadas as avaliações dos índices de clorofila e fluorescência em quatro plantas representativas por parcela, na primeira folha completamente expandida, com a soja no estágio R3 de desenvolvimento. No mesmo dia das leituras, foram obtidas imagens aéreas do ensaio, via voo com drone modelo DJI Inspire 2, equipado com câmera multiespectral modelo Sentera.

Após as medições com os sensores portáteis de clorofila e fluorescência, foram coletadas as mesmas folhas utilizadas nas leituras para análise de N foliar. As mesmas foram lavadas com água corrente e destilada, acondicionadas em sacos de papel e secas em estufa com circulação forçada de ar a 65 -70°C até peso constante. Em seguida, o material foi moído e realizada a extração de N por ataque sulfúrico, seguido de destilação em aparelho micro Kjeldahl. O destilado foi recolhido em erlenmeyer com solução de ácido bórico indicadora e determinado o N por titulação com NaOH 0,1 mol L⁻¹ (Guebel et al., 1991).

Os índices clorofila a (CHLA); clorofila b (CHLB); clorofila total (CHLT) e relação clorofila a:b (CHLA:B) foram obtidos com o aparelho portátil ClorofiLOG e os índices de fluorescência, apresentados na Tabela 2, com o aparelho portátil FluorPen FP100. As leituras com o ClorofiLOG foram realizadas entre as 8 e 9 horas da manhã, e as leituras com o FluorPen FP100 foram realizadas após 4 horas de escuro.

TABELA 2 Índices de fluorescência de clorofila a obtidos com o FluorPen FP100.

Fo	intensidade de fluorescência a 50 μ s ¹
Fj	intensidade de fluorescência a 2 ms
Fi	intensidade de fluorescência a 60 ms
Fm	intensidade de fluorescência máxima
Fv	Fluorescência variável (Fm – Fo)
Vj	Fluorescência variável relativa a 2 ms ((Fj – Fo) / (Fm – Fo))
Vi	Fluorescência variável relativa a 60 ms ((Fi – Fo) / (Fm – Fo))
Fo/Fm	Produção quântica basal dos processos não fotoquímicos no fotossistema II (PSII)
Fv/Fo	Eficiência quântica potencial do PSII
Fv/Fm	Rendimento quântico potencial
Mo	Taxa líquida do fechamento dos centros de reação do PSII quando a reoxidação da Quinona a (Qa) não está bloqueada (4x (F300 – Fo) / (Fm – Fo))
AREA	área acima da curva Fo a Fm, representa a quantidade de aceptores de elétrons
FIX AREA	área total acima da cinética OJIP – entre F40 μ e F1s
Sm	Quantidade de energia necessária para fechar todos os centros de reação do PSII ou múltiplo <i>turn over</i> (AREA/ (Fm – Fo))
Ss	Quantidade de energia necessária para reduzir a Qa uma única vez ou simples <i>turn over</i>
N	Quantas vezes a Qa foi reduzida em relação ao tempo zero ou <i>turn over</i> da Qa (Sm.Mo.(1/Vj))
Φ_{Po}	Eficiência máxima do PSII (Fv/Fm)
Ψ_o	Probabilidade de a energia de excitação mover um elétron após a Quinona a (1 – Vj)
Φ_{Eo}	Probabilidade de a energia de um fóton absorvido mover um elétron após a Quinona a ((1-Fo/Fm). Ψ_o)
Φ_{Do}	Rendimento de dissipação de energia (1 – Φ_{Po} – (Fo/Fm))
Φ_{Pav}	Rendimento quântico médio de reações fotoquímicas primárias (Φ_{Po} – (Sm/t _{FM})), em que t _{FM} é o tempo, em ms, para obter Fm
Π_{ABS}	Índice de desempenho
ABS/RC	Fluxo de absorção (Mo.(1/Vj).(1/ Φ_{Po}))
TRo/RC	Fluxo de captura (Mo.(1/Vj))
ETo/RC	Fluxo de transporte de elétrons (Mo.(1/Vj). Ψ_o)
Dio/RC	Fluxo de dissipação ((ABS/RC) – (TRo/RC))

¹Significado fisiológico e fórmula de obtenção dos índices obtidos conforme Strasser et al., (2000), adaptado de Zanandrea et al. (2006) e Martinazzo et al. (2012).

O voo de drone foi executado entre as 10 e 11 horas da manhã, para evitar a ocorrência de sombra geradas pelas plantas. A câmera Sentera possui seis sensores de imagem independentes que capturam bandas estreitas do comprimento de onda de 586, 615, 661, 775 e 825 nm, com dois sensores na banda do vermelho próximo, sendo estes, o NDVI, contendo uma banda vermelha (NDVI) de 625 nm e uma NIR (NDVI) de 850 nm, além do sensor NDRE contendo outra banda NIR (NDRE) de 840 nm e a banda

RedEdge de 720 nm, e mais as bandas RGB (Red, Green e Blue). O plano de voo foi realizado no aplicativo Field Agent. Neste aplicativo, ajustou-se alguns parâmetros de voo, tais com altura do voo de 30 m e sobreposição frontal e lateral de 80%, que resultou em tamanho de pixel de 3 cm e velocidade de voo de 8 m s⁻². As imagens foram processadas no software Pix4D versão 3.1.22, e depois de ortorretificadas foram analisadas no software QGIS versão 3.8.1. No QGIS foi retirado o solo da imagem com finalidade de calcular apenas os índices de vegetação (NDVI, CVI, CCCI, DVI e WDRVI), usando as equações expostas na Tabela 3, e, posteriormente foi realizado a média dos valores obtidos dos índices no próprio QGIS.

Tabela 3 Índices espectrais de vegetação utilizados neste estudo e suas fórmulas.

Índice	Fórmula original	Referência
NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)	$(R\lambda_{nir} - R\lambda_{red}) / (R\lambda_{nir} + R\lambda_{red})^1$	Huang et al., 2010.
CVI (Chlorophyll Vegetation Index)	$R\lambda_{nir} * (R\lambda_{red} / R\lambda_{green}^2)$	Vincini et al., 2008.
CCCI (Canopy Chlorophyll Content Index)	$\frac{(R\lambda_{nir} - R\lambda_{rededge}) / (R\lambda_{nir} + R\lambda_{rededge})}{(R\lambda_{nir} - R\lambda_{red}) / (R\lambda_{nir} + R\lambda_{red})}$	Herrmann et al., 2010.
DVI (Difference Vegetation Index)	$(R\lambda_{nir} - R\lambda_{red})$	Tucker, 1979.
WDRVI (Wide Dynamic Range Vegetation Index)	$(0,1 * R\lambda_{nir} - R\lambda_{red}) / (0,1 * R\lambda_{nir} + R\lambda_{red})$	Herrmann et al., 2010.

¹ NIR: infravermelho-próximo; RedEdge: borda-do-vermelho; Red: vermelho; Green: verde.

Com a soja no estádio R7, foram coletadas plantas representativas do tratamento em questão, contadas as vagens, separadas em folhas, colmos, e vagens, acondicionadas em sacos de papel e secas em estufa até peso constante. Após, foi determinado o peso de massa seca, peso de mil grãos (P1000), número de vagens por planta (NV) e produtividade.

Foi realizada a análise de variância e regressão das variáveis avaliadas em função das doses de N e correlação dos teores foliares de N com os índices obtidos com o ClorofiLOG e FluorPen FP100 com auxílio do programa estatístico R (R CORE TEAM, 2017). Posteriormente, foi realizada a análise de componentes principais, e selecionados todos os componentes com autovalores igual e superior a um, conforme o critério de Kaiser (Kaiser, 1960).

4.3. RESULTADOS

Nas três áreas experimentais houve variação da produtividade, do peso de mil grãos e dos teores de N foliar no estágio R3 de desenvolvimento da soja (Figuras 2 A, B e C). A correlação entre a produtividade dos grãos da soja (PG) e os teores foliares de N foi negativo, ou seja, quanto maior a produtividade de grãos menores os teores de N (Figura 2 A). Esse resultado pode ser explicado pelo efeito de diluição do nutriente na planta, com o aumento do crescimento e da produtividade (Jarrel & Beverly, 1981), e também pela correlação entre a produtividade e, ou, crescimento de uma planta com os teores foliares de nutrientes não ser linear (Römheld, 2012).

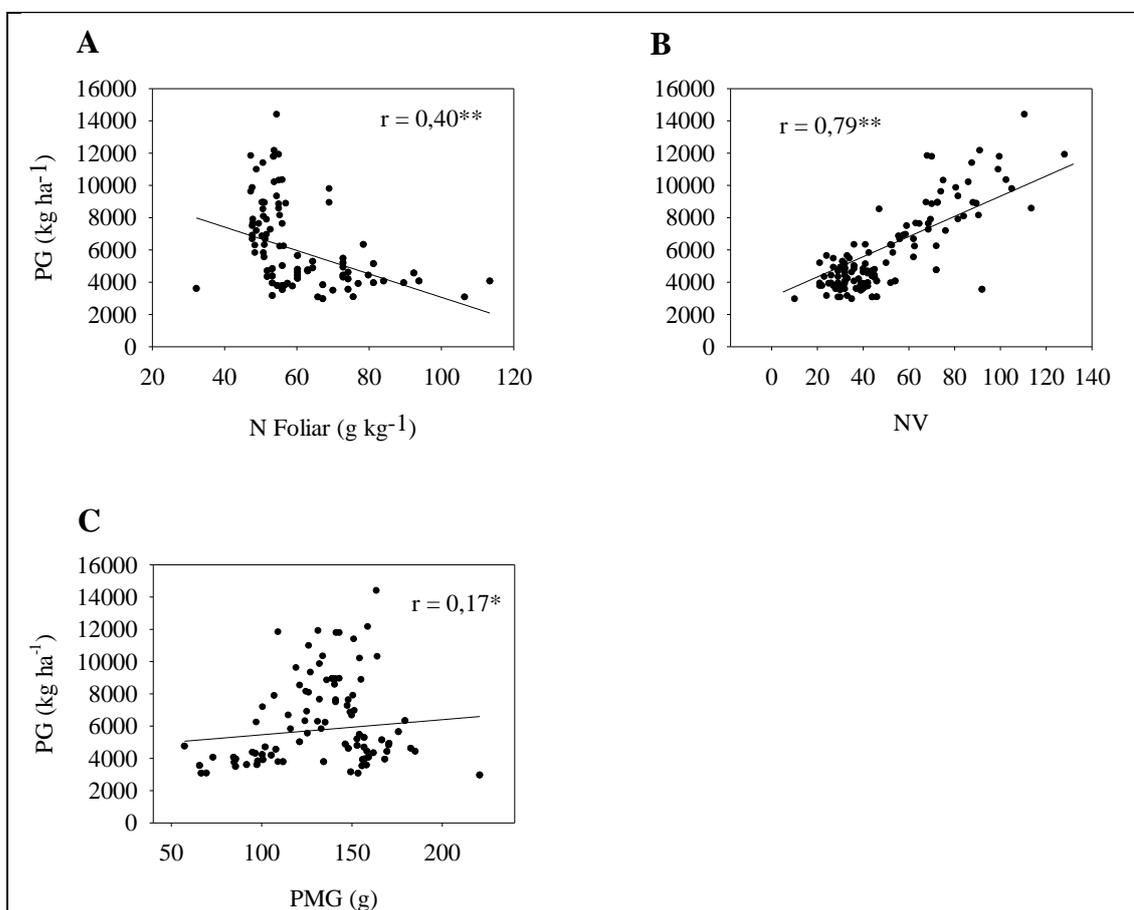


FIGURA 2 Correlação entre a produtividade de grãos da soja (PG) (kg ha⁻¹) e o teor foliar de N em R3 (g kg⁻¹) (A), o número de vagens por planta (B) e o peso de mil grãos (PMG) (C).

Quando se avalia a correlação entre teores foliares e o crescimento e, ou, produtividade, teoricamente há ajuste de uma curva em “C” em que são identificadas diferentes regiões associadas ao estado nutricional das plantas (Römheld, 2012). Com base nos teores foliares obtidos e nos níveis críticos de N foliar propostos para a cultura

da soja, há a ocorrência de somente dois pontos com valores de $32,2 \text{ g kg}^{-1}$ de N que estão abaixo da faixa de suficiência ($<36,8 \text{ g kg}^{-1}$) para a soja cultivada sob o Bioma Cerrado no Brasil Central (Kurihara et al., 2008), e, que corresponde a produtividade de grãos de 3.600 kg ha^{-1} .

O incremento de produtividade de grãos da soja pode ocorrer por dois fatores, aumento no peso de mil grãos e, ou, aumento no número de vagens. Nas áreas avaliadas, o aumento do número de vagens explica 70% do incremento da produtividade de grãos (Figura 2 B). Já em relação ao peso de mil grãos a correlação é positiva, mas explica somente 17% do incremento na produtividade (Figura 2 C).

Os coeficientes de correlação de Pearson dos teores foliares de N com os índices obtidos com o clorofilômetro, o fluorômetro e a imagens aéreas de câmeras multiespectrais estão apresentados na Figura 3. Os índices de clorofila a (ChlA) variaram de 22,1 a 54,7; clorofila b (ChlB) de 2,6 a 34,1; clorofila total (ChlT) de 25,2 a 77,0 e a relação entre clorofila a e b (ChlA:ChlB) de 1,26 a 14,4. Os índices de ChlB obtiveram correlação inversa e a relação ChlA:ChlB correlação positiva com os teores foliares de N, todavia os coeficientes de correlação foram baixos ($-0,200$ e $0,197$, respectivamente) (Figura 3).

Os teores foliares de N obtiveram correlação positiva com os índices obtidos com o fluorômetro: F_o , F_j , F_i , F_m , F_v , V_j , M_o , $FixArea$, S_m , N_{fluo} , Φ_{D_o} , ABS/RC , TR_o/RC , ET_o/RC e Dio/RC , e correlação negativa com os índices F_o/F_m , F_v/F_o , S_s , Φ_{P_o} , Ψ_o , Φ_{E_o} e Π_{ABS} (Figura 3). Dentre os índices de fluorescência de clorofila a, aqueles que obtiveram maiores coeficientes de correlação com os teores foliares de N foram Φ_{E_o} ($-0,527$) e V_j ($0,480$) (Figura 3). Os índices obtidos com imagens de câmera multiespectral NDVI, CVI, DVI e WDRVI se correlacionaram significativa e positivamente com os teores foliares de N na soja em R2 (Figura 3).

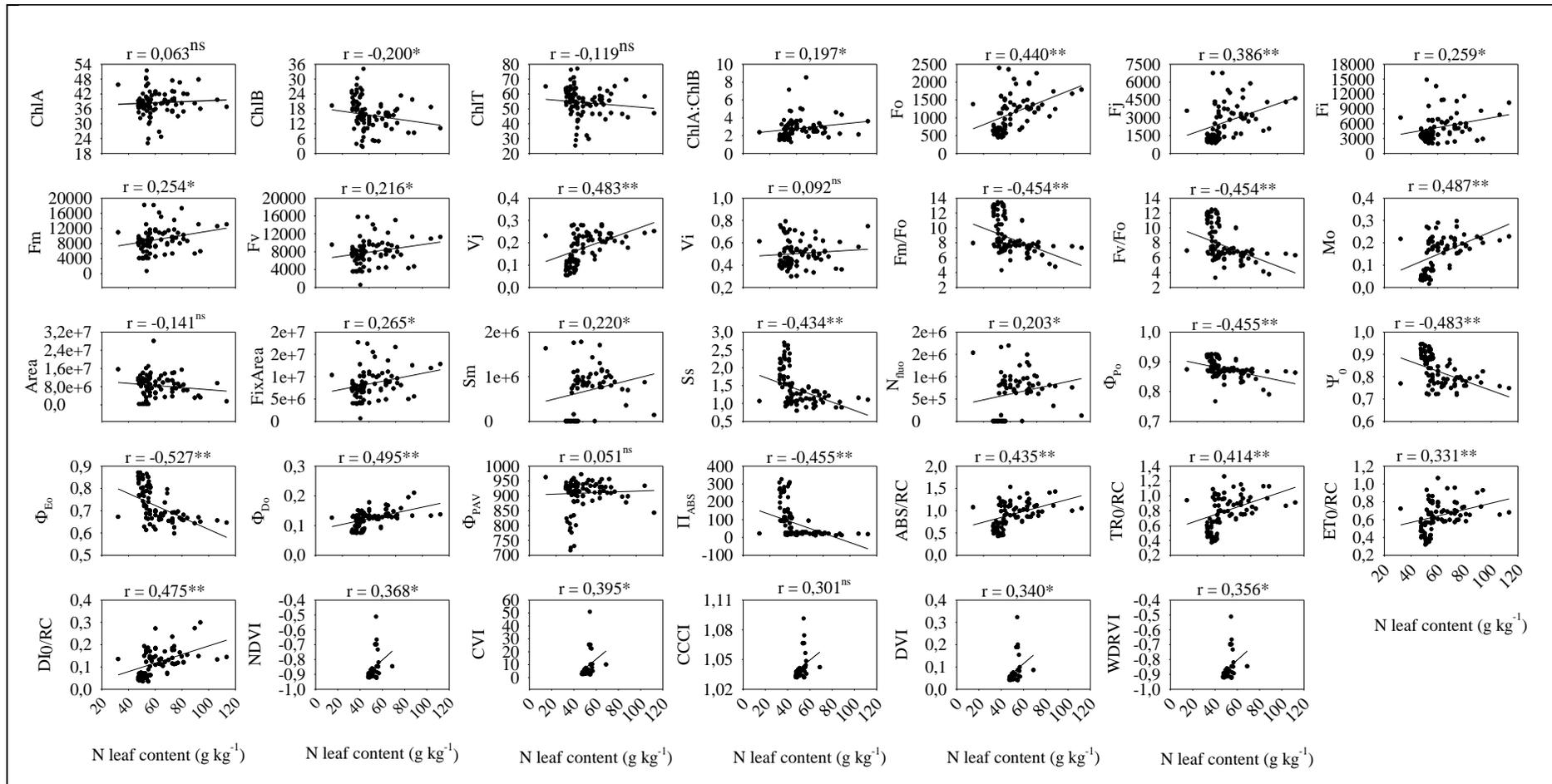


FIGURA 3. Correlação entre os teores foliares de nitrogênio (N) (g kg^{-1}) (eixo x) e os índices (eixo y) obtidos com o clorofilômetro: clorofila a (ChlA), b (ChlB) e total (ChlT), e relação ChlA:ChlB; com o fluorômetro: Fo, Fj, Fi, Fm, Fv, Vj, Vi, Fm/Fo, Fv/Fo, Mo, Area, FixArea, Sm, Ss, N_{fluo} , Φ_{Po} , Ψ_o , Φ_{Eo} , Φ_{Do} , Φ_{Pav} , Π_{ABS} , ABS/RC, TRo/RC, ETo/RC e DIo/RC; com câmeras multiespectrais: NDVI, CVI, CCCI, DVI e WDRVI. ***, * e ns Significativo a 1 e 5% e não significativo, respectivamente pelo teste de F.

Na Figura 4, estão apresentados os coeficientes de correlação de Pearson entre a produção de grãos (kg ha^{-1}) e os índices obtidos com o clorofilômetro, o fluorômetro e a imagens aéreas de câmeras multiespectrais. As correlações significativas entre os índices de clorofila e a produtividade de grãos foram negativas para ChlA e a relação ChlA:ChlB, e positivas para Chlb, porém todos eles apresentaram teores de correlação baixos (-0,255, -0,213 e 0,288, respectivamente) (Figura 4).

Quanto à correlação dos índices do fluorômetro com a produtividade de grãos, foram obtidas correlações negativas para os índices: F_o , F_j , F_i , F_m , F_v , V_j , M_o , FixArea , S_m , N_{fluo} , Φ_{D_o} , $\Phi_{P_{av}}$, ABS/RC , TRo/RC , ETo/RC e Dio/RC , e positivas para F_m/F_o , F_v/F_o , S_s , Φ_{P_o} , Ψ_o , Φ_{E_o} , Π_{ABS} , NDVI , CVI , CCI , DVI e WDRVI (Figura 4). Os índices de fluorescência de clorofila com maior correlação com a produtividade de grãos foram: Π_{ABS} (0,805) e M_o (-0,771) (Figura 4).

Os índices obtidos com imagens de câmera multiespectral NDVI , CVI , CCI , DVI e WDRVI se correlacionaram positivamente com a produtividade de grãos, DVI e NDVI , em particular, apresentaram maior correlação entre os demais índices (0,472 e 0,470, respectivamente) (Figura 4).

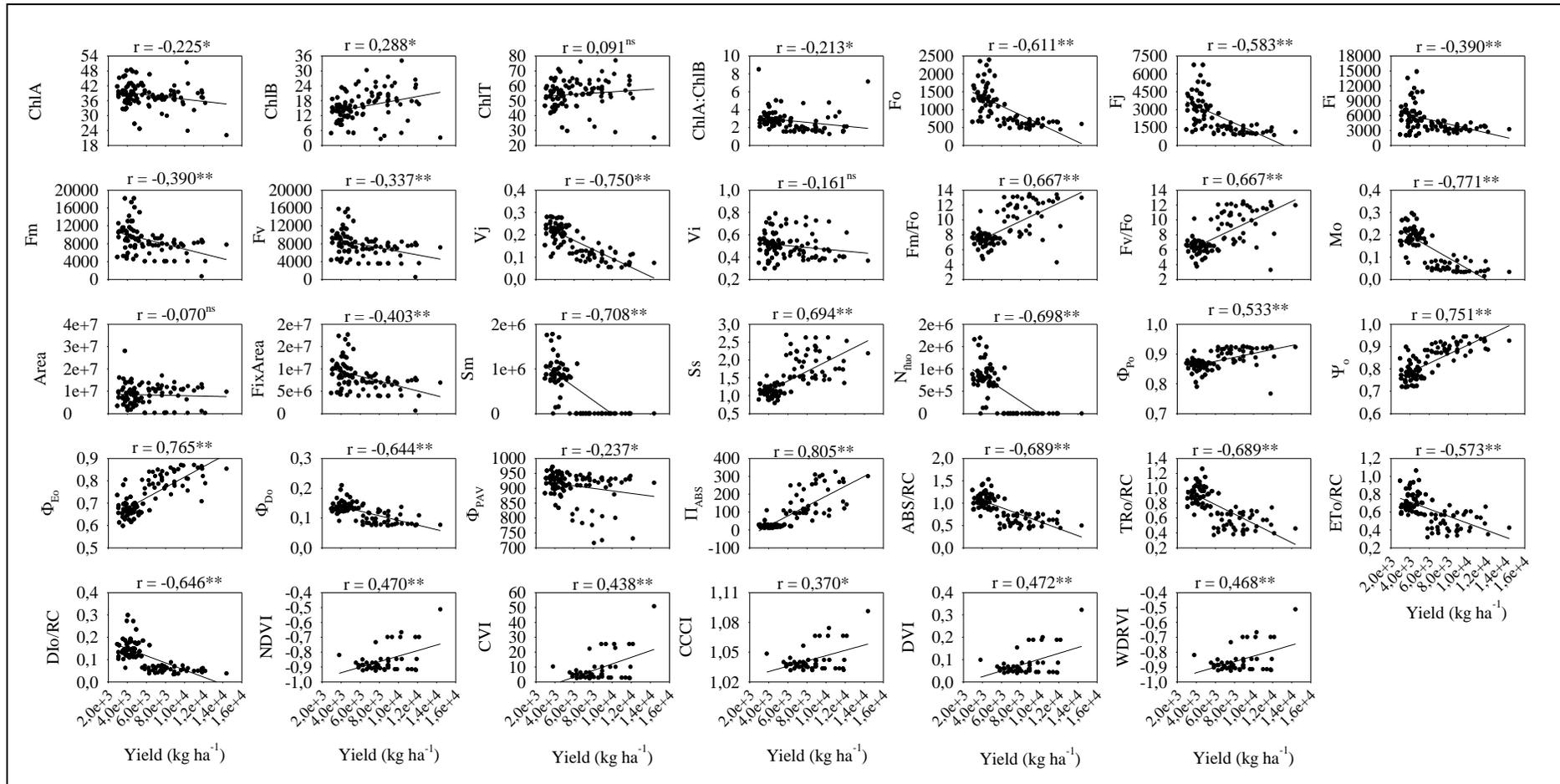


FIGURA 4. Correlação entre a Produtividade de grãos (kg ha⁻¹) (eixo x) e os índices (eixo y) obtidos com o clorofilômetro: clorofila a (ChlA), b (ChlB) e total (ChlT), e relação ChlA:ChlB; com o fluorômetro: Fo, Fj, Fi, Fm, Fv, Vj, Vi, Fm/Fo, Fv/Fo, Mo, Area, FixArea, Sm, Ss, N_{fluo}, Φ_{Po}, Ψ_o, Φ_{Eo}, Φ_{Do}, Φ_{Pav}, Π_{ABS}, ABS/RC, TR_o/RC, ET_o/RC e DI_o/RC; com câmeras multiespectrais: NDVI, CVI, CCCI, DVI e WDRVI. ** e ns Significativo a 1 e 5% e não significativo, respectivamente pelo teste de F.

4.4. DISCUSSÃO

Quando a adubação nitrogenada é feita no período reprodutivo há aumento da produtividade de grãos e redução dos teores foliares de N. Quando há aplicação em solo de altas doses de N, há a redução da atividade do sistema radicular e conseqüentemente da absorção do N aplicado, resultando em redução dos teores foliares e dos índices de clorofila (Gai et al., 2017). Todavia, independente da época da aplicação do N via solo, os relatos da literatura são controversos em relação a produtividade de grãos e os índices SPAD de clorofila, com obtenção de correlação positiva (Gai et al., 2017), ou mesmo ausência do efeito da aplicação de doses de plantio de N sobre a produtividade de grãos e os índices SPAD (Werner et al., 2016).

Os resultados descritos por Gai et al. (2017) são semelhantes aos observados no presente trabalho em que houve redução dos teores de N com o aumento da produtividade (Figuras 3 e 4). Todavia, esse efeito também pode estar associado à diluição do N nas plantas (Jarrel & Beverly, 1981), já que não houve a aplicação do fertilizante no solo, e sim foliar. Como relatado por Wesley et al. (2013), a adubação do N na fase reprodutiva da soja leva ao aumento de produtividade, mas somente em áreas de altamente produtivas ($>3808 \text{ kg ha}^{-1}$ ou $>56 \text{ bushel acre}^{-1}$), como os obtidos no presente trabalho. Em áreas com produtividades de grãos de soja acima de 2600 kg ha^{-1} no Brasil, houve incrementos de até 14,7% com a adubação foliar de N em R2 (Cassim et al., 2020).

O aumento da produtividade da soja com a aplicação de N na fase reprodutiva está associado com a redução do abortamento de flores, aumentando o número de vagens, como corroborado pelos resultados obtidos no presente trabalho (Figura 2) (Mendes, 2008; Moreira et al., 2015; Moreira et al., 2017). O aumento do número de vagens na soja resulta no incremento da força dreno da planta e conseqüentemente há maior assimilação de C e N (Jin et al., 2017). Todavia, há relatos da ausência de resposta de produtividade da soja em função da adubação nitrogenada na fase reprodutiva em área com alta produtividade ($>4.000 \text{ kg ha}^{-1}$), devendo ao fato do N obtido através da fixação biológica ter suprido a necessidade da planta (Saturno et al., 2017).

Os teores foliares de N apresentaram baixa correlação com os teores de ChlB e ChlA:ChlB (Figura 3). A ausência de correlação entre os teores foliares de N com os teores totais de clorofila já foram relatados na literatura para diversas cultivares de soja (Fritschi & Ray, 2007). Todavia, plantas de soja cultivadas sob deficiência de N em

solução nutritiva apresentaram redução significativa de ChlT (Li et al., 2018). Com o aumento da produtividade há redução da relação ChlA:ChlB, e, é um indicativo do aumento da associação das clorofilas com o PSI e o centro de reação do PSII, pois as proteínas 2 (LHC2) do complexo antena do PSII possuem majoritariamente ChlB (Evans, 1989; Green & Durnford, 1996). Assim, o aumento da relação ChlA:ChlB é um indicativo de melhora da ultraestrutura dos cloroplastos (Fritschi & Ray, 2007). Esse resultado pode ser corroborado, também, com a redução do índice M_0 , que indica melhora da ultraestrutura dos cloroplastos (Strasser et al., 2000), com o aumento da produtividade de grãos (Figura 4).

Observa-se que entre a PG e o índice de ChlA houve correlação negativa, com a redução dos índices de ChlA de acordo com o aumento da produtividade. Esse fenômeno é indicativo de que os complexos antena, provavelmente apresentavam alta eficiência sem a necessidade de produção de mais ChlA para manutenção dos processos fotossintéticos. A correlação entre PG e ChlB, entretanto, foi positiva (Figura 4). Esse pigmento está relacionado com a ampliação da faixa de absorção luminosa das plantas, complementando a absorção de luz realizada pela ChlA (Kume et al., 2018) e também como pigmento acessório protetor do fotossistema contra a fotoxidação (Lin et al., 2009; Taiz et al., 2017).

O aumento da produtividade de grãos da soja, no presente estudo, pode ser explicado pela redução da fluorescência, principalmente em F_j e F_i , que são as perdas de energia quando os elétrons estão sendo transmitidos dentro do complexo antena (Strasser et al., 2000). Com a redução das perdas de energia na forma de fluorescência, houve aumento da eficiência fotoquímica. Sendo assim, quanto maior a produtividade maior a eficiência fotoquímica das plantas. Além desses índices, M_0 obteve alta correlação negativa com a PG (Figura 4), e reflete a taxa de fechamento dos centros de reação do PSII. Quanto menor o seu valor, melhor a estrutura do fotossistema, ou seja, é um índice indireto que reflete a organização estrutural do cloroplasto (Strasser et al., 2000).

Com o aumento da PG, aumentou-se Ψ_0 e Φ_{E_0} , índices que se relacionam diretamente ao início do processo fotossintético, sendo relativos à probabilidade de a energia de excitação mover um elétron após a Q_A e a probabilidade de a energia de um fóton absorvido mover um elétron após a Q_A , respectivamente (Strasser et al., 2000). A Q_A é o primeiro aceptor de elétrons das quinonas, sendo responsável pela aceção do elétron oriundo do PSII. Para o pleno funcionamento da fotossíntese, é necessário que a Q_A repasse os elétrons para a quinona B (Q_B), e dê início à cadeia transportadora de

elétrons (Hasegawa et al., 2014). Aumentando a probabilidade do repasse de elétrons ocorrer, maiores são as chances da cadeia transportadora de elétrons iniciar o processo fotossintético e funcionar sem interrupções.

4.4.1. Componentes principais

Os dados médios de todas as variáveis independentes foram estandardizados com auxílio do comando *scale* do R (R CORE TEAM, 2020). Posteriormente, foi realizada a análise de componentes principais e selecionadas todas as componentes com autovalores igual e superior a um, conforme o critério de Kaiser (Kaiser, 1960) (Figuras 5 A e B).

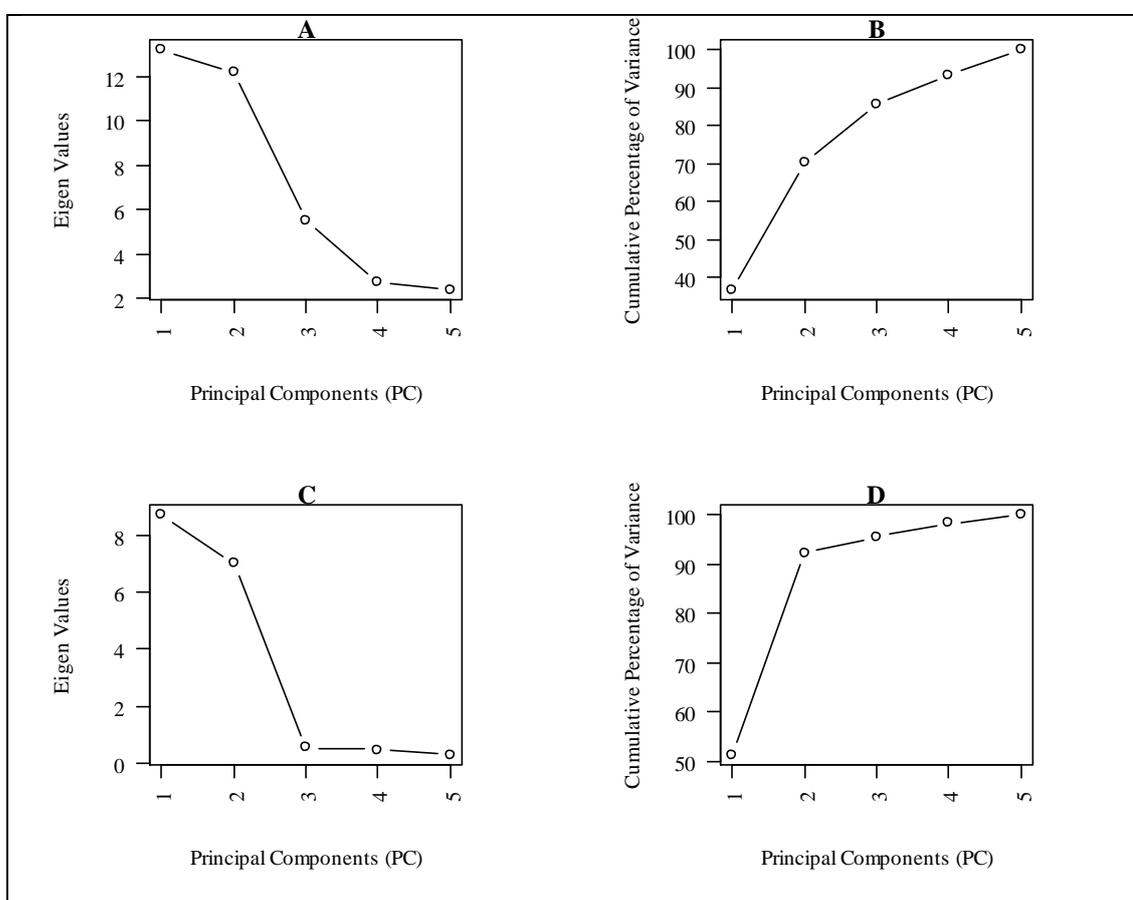


FIGURA 5 Autovalores e porcentagem acumulativa da variância das componentes principais 1 a 5 com todas as variáveis (A e B, respectivamente), e somente com as variáveis com correlação significativa a 1 e 5% (pelo teste de F) com as coordenadas das componentes principais (C e D, respectivamente).

O resultado da análise de componentes principais e sua correlação de Pearson com as variáveis analisadas é apresentado na Tabela 4, e todas os cinco componentes principais juntos explicam 100% da variação dos dados e possuem autovalores superiores a um (Figuras 5 A e B).

TABELA 4 Coeficientes de correlação entre as coordenadas individuais de cada tratamento nos componentes principais (CP) 1 a 5 e as médias das variáveis obtida em cada tratamento.

<i>Índices</i>	<i>CP1</i>	<i>CP2</i>	<i>CP3</i>	<i>CP4</i>	<i>CP5</i>
PG	-0,324 ^{ns}	-0,861*	0,003 ^{ns}	0,173 ^{ns}	0,351 ^{ns}
N	-0,738 ^{ns}	-0,404 ^{ns}	-0,532 ^{ns}	0,006 ^{ns}	0,097 ^{ns}
CHLA	-0,452 ^{ns}	0,563 ^{ns}	0,220 ^{ns}	0,638 ^{ns}	-0,153 ^{ns}
CHLB	-0,439 ^{ns}	0,721 ^{ns}	0,221 ^{ns}	0,475 ^{ns}	-0,115 ^{ns}
CHLT	-0,387 ^{ns}	0,592 ^{ns}	0,140 ^{ns}	0,649 ^{ns}	-0,244 ^{ns}
CHLA:CHLB	0,328 ^{ns}	-0,707 ^{ns}	0,170 ^{ns}	-0,546 ^{ns}	0,255 ^{ns}
Fo	0,193 ^{ns}	0,916*	0,284 ^{ns}	0,204 ^{ns}	0,021 ^{ns}
Fj	0,298 ^{ns}	0,922**	0,239 ^{ns}	0,052 ^{ns}	0,042 ^{ns}
Fi	0,386 ^{ns}	0,852*	0,264 ^{ns}	0,157 ^{ns}	0,175 ^{ns}
Fm	0,809*	0,549 ^{ns}	0,152 ^{ns}	0,147 ^{ns}	0,001 ^{ns}
Fv	0,848*	0,491 ^{ns}	0,146 ^{ns}	0,135 ^{ns}	0,018 ^{ns}
Vj	-0,143 ^{ns}	0,892*	0,172 ^{ns}	-0,391 ^{ns}	0,034 ^{ns}
Vi	-0,383 ^{ns}	0,844*	-0,026 ^{ns}	-0,106 ^{ns}	0,359 ^{ns}
Fo/Fm	0,871*	-0,383 ^{ns}	-0,130 ^{ns}	0,196 ^{ns}	-0,198 ^{ns}
Fv/Fo	0,871*	-0,383 ^{ns}	-0,130 ^{ns}	0,196 ^{ns}	-0,198 ^{ns}
Mo	0,053 ^{ns}	0,829*	0,462 ^{ns}	-0,311 ^{ns}	0,027 ^{ns}
Area	0,840*	0,321 ^{ns}	-0,248 ^{ns}	0,240 ^{ns}	0,270 ^{ns}
Fix Area	0,754 ^{ns}	0,614 ^{ns}	0,178 ^{ns}	0,153 ^{ns}	0,007 ^{ns}
Sm	-0,134 ^{ns}	0,324 ^{ns}	-0,665 ^{ns}	0,302 ^{ns}	0,586 ^{ns}
Ss	-0,888*	0,271 ^{ns}	-0,349 ^{ns}	-0,042 ^{ns}	-0,125 ^{ns}
N_{fluo}	-0,254 ^{ns}	0,250 ^{ns}	-0,577 ^{ns}	0,372 ^{ns}	0,634 ^{ns}
Φ_{Po}	0,992**	-0,068 ^{ns}	-0,088 ^{ns}	0,055 ^{ns}	0,027 ^{ns}
Ψ_o	0,143 ^{ns}	-0,892*	-0,172 ^{ns}	0,391 ^{ns}	-0,034 ^{ns}
Φ_{EO}	0,442 ^{ns}	-0,816*	-0,180 ^{ns}	0,327 ^{ns}	-0,010 ^{ns}
Φ_{Do}	-0,918**	0,296 ^{ns}	-0,125 ^{ns}	-0,211 ^{ns}	-0,101 ^{ns}
Φ_{Pav}	0,970**	-0,217 ^{ns}	-0,046 ^{ns}	0,080 ^{ns}	0,060 ^{ns}
Π_{ABS}	-0,292 ^{ns}	-0,651 ^{ns}	-0,389 ^{ns}	0,403 ^{ns}	-0,422 ^{ns}
ABS/RC	0,663 ^{ns}	-0,354 ^{ns}	0,655 ^{ns}	0,002 ^{ns}	0,078 ^{ns}
TRo/RC	0,750 ^{ns}	-0,313 ^{ns}	0,569 ^{ns}	-0,020 ^{ns}	0,126 ^{ns}
ETo/RC	0,724 ^{ns}	-0,544 ^{ns}	0,401 ^{ns}	0,095 ^{ns}	0,102 ^{ns}
DIo/RC	-0,461 ^{ns}	-0,086 ^{ns}	0,519 ^{ns}	0,044 ^{ns}	-0,713 ^{ns}
NDVI	-0,557 ^{ns}	-0,415 ^{ns}	0,666 ^{ns}	0,139 ^{ns}	0,234 ^{ns}
CVI	-0,540 ^{ns}	-0,451 ^{ns}	0,643 ^{ns}	0,149 ^{ns}	0,263 ^{ns}
CCCI	-0,593 ^{ns}	-0,387 ^{ns}	0,641 ^{ns}	0,190 ^{ns}	0,228 ^{ns}
DVI	-0,569 ^{ns}	-0,424 ^{ns}	0,640 ^{ns}	0,171 ^{ns}	0,241 ^{ns}
WDRVI	-0,552 ^{ns}	-0,420 ^{ns}	0,669 ^{ns}	0,138 ^{ns}	0,231 ^{ns}

**,* e ^{ns} Significativo a 1, 5% e não significativo, respectivamente.

As variáveis que não apresentaram correlação significativa a 1 e 5% pelo teste de F com as 5 componentes principais (Tabela 4) foram descartadas. Em seguida, foi realizada novamente a análise de componentes principais. Na nova análise somente as

CP1 e CP2 apresentaram autovalores superiores a 1 (critério de Kaiser) e juntas explicaram 92,36% da variação dos dados (Figura 3 C e D, respectivamente).

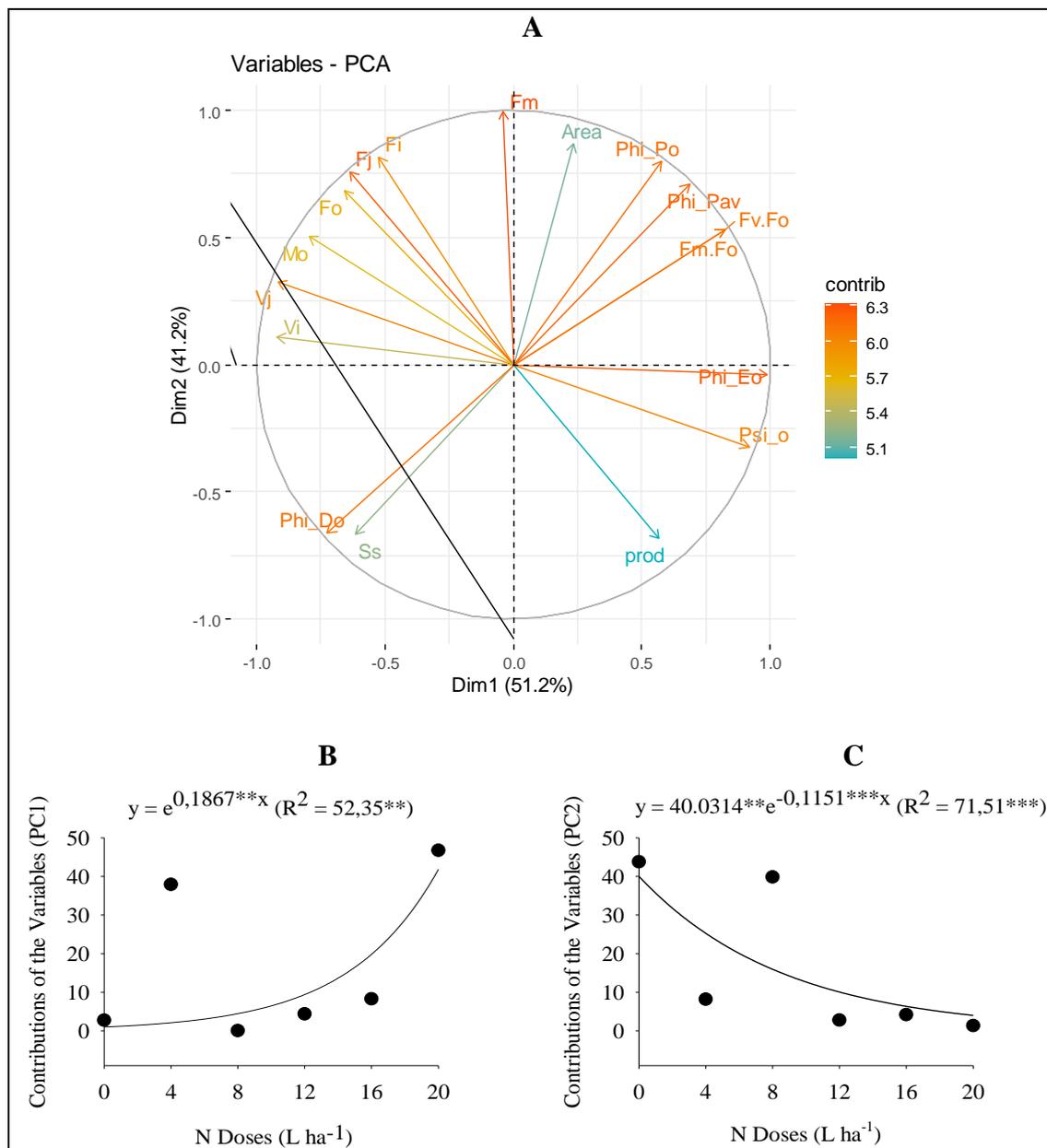


FIGURA 6 Mapa de projeção espacial da ordenação dos vetores dos componentes principais CP1 e CP2 por contribuição na variação dos dados (A), onde: Fo – fluorescência a 50 μs ; Fj - fluorescência a 2 ms; Fi - fluorescência a 60 ms; Fm – fluorescência máxima; Vj – fluorescência variável a 2 ms; Vi - fluorescência variável a 60 ms; Fm.Fo – Produção quântica basal dos processos não fotoquímicos no PSII; Fv.Fo – eficiência quântica potencial do PSII; Mo - taxa líquida do fechamento dos centros de reação do PSII; Area - quantidade de aceptores de elétrons; Ss - quantidade de energia necessária para reduzir a Q_A uma única vez; Phi_Po (Φ_{Po}) - eficiência máxima do PSII; Psi_o (Ψ_o) - probabilidade da energia de excitação mover um elétron após a Q_A ; Phi_Eo (Φ_{Eo}) - probabilidade da energia de um fóton absorvido mover um elétron após a Q_A ; Phi_Do (Φ_{Do}) - rendimento de dissipação de energia; Phi_Pav (Φ_{Pav}) - rendimento quântico médio de reações fotoquímicas primárias; Prod – produtividade de grãos ($kg ha^{-1}$); e ajuste de modelos da contribuição individual de cada tratamento com as componentes principais (CP1 e CP2) em função das doses de N ($L ha^{-1}$) (B e C). ***, ** e * Significativo a 1, 5 e 10%, respectivamente, pelo teste de F.

Após plotar as variáveis significativas da Tabela 4 no mapa de projeção espacial de vetores da CP1 e CP2 (Figura 6 A), pode-se observar que as variáveis diretamente proporcionais à produtividade de grãos (PG) foram Ψ_0 e Φ_{E_0} , seguidos de F_0/F_m , F_v/F_0 , $\Phi_{P_{av}}$ e Φ_{P_0} . Ou seja, estes são índices que potencialmente podem ser utilizados na previsão de produção de grãos, principalmente Ψ_0 e Φ_{E_0} . Ou seja, o aumento da PG está diretamente correlacionado com o aumento da eficiência na transmissão da energia dos fótons absorvidos, que conseqüentemente leva à redução das perdas de energia na forma de fluorescência.

Quanto às variáveis inversamente proporcionais à produção, destacam-se principalmente V_i , V_j , M_0 , F_0 , F_j e F_i . Esses índices também podem ter potencial para serem utilizados em previsão de produção de grãos, especialmente F_0 , F_j e F_i que podem ser obtidos com medidores de fluorescência mais simples e de forma direta, sem o uso de fórmulas.

O ajuste de modelos exponenciais da contribuição da variância das CP1 e CP2 em função das doses de N aplicados via foliar, permite afirmar que com o aumento das doses de N há aumento exponencial dos valores da CP1 e redução exponencial dos valores da CP2 (Figuras 6 B e C, respectivamente). O aumento exponencial da CP1 está em função do incremento das doses de N, que está no mesmo sentido dos vetores da PG, da eficiência na transmissão de energia e inversamente proporcional às perdas de energia na forma de fluorescência (Figura 6 A). Assim, a adubação nitrogenada complementar na fase reprodutiva da soja resulta em aumento na produtividade de grãos (Figura 7), corroborando com os resultados obtidos por Mendes (2008), Moreira et al., (2015) e Moreira et al., (2017). E, que os teores foliares de N se correlacionam com os índices obtidos pelos equipamentos inversamente proporcional à produtividade de grãos.

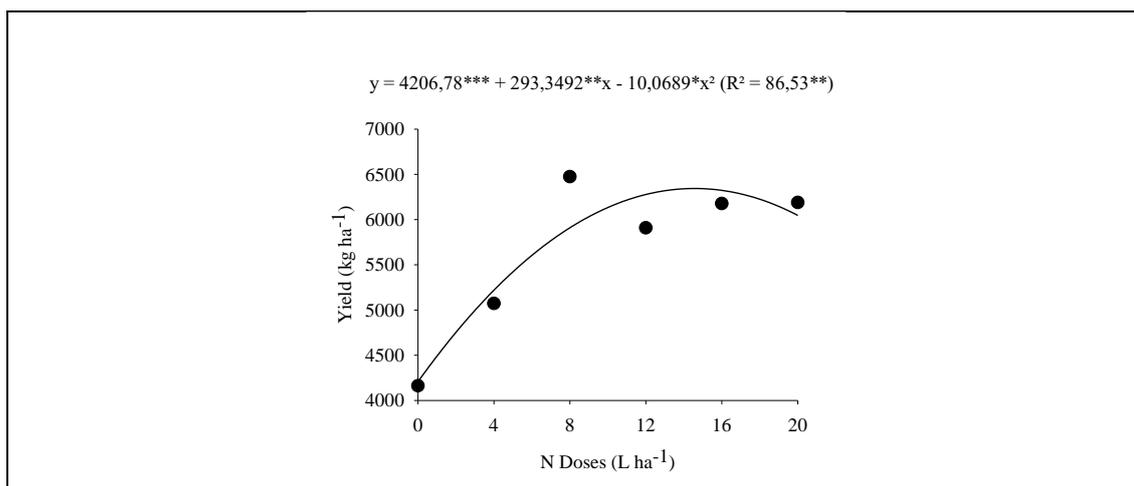


FIGURA 7 Produtividade média da soja das três áreas avaliadas em função das doses de N. ***,** e* Significativo a 1, 5 e 10%, respectivamente, pelo teste de F.

A ausência de correlação linear entre os teores foliares de nutrientes e a PG dificulta a interpretação dos dados do presente experimento. Sendo assim, é necessário aumentar volume de dados e que correspondam a todos as fases da curva em “C” que correlaciona PG e teores foliares de nutrientes (Rölmheld, 2012). Com a obtenção dos índices em lavouras que possam corresponder a todas as regiões deste modelo, será possível explicar melhor a relação que existe entre os índices obtidos com o fluorômetro e os teores foliares de N.

De maneira geral, como não foram obtidos teores de N abaixo da faixa de suficiência, para a soja cultivada no bioma Cerrado (Kurihara et al., 2008), as variações nos índices de fluorescência em função das variações nos teores foliares de N não refletem as alterações desses índices em condições de deficiência de N. Como relatado na literatura, em plantas deficientes em N há redução dos teores de clorofila, com danos ao complexo antena e com isso redução da eficiência na transmissão de energia dos fótons absorvidos e aumento de perdas na forma de fluorescência (Shangguan et al., 2000).

Na cultura do milho, a nutrição nitrogenada alterou somente a eficiência fotoquímica (Φ_{P_0}), aumentando de 0,81 para 0,83, aproximadamente, com o aumento das doses do nutriente e somente em avaliações no pendoamento da cultura (Simkó, et al., 2020). No tomateiro a deficiência de N não alterou os teores dos pigmentos fotossintéticos, Φ_{P_0} a valores próximos a 0,5 quatro semanas após a indução da deficiência (Pérez-Molina et al., 2020). No presente trabalho a Φ_{P_0} variou de 0,87 a 0,88, considerados altos, e que a variação nos teores de N não foi suficiente para reduzir a Φ_{P_0} como relatado pela literatura. De modo geral, os valores da Φ_{P_0} em plantas cultivadas sem condições de estresse variam de 0,8 a 0,83 (Bjorkman & Demming 1987).

Em arroz, plantas sob deficiência de N apresentaram redução significativa dos índices de clorofila (SPAD), com conseqüente redução de proteínas envolvidas na assimilação de C, como a Rubisco e a Rubisco ativase, redução da Φ_{P_0} , de 0,803 para 0,772, da cadeia de transporte de elétrons e aumento na perda de energia na forma de calor (Tantray et al., 2020). Em mudas de cafeeiro a deficiência de N reduziu a eficiência fotoquímica de 0,877 para 0,678, resultando em redução da atividade fotossintética as plantas (Souza et al., 2020).

A redução da eficiência fotoquímica em plantas deficientes em N pode ser explicada pelos seguintes fatores: redução da condutância estomática das células do mesófilo e do feixe da bainha; redução da concentração interna de CO_2 ; redução das proteínas e pigmentos do complexo antena com conseqüente redução do transporte de elétrons e aumento da dissipação de energia na forma de calor e redução do conteúdo e da atividade de enzimas envolvidas na assimilação de C (Mu & Chen, 2021). As plantas de metabolismo fotossintético C3, sob condições de deficiência de N aumentam a alocação do nutriente para os processos de absorção e transporte de luz (Mu & Chen, 2021).

Sob solos tropicais da região amazônica, não houve resposta do feijoeiro a adubação nitrogenada, mas houve aumento da Φ_{P_0} com a dose de 120 kg ha^{-1} de N, obtendo valores superiores a 0,8, resultado atribuído a manutenção da ultraestrutura dos cloroplastos mantendo intacto os centros de reação do PSII (Suárez et al., 2021). Pequenas variações na Φ_{P_0} , e com valores acima de 0,8, como os encontrados no presente trabalho, podem estar associadas a manutenção da ultraestrutura dos cloroplastos (Correia et al., 2006), podendo ocorrer, também em plantas deficientes em N, em função do aumento do *queching* não fotoquímico (Shrestha et al., 2012), que está associado ao ciclo das xantofilas, que é um mecanismo de proteção do PSII contra danos fotoinibitórios (Johnson et al., 2008 e Murchie & Ruban, 2020).

O aumento da produtividade com as doses de N, pode estar associado com a redução no abortamento de flores (Moreira et al., 2017), resultando em aumento da produtividade e conseqüente aumento dos drenos de fotoassimilados. Em resposta ao aumento do fator dreno, houve aumento da eficiência na transformação dos fótons absorvidos em energia bioquímica e redução na perda na forma de fluorescência (Figura 3 A).

No presente trabalho, os sensores obtiveram maior correlação com a produtividade de grãos do que com a nutrição nitrogenada da soja. Isso pode se dar por diversos motivos: a sensibilidade dos sensores em identificar fatores que influenciam a produção além do teor de N; o fato das plantas com maior produção terem apresentado menor teor foliar de N, devido à constante realocação desse nutriente para os drenos das plantas e também pela relação entre a produtividade e os teores foliares de nutrientes não são lineares.

4.5. CONCLUSÃO

Para os conjuntos dos dados do presente trabalho, a variação dos índices obtidos pelos sensores obteve melhor correlação com a produtividade de grãos do que com a estimativa da nutrição nitrogenada, especialmente os índices Ψ_o e Φ_{Eo} do fluorômetro. Os resultados apontam para o potencial uso desses sensores na predição de produtividade da soja, além da sua usual função de detecção de deficiência nutricional, porém são necessários mais estudos objetivando especificamente esse uso dos mesmos na cultura para que possa ser estabelecido quais índices serão utilizados.

4.6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Björkman, O., Demmig, B. Photon yield of O₂ evolution and chlorophyll fluorescence characteristics at 77 K among vascular plants of diverse origins. *Planta* v.170, p.489–504 1987. <https://doi.org/10.1007/BF00402983>
- Cassim, B.M.A.R.; Machado, A.P.M.; Fortune, D.; Moreira, F.R.; Zampar, E.J. de O.; Batista, M. A.. Effects of foliar application of urea and urea-formaldehyde/triazone on soybean and corn crops. *Agronomy*, v.10, n.10, 1549. 2020. <https://doi.org/10.3390/agronomy10101549>.
- Clevers, J. G. P. W., & Gitelson, A. A. Remote estimation of crop and grass chlorophyll and nitrogen content using red-edge bands on Sentinel-2 and -3. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v.23, p.344–351. 2013. doi:10.1016/j.jag.2012.10.008
- Correia, M.J.; Osório, M.L.; Osório, J.; Barrote, I.; Martins, M.; David, M. M.. Influence of transient shade periods on the effects of drought on photosynthesis, carbohydrate accumulation and lipid peroxidation in sunflower leaves. *Environmental and Experimental Botany*, v.58, n.1-3, p.75–84. 2006. doi:10.1016/j.envexpbot.2005.06.015
- Evans, J.R.: Photosynthesis and nitrogen relationships in leaves of C₃ plants. *Oecologia*, v.78, p.9-19, 1989. <https://doi.org/10.1007/BF00377192>.

Fritschi, F. B.; Rau, J. D. Soybean leaf nitrogen, chlorophyll content, and chlorophyll a/b ratio. *Photosynthetica*, v.45, n.1. p.92-98. 2007. Doi: <https://doi.org/10.1007/s11099-007-0014-4>.

Gai, Z.; Zhang, J.; Li, C. Effects of starter nitrogen fertilizer on soybean root activity, leaf photosynthesis and grain yield. *PLOS ONE*, v.12, n.4, e0174841. 2017. doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0174841> .

Green, B. R., & Durnford, D. G. The chlorophyll-carotenoid proteins of oxygenic photosynthesis. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, v.47(1), p.685–714. 1996. doi:10.1146/annurev.arplant.47.1.685

Guebel, D. V., Nudel, B. C., Giulietti, A. M. A simple and rapid micro-Kjeldahl method for total nitrogen analysis. *Biotechnol Tech.* v.5 p. 427–430. 1991. Doi: [10.1007/BF00155487](https://doi.org/10.1007/BF00155487)

Hasegawa, K., Noguchi, T. Molecular interactions of the quinone electron acceptors QA, QB, and QC in photosystem II as studied by the fragment molecular orbital method. *Photosynth Res* v.120, p.113–123. 2014. <https://doi.org/10.1007/s11220-012-9787-9>

Huang, Y.; Lan, Y.; Ge, Y.; Hoffmann, W. C.; Thomson, S. J. Spatial modeling and variability analysis for modeling and prediction of soil and crop canopy coverage using multispectral imagery from an airborne remote sensing system. *Transactions of the ASABE*, v. 53, n. 4, p. 1321-1329, 2010. Doi:10.13031/2013.32582

Herrmann, I.; Karnieli, A.; Bonfil, D. J.; Cohen, Y.; ALCHANATIS, V. SWIRbased spectral indices for assessing nitrogen content in potato fields. *International Journal of Remote Sensing*, v. 31, n. 19, p. 5127-5143, 2010. Doi:10.1080/01431160903283892

Jarrell, W. M., & Beverly, R. B. The Dilution Effect in Plant Nutrition Studies. *Advances in Agronomy* Volume 34, p.197–224. 1981. doi:10.1016/s0065-2113(08)60887-1

Jia, M., Colombo, R., Rossini, M., Celesti, M., Zhu, J., Cogliati, S., Cheng, T., Tian, W., Zhu, Y., Yao, X. Estimation of leaf nitrogen content and photosynthetic nitrogen use efficiency in wheat using sun-induced chlorophyll fluorescence at the leaf and canopy scales. *European Journal of Agronomy*, v.122, n.126192. 2021. doi:10.1016/j.eja.2020.126192

Jin, J.; Li, X.; Liu, X.; Wang, G.; Tang, C.; Yu, Z.; Wang, X.; Hebert, S.J.. Elevated CO₂ alters distribution of nodal leaf area and enhances nitrogen uptake contributing to yield increase of soybean cultivars grown in Mollisols. *PLoS ONE*, v.12, n.5., e0176688. 2017. Doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0176688>.

Johnson, M. P., Davison, P. A., Ruban, A. V., & Horton, P. The xanthophyll cycle pool size controls the kinetics of non-photochemical quenching in *Arabidopsis thaliana*. *FEBS Letters*, v.582(2), p.262–266. 2007. doi:10.1016/j.febslet.2007.12.016

Kaiser, H. F. The application of electronic computers to factor analysis. *Educational and Psychological Measurement*, v.20, p.141–151. 1960. <https://doi.org/10.1177/001316446002000116>.

Kao, W.-Y.; Forseth, I.N. Diurnal leaf movement, chlorophyll fluorescence and carbon assimilation in soybean grown under different nitrogen and water availabilities. *Plant*,

Cell and Environment, Oxford, v.15, p.703-710, 1992. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.1992.tb01012.x>

Kume, A., Akitsu, T. & Nasahara, K.N. Why is chlorophyll b only used in light-harvesting systems? J Plant Res v.131, p.961–972. 2018. <https://doi.org/10.1007/s10265-018-1052-7>

Kurihara, C. H.; Staut, L. A.; Maeda, S. Faixas de suficiência de nutrientes em folhas de soja, em Mato Grosso do Sul e Mato Grosso, definidas pelo uso do método DRIS de diagnose do estado nutricional. In: Reunião de pesquisa de soja da região central do Brasil, 30., 2008, Londrina. Resumos... Londrina: Embrapa Soja, 2008. (Embrapa Soja. Documentos, 304).

Li, M.; Xu, J.; Wang, X.; Fu, H.; Zhao, M.; Wang, H.; Shi, L.. Photosynthetic characteristics and metabolic analyses of two soybean genotypes revealed adaptive strategies to low-nitrogen stress. Journal of Plant Physiology, v.229, p.132-141. 2018. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2018.07.009>.

Lin, Z.-F., Lin, G.-Z., & Peng, C.-L. Enhancement of susceptibility to photoinhibition and photooxidation in rice chlorophyll b-less mutants. Photosynthetica, v.47(1), p.46–54. 2009. doi:10.1007/s11099-009-0009-4

Martinazzo, E. G., A. Ramm and M. A. Bacarin. The chlorophyll a fluorescence as an indicator of the temperature stress in the leaves of *Prunus persica*. Braz. J. Plant Physiol. v. 24, p. 237–246. 2012. Doi: <https://doi.org/10.1590/S1677-04202013005000001>.

Mendes, I. de C.; Reis Junior, F.B. dos; Hungria, M.; Sousa, D.M.G. de; Campo, R.J. Adubação nitrogenada suplementar tardia em soja cultivada em latossolos do Cerrado. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.43, n.8, p.1053-1060. 2008. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2008000800015>.

Moreira, A., L.A.C. Moraes, G. Schroth, and J.M.G. Mandarino. Effect of nitrogen, row spacing, and plant density on yield, yield components, and plant physiology in soybean-wheat intercropping. Agronomy Journal. v.107 p.2162–2170. 2015. doi:10.2134/agronj15.0121

Moreira, A., Moraes, L. A. C., Schroth, G., Becker, F. J., & Mandarino, J. M. G. Soybean yield and nutritional status response to nitrogen sources and rates of foliar fertilization. Agronomy Journal, v.109(2), 629. 2017. Doi: <https://doi.org/10.2134/agronj2016.04.0199>

Mu, X.; Chen, Y.. The physiological response of photosynthesis to nitrogen deficiency. Plant Physiology and Biochemistry, v.158, p.76-82. 2021. doi:10.1016/j.plaphy.2020.11.019

Murchie, E.H.; Ruban, A.V.. Dynamic non-photochemical quenching in plants: from molecular mechanism to productivity. The Plant Journal, v.101, n.4, p.885-896. 2020. doi:10.1111/tpj.14601

Padilla, F. M., Farneselli, M., Gianquinto, G., Tei, F., & Thompson, R. B. Monitoring nitrogen status of vegetable crops and soils for optimal nitrogen management. Agricultural Water Management, v.241, 106356. 2020. doi:10.1016/j.agwat.2020.106356

Pérez-Molina, J.P.; Lara, R.C.; Brenes, I.P.; Trejos, V.A.; Traña, A.Q.. Chlorophyll fluorescence and biomass partitioning within light and nitrogen deficiency: An example of the use of the R programming language for teaching. *UNED Research Journal*, Vol. 12(1): 2629. 2020. Doi:10.22458/urj.v12i1.2629

R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2020. Disponível em: <https://www.R-project.org/>

Römheld, V. Diagnosis of deficiency and toxicity of nutrients. In: Marschner, P. *Mineral Nutrition of higher plants*. London: Elsevier. 2012. p. 299-312.

Salvagiotti, F.; Cassman, Kenneth G.; Specht, James E.; Walters, Daniel T.; Weiss, Albert; and Dobermann, Achim R. Nitrogen uptake, fixation and response to fertilizer N in soybeans: A review. *Agronomy & Horticulture -- Faculty Publications*. v.133 p 1-13. 2008. Doi: 10.1016/j.fcr.2008.03.001

Santos, H.G. dos; Jacomine, P.K.T.; Anjos, L.H.C. dos; Oliveira, V.A. de; Lumberras, J.F.; Coelho, M.R.; Almeida, J.A. de; Cunha, T.J.F.; Oliveira, J.B. de. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. 3.ed. rev. e ampl. Brasília: Embrapa, 2013. 353p.

Saturno, D.F.; Cerezini, P.; Silva, P.M. da; Oliveira, A.B. de; Oliveira, M.C.N. de; Hungria, M.; Nogueira, M. A.. Mineral nitrogen impairs the biological nitrogen fixation in soybean of determinate and indeterminate growth types. *Journal of Plant Nutrition*, v.40, n.12. 2017. Doi: <https://doi.org/10.1080/01904167.2017.1310890>.

Shangguan, Z., Shao, M., & Dyckmans, J. Effects of Nitrogen Nutrition and Water Deficit on Net Photosynthetic Rate and Chlorophyll Fluorescence in Winter Wheat. *Journal of Plant Physiology*, v. 156(1), p. 46–51. 2000. Doi:10.1016/s0176-1617(00)80271-0

Shrestha, S.; Brueck, H.; Asch, F.. Chlorophyll index, photochemical reflectance index and chlorophyll fluorescence measurements of rice leaves supplied with different N levels. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, n.113, v.7–13, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2012.04.008>.

Simkó, A.; Gáspár, G.S.; Kiss, L.; Makleit, P.; Veres, S.. Evaluation of nitrogen nutrition in diminishing water deficiency at different growth stages of maize by chlorophyll fluorescence parameters. *Plants*, v.9, 676. 2020. doi:10.3390/plants9060676

Song, Y., & Wang, J. Soybean canopy nitrogen monitoring and prediction using ground based multispectral remote sensors. 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). 2016. doi:10.1109/igarss.2016.7730670

Souza, B. P. de, Martinez, H. E. P., de Carvalho, F. P., Loureiro, M. E., & Sturião, W. P.. Gas exchanges and chlorophyll fluorescence of young coffee plants submitted to water and nitrogen stresses. *Journal of Plant Nutrition*, v.43, n.16, p.2455-2465. 2020. doi:10.1080/01904167.2020.1771589

Strasser, R.J.; Srivastava, A.; Tsimilli-Michael, M.. The fluorescence transient as a tool to characterize and screen photosynthetic samples. In: Yunus, M.; Pathre, U.; Mohanty, P. *Probing Photosynthesis: Mechanism, Regulation and Adaptation*. Taylor and Francis, cap.25, p.445-483., 2000.

Suárez, J.C.; Polanía, J.A.; Anzola, J.A.; Contreras, A.T.; Méndez, D.L.; Vanegas, J.I.; Noriega, J.E.; Rodríguez, L.; Urban, M.O.; Beebe, S.; Rao, I.M.. Influence of nitrogen supply on gas exchange, chlorophyll fluorescence and grain yield of breeding lines of common bean evaluated in the Amazon region of Colombia. *Acta Physiologiae Plantarum*, v.43, n.66, p.1-15. 2021. Doi: <https://doi.org/10.1007/s11738-021-03233-1>.

Taiz, L.; Zeiger, E.; Møller, I. M.; Murphy, A. *Fisiologia e desenvolvimento vegetal*. 6.ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 858p.

Tantray, A.Y.; Bashir, S.S.; Ahmad, A. Low nitrogen stress regulates chlorophyll fluorescence in coordination with photosynthesis and Rubisco efficiency of rice. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, v.26, p.83-94. 2020. <https://doi.org/10.1007/s12298-019-00721-0>

Tucker, C. Red and photographic infrared linear combination for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8: p.127-150, 1979. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0)

U.S. Department of Agriculture. Foreign Agricultural Service. Oilseeds: World Markets and Trade. Information based on 2020/21 crop year. April 2021. Disponível em: <<https://downloads.usda.library.cornell.edu/usda-esmis/files/tx31qh68h/2v23wp329/6t054b55w/oilseeds.pdf>>

Van Heerden, P. D. R., Tsimilli-Michael, M., Kruger, G. H. J., & Strasser, R. J. (2003). Dark chilling effects on soybean genotypes during vegetative development: parallel studies of CO₂ assimilation, chlorophyll a fluorescence kinetics O-J-I-P and nitrogen fixation. *Physiologia Plantarum*, 117(4), 476–491. doi:10.1034/j.1399-3054.2003.00056.x

Vincini, M.; Frazzi, E.; D' Alessio, P. A broad-band leaf chlorophyll vegetation index at the canopy scale. *Precision Agriculture*, v. 5, n. 9, p. 303-319, 2008. <https://doi.org/10.1007/s11119-008-9075-z>

Vollmann, J., Walter, H., Sato, T., & Schweiger, P. Digital image analysis and chlorophyll metering for phenotyping the effects of nodulation in soybean. *Computers and Electronics in Agriculture*, v.75(1), p.190–195. 2011. doi:10.1016/j.compag.2010.11.003

Werner, F.; Balbinot Junior, A.A.; Ferreira, A.S.; Silva, M.A. de A. e; Debiase, H.; Franchini, J.C.. Soybean growth affected by seeding rate and mineral nitrogen. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.20, n.8. 2016. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v20n8p734-738>

Wesley, T.L.; Lamond, R.E.; Mantin, V.L.; Duncan, S.R.. Effects of late-season nitrogen fertilizer on irrigated soybean yield and composition. *Journal of Production Agriculture*, v.11, n.3, p.331-336. 2013. Doi: <https://doi.org/10.2134/jpa1998.0331>.

Yokoyama, A.H.; Ribeiro, R.H.; Balbinot Junior, A.A.; Franchini, J.C.; Debiase, H.; Zucareli, C. Índices de área foliar e SPAD da soja em função de culturas de entressafra e nitrogênio e sua relação com a produtividade. *Revista de Ciências Agrárias*, v.41, p.953-962, 2018. DOI: <https://doi.org/10.19084/RCA18153>.

Zanandrea, I.; Nassi, F. L.; Turchetto, A. C.; Braga, E. J. B.; Peters, J. A.; Bacari, M. A.. Efeito da salinidade sob parâmetros de fluorescência em *Phaseolus vulgaris*. Revista Brasileira de Agrociência, v. 12, n. 2, p. 157-161, 2006. Doi: <https://doi.org/10.18539/CAST.V12I2.4512>

CAPÍTULO II:

EFEITOS DO *ASCOPHYLLUM NODOSUM* E CORREÇÃO DE SOLO NO DESENVOLVIMENTO DE PLÂNTULAS DE MILHO CULTIVADAS SOB TOXIDEZ DE ALUMÍNIO

RESUMO - O objetivo deste trabalho foi avaliar os efeitos de corretivos de solo e do extrato de *A. nodosum* no desenvolvimento inicial do sistema radicular uso e eficiência de nitrogênio do milho sob toxidez de alumínio. Os efeitos da aplicação de calcário e gesso em combinação com tratamento de sementes + aplicação foliar de *Ascophyllum nodosum* no crescimento de parte aérea e raiz, nutrição e fotossíntese de plântulas de milho com 14 dias foi testado em dois experimentos. O Experimento I foi conduzido em colunas de tubo pvc de 6,8 cm de diâmetro e 20 cm de profundidade, e o experimento II em rhizotrons de vidro de 60 cm de altura, 40 cm de largura e 3 cm de profundidade. Em geral, nos dois experimentos, as plantas do tratamento controle foram as que tiveram pior performance, tanto em crescimento de parte aérea e raiz, quanto em absorção de nutrientes e atividade fotossintética. Os tratamentos com o extrato de *A. nodosum* levou a um incremento na superfície de raiz nos tratamentos com calcário, e ao menor transporte de alumínio para a parte aérea das plantas. Os tratamentos com calcário e gesso foram eficientes em minimizar os efeitos deletérios da toxidez por alumínio, mesmo com sua aplicação a curto prazo em solo de textura média, proporcionando melhor atividade fotoquímica, melhor uso e eficiência de nutrientes, melhor enraizamento e, por consequência, maior peso seco de parte aérea e raiz.

Palavras-chave: gessagem; calagem; extrato de alga; crescimento de raiz; fluorescência da clorofila.

EFFECTS OF *ASCOPHYLLUM NODOSUM* AND SOIL CORRECTIONS ON THE DEVELOPMENT OF MAIZE SEEDLINGS CULTIVATED UNDER ALUMINUM TOXICITY

ABSTRACT - The aim of this work was to evaluate the effects of soil corrections and *A. nodosum* extract on the initial development of the root system and nitrogen use efficiency of maize under aluminum toxicity. The effects of lime and gypsum in combination with seed treatment + foliar application of *Ascophyllum nodosum* on shoot and root growth, plant nutrition and photosynthesis of 14-day-old maize seedlings were tested in two experiments. Experiment I was carried out on 6.8 cm diameter and 20 cm deep PVC tube columns, and experiment II on glass rhizotrons 60 cm high, 40 cm wide and 3 cm deep. Generally, on both experiments, the plants under the control treatment had the worst performance, both in shoot and root growth, as in nutrient absorption and photosynthetic activity. The treatments with *A. nodosum* extract led to an increase in the root surface in the treatments with lime, and to a smaller transport of aluminum to the plants shoot. The lime and gypsum treatments were efficient in minimizing the deleterious effects of aluminum toxicity, even with their short-term application in medium textured soil, providing better photochemical activity, better use efficiency of nutrients, better rooting and, consequently, higher dry weight of shoot and root.

Key words: gypsum; liming; seaweed extract; root growth; chlorophyll fluorescence.

4.7. INTRODUÇÃO

O uso de algas marinhas na agricultura, como fonte de matéria orgânica ou condicionante de solo é bastante antigo, porém seu efeito bioestimulante vem sendo estudado apenas nas últimas décadas (Du Jardin, 2015). Os principais efeitos de seu uso na agricultura são: aumento no crescimento de plantas, maior teor de clorofila, maior floração, germinação e produção, aumento de propagação *in vitro*, e aumento da resistência à patógenos, pragas e estresses abióticos. Além disso, também aumentam a absorção de nutrientes, pois afetam tanto processos no solo, como a estrutura de poros e solubilidade de micronutrientes, quanto a fisiologia das plantas, através de mudanças na morfologia da raiz e aumento da colonização radicular por fungos micorrízicos arbusculares (Halpern et al., 2015).

Dentre as algas pardas comumente aplicadas como bioestimulante, está o extrato da alga *Ascophyllum nodosum* (L.) Le Jolis, que é retirado de plantas marinhas frescas, colhidas nas águas do Atlântico Norte na costa do Canadá, sendo uma fonte natural de macro e micronutrientes como N, P, K, Ca, Mg, S, B, Fe, Mn, Cu e Zn, aminoácidos (alanina, ácido aspártico e glutâmico, glicina, isoleucina, leucina, lisina, metionina, fenilalanina, prolina, tirosina, triptofano e valina), citocininas, auxinas e ácido abscísico (Ugarte, et al., 2006; Vieira et al., 2010). Essas substâncias são eficientes quando aplicadas em pequenas concentrações e favorecem o alto desempenho dos processos vitais da planta, permitindo assim, a obtenção de elevada produção. Podendo ainda, em condições ambientais adversas, garantir o rendimento das mesmas (Vieira et al., 2010).

Alguns dos efeitos positivos inerentes à aplicação do extrato de *A. nodosum* em cultivos são: o aumento do sistema radicular, melhoria na germinação de sementes e estabelecimento das plântulas, na mobilização, absorção e distribuição de nutrientes, no enraizamento, crescimento, florescimento de plantas, aumento de produtividade, elevado conteúdo de clorofila foliar, entre outros, além de conferir tolerância a estresses bióticos e abióticos (Sharma et al., 2014).

Os efeitos do uso do extrato de *A. nodosum* nas culturas ainda são pouco estudados em solos ácidos, principalmente aqueles oriundos do Cerrado brasileiro, onde maior enraizamento, resistência à seca, melhor nutrição e maior produção são necessários para a boa condução de uma safra, principalmente em **culturas** como as do milho (*Zea mays* L.), que **desempenham** papel fundamental no sistema de produção brasileiro, uma vez que

o Brasil já alcança produção acima de 100 milhões de toneladas anuais (CONAB, 2020). Dada a importância econômica da cultura se faz necessário o estudo de novas técnicas de fertilização que promovam melhor enraizamento e maior produtividade, principalmente em solos de baixa fertilidade, juntamente com técnicas já consolidadas, como a calagem e a gessagem.

Sendo assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar os efeitos dos corretivos de solo e do extrato de *A. nodosum* no desenvolvimento inicial do sistema radicular, nutrição e fotossíntese de plântulas de milho em Latossolo ácido oriundo do Cerrado goiano.

4.8. METODOLOGIA

Os ensaios foram realizados concomitantemente em dois locais: um em câmara de crescimento climatizada em Sutton Bonington, Inglaterra, que será chamado de Experimento I, e outro em casa de vegetação em Rio Verde, Goiás, chamado aqui de Experimento II. Ambos experimentos utilizaram o mesmo solo, de textura média, com alta saturação por alumínio, oriundo de área de Cerrado em Goiás, foi classificado como LATOSSOLO VERMELHO distrófico (SiBCS, 2018), com 51% de saturação por alumínio (m) e textura média (Tabela 1). Esse nível de m no solo é considerado alto para a cultura do milho (Sobral & Guimarães, 1992).

TABELA 1 Caracterização química¹ e granulométrica do horizonte B do LATOSSOLO VERMELHO Distrófico (LVd), utilizado nos Experimentos I e II.

pH	MO g dm ⁻³	Ca	Mg	Al	H + Al	K	P	S-SO ₄ ²⁻	m ² %	Argila ³	Silte	Areia
			cmol _c dm ⁻³				mg dm ⁻³				g kg ⁻¹	
4,0	18,7	0,32	0,13	0,50	4,63	12,0	0,34	2,70	51	250	40	710

¹As metodologias de análise química do solo foram realizadas conforme metodologias descritas pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) (EMBRAPA, 2009). pH em CaCl₂ 1:2,5 relação solo:solução; P extração Mehlich I e determinação por colorimetria com desenvolvimento da cor azul pelo complexo fósforo molibdênio na presença de ácido ascórbico; K Mehlich 1 e determinação em fotometria de chama; Ca e Mg extração com KCl 1 mol L⁻¹ e determinação por espectrometria de absorção atômica (AAS); Al extração com KCl 1 mol L⁻¹ e determinação por titulometria com NaOH 0,025 mol L⁻¹. H+Al – extração em solução tampão de Acetato de Cálcio pH 7,0 e determinação por titulometria com NaOH 0,025 mol L⁻¹. Matéria Orgânica do Solo extração e determinação pelo método Walkley Black (Walkley & Black, 1934). S-SO₄²⁻ - extração com fosfato de cálcio 0,01 mol L⁻¹ e determinação por turbidimetria com 0,2g/10mL de extrato de BaCl₂.2H₂O adaptado de Tabatabai & Bremner (1970) e Hoef et al. (1973). ²Saturação de alumínio na CEC (m) estimado pela fórmula: m(%) = [Al(cmol_c dm⁻³)/(Ca+Mg+K+Al)(cmol_c dm⁻³)] x 100. ³Análise granulométrica realizada conforme metodologia descrita por Kilmer & Alexander (1949).

4.8.1. Experimento I

O Experimento I foi conduzido em colunas de tubo pvc de 6,8 cm de diâmetro e 20 cm de profundidade, em casa de vegetação climatizada da Escola de Biociências da Universidade de Nottingham, em Sutton Bonington, Inglaterra.

O delineamento experimental utilizado foi inteiramente ao acaso em fatorial 4 x 2 sendo, tratamentos de calcário (L) e gesso (G) isolados, um tratamento com os dois corretivos de solo juntos (LG) e o tratamento controle (C), sem aplicação de corretivos, cultivados sem e com tratamento de sementes + aplicação foliar de *Ascophyllum nodosum* “Shropshire seaweed”, do fabricante Sea-chem Limited, em quatro repetições. Nos tratamentos com corretivos de solo, o “calcário calcítico” utilizado foi o carbonato de cálcio (CaCO_3) analítico, calculado para elevar a saturação por bases (V%) para 70%, valor recomendável para solos de Cerrado de acordo com Caires (2016) e o “gesso” utilizado foi o sulfato de cálcio dihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) analítico, calculado utilizando método de Souza e Lobato (2004). Após a aplicação dos tratamentos com calagem e gessagem, foi aplicada água deionizada no volume correspondente a 60% dos espaços vazios, e mantidos diariamente por 15 dias para a reação dos corretivos.

A cultivar de milho Arcade, da Barenbrug UK, foi utilizada por exigir solo ideal para cultivo (BSPB/NIAB, 2019), sendo assim susceptível aos efeitos do alumínio. As sementes foram germinadas em papel germitest em placas petri, e, após 4 dias, foram selecionadas pela uniformidade e transferidas para as colunas preenchidas com o solo em densidade $1,2 \text{ g cm}^{-3}$, já misturado uniformemente com os tratamentos de gesso e calcário. Nos tratamentos com a aplicação do extrato de *A. nodosum*, foi feito tratamento de sementes com solução de 2 mililitros de extrato para 1 litro de água, de acordo com as recomendações do fornecedor, e cultivado no solo a 2 cm de profundidade. Cada coluna possuía apenas uma planta. Após a expansão completa da segunda folha, uma solução de *A. nodosum* a 5% de concentração foi aplicada via foliar em dose equivalente a 75 L ha^{-1} , conforme recomendado pelo fabricante. Para a manutenção da nutrição das plantas, ao longo do plantio foram aplicados 15 mL de solução de Hoagland nº 2, da fabricante Sigma, série H2395 a 25% de concentração.

Após o plantio das sementes, a câmara de crescimento permaneceu em temperatura de aproximadamente 25°C durante o dia, e 18°C durante a noite, com 14 horas de fotoperíodo. O experimento foi cultivado por 14 dias, e, após esse período, foram realizadas as avaliações de teor relativo de clorofila (Chl) com SPAD-502, fluorescência

da clorofila com Fluorpen FP-110, e atividade fotossintética das plantas com auxílio do aparelho LI-COR modelo LI-6400.

A fluorescência da clorofila foi determinada em folhas após 30 minutos de escuro, com consequente emissão de luz e medição dos parâmetros dentro da curva OJIP, ou curva de Kautsky, que são avaliadas diversas variáveis em quatro pontos diferentes da fluorescência induzida, separados em três fases por Yusuf et al. (2010), que as descreve em: fase O-J, que está relacionada com a redução da primeira quinona (QA) do lado acceptor de elétrons do fotossistema II (PSII); fase J-I, que envolve a redução dos transportadores de elétrons do intersistema, como a quinona secundária acceptora de elétrons (QB), o pool de plastoquinonas (PQ), o citocromo (Cyt) e a plastocianina (PC); e por último, a fase I-P, que reflete a redução os receptores finais de elétrons, no lado acceptor do fotossistema I (PSI), ou seja, ferredoxina (Fd), outros intermediários, e NADP.

As avaliações de fotossíntese foram realizadas com radiação fotossinteticamente ativa de $2000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e pressão parcial de CO_2 do ambiente de $39,6 \pm 0,7$ Pa. Em relação às trocas gasosas, foram consideradas a assimilação de CO_2 (A), a transpiração (E), a condutância estomática (gS), a eficiência do uso da água (WUE), e o déficit de pressão de vapor (VDP).

Ao final do período de cultivo, foram realizadas as análises de desenvolvimento e crescimento do sistema radicular das plantas, utilizando o sistema de tomógrafo computadorizado em raios X de alta resolução Phoenix V|TOME|X M 240 (GE Sensing and Inspection Technologies, Wunstorf, Alemanha), na Hounsfield Facility, na University of Nottingham, Reino Unido. Os parâmetros de escaneamento foram otimizados para a obtenção de alta resolução juntamente com amplo campo de visão. Cada amostra foi escaneada com voltagem e corrente de 170 kV e 230 μA , respectivamente, com resolução de voxel de 50 μm , e rotação de 360° dentro da câmara em um período de aproximadamente 1 hora e 15 minutos. O total de 1880 projeções foram obtidas pela média de 5 *frames* com exposição de 131 ms cada, a cada passo da rotação. Devido à altura do cilindro (20 cm), foram realizados 3 escaneamentos (sub scans) em sequência para cobrir a altura da amostra. Cada sub scan foi reconstruído utilizando o software DatosRec (GE Sensing and Inspection Technologies, Wunstorf, Alemanha), e combinado manualmente no software VG Studio MAX v2.2 (Volume Graphics GmbH, Heidelberg, Alemanha), e então exportado como um único *dataset* em volumetria 3D. Para diferenciar as fases do sistema radicular do solo, foram aplicadas técnicas de

processamento de imagem segmentando o *dataset* reconstruído do tomógrafo utilizando o método de “*region growing*” no VG Studio MAX v2.2. Através das imagens processadas, com o auxílio do software VG Studio MAX v2.2, foram determinadas a superfície de raiz (mm^2) e volume de raiz (mm^3).

Após o escaneamento no tomógrafo, foi medida a altura das plantas e número de folhas. As plantas foram coletadas, separadas em parte aérea e raízes, lavadas e secas em estufa de circulação forçada de ar, a $65\text{-}70^\circ\text{C}$, até peso constante. Após, o material foi pesado para determinação da massa seca de parte aérea e raiz e estimada a relação entre as partes. O material vegetal foi moído e parte dele destinado à análise de nitrogênio e carbono em planta e raiz no analisador elementar orgânico Flash 2000 (Thermo Scientific, EUA). O restante das amostras foi destinado à digestão com ácido nítrico em micro-ondas Multiwave 5000 (Anton Paar GmbH, Áustria) para posterior determinação de Ca, Mg, K, P, S e Al no ICP-MS iCAP Q (Thermo Scientific, EUA). Com base nos valores de massa seca de cada tecido e nos teores de cada nutriente foram calculados o acúmulo dos mesmos nos tecidos, e, o transporte de nutrientes para a parte aérea e partição do carbono em parte aérea e raiz.

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância e teste de média (t LSD) (5% de probabilidade) com o auxílio do programa SISVAR (Ferreira, 2014).

4.8.2. Experimento II

O Experimento II foi conduzido em casa de vegetação no campus Rio Verde do IFGoiano, em rhizotrons de vidro de 60 cm de altura, 40 cm de largura e 3 cm de profundidade. Os rhizotrons foram preenchidos com LATOSSOLO VERMELHO distrófico, correspondente ao Red Oxisol na Soil Taxonomy e ao Red Ferrasol (Ferralsole Rojo) na World Reference Base/Food and Agriculture Organization (WRB/FAO) (SiBCS, 2018) (Tabela 1) coletado em área de vegetação nativa do Cerrado goiano.

O delineamento experimental utilizado foi inteiramente ao acaso em fatorial 4×2 sendo, calcário (L) e gesso (G) isolados, os dois corretivos de solo juntos (LG) e o tratamento controle (C), sem aplicação de corretivos, cultivados sem e com tratamento de sementes + aplicação foliar de *Ascophyllum nodosum* em quatro repetições. Foram utilizados os reagentes analíticos óxido de cálcio (CaO) e sulfato de cálcio dihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) como fontes de calcário e gesso. A dose do calcário foi estimada para

e elevar a saturação por bases (V%) para 70%, valor recomendável para solos de Cerrado de acordo com Caires (2016) e de gessagem multiplicando o teor de argila (%) por 50 (Souza e Lobato, 2004).

Nos tratamentos com a aplicação do calcário, as doses foram adicionadas e incorporadas ao volume de solo que preencheu de 0 a 20 cm de profundidade nos rhizotrons. Em seguida, o gesso foi aplicado em superfície. A dose foi correspondente a correção de 20 cm de subsuperfície, ou seja, de 20 a 40 cm de profundidade. Após a aplicação dos tratamentos com calagem e gessagem foi aplicada água deionizada no volume correspondente a 60% dos espaços vazios, e mantidos diariamente por 15 dias para a reação dos corretivos.

Nas parcelas com tratamento de semente (An), 100 sementes de milho cv. P3754 PWU foram submetidas a tratamento de submersão em 100 mL de solução com 5% de extrato de *Ascophyllum nodosum*. No mesmo dia duas sementes por rhizotron foram semeadas a 10 cm da extremidade e espaçadas 20 cm entre si. Durante o desenvolvimento, os rhizotrons foram envolvidos em lona dupla face, mantendo somente a superfície exposta a luz. Os mesmos foram mantidos em inclinação de 30 graus, com o objetivo de as raízes crescerem em contato com um dos lados do rhizotron.

As avaliações do experimento foram realizadas quinze dias após a emergência das plantas. Na avaliação a superfície superior dos rhizotron foi fotografada, e a inclinação dos mesmos proporcionou o contato do sistema radicular com a superfície de vidro. As imagens foram processadas no programa QUANT 1.0.1 (Vale et al., 2001) para estimar a superfície de raiz (root Surface) em 2.400 cm² de superfície dos rhizotrons.

Foram medidas as profundidades das raízes (root depth), e em seguida, a parte aérea e raiz foram colhidas e lavadas em água corrente e destilada. Após a lavagem do material vegetal, o mesmo foi acondicionado em sacos de papel tipo kraft, previamente identificados, e secos em estufa de circulação forçada de ar a 65-70°C, até o peso constante. Posteriormente, as amostras foram pesadas e determinadas as massas secas de parte aérea (SDW) e raiz (RDW).

Após pesagem, as amostras foram moídas e encaminhadas para análise de nitrogênio através do método descrito por Malavolta (1997), através de digestão com ataque sulfúrico em bloco digestor, com evaporação da amônia das amostras utilizando solução de NaOH 400 g L⁻¹ com posterior condensação em destilador micro Kjeldhal, seguido de determinação por titulação com HCl 0,01 mol L⁻¹. Com base nos valores de

massa seca de cada tecido e nos teores de N, foi calculado o acúmulo do mesmo em parte aérea e raiz, bem como o seu transporte para a parte aérea.

Para avaliar a localização de alumínio nos ápices radiculares, amostras com aproximadamente (1cm) foram fixadas em FAA70% por 24 horas. Após o período, o material vegetal foi pré-lavado em tampão fosfato e desidratado em série etílica crescente (30% a 100%), pré-infiltrado e infiltrado em historesina (Leica, Alemanha), conforme as recomendações do fabricante. Posteriormente, as amostras foram seccionadas transversalmente a 5 µm de espessura em micrótomo rotativo (Modelo 1508R, Logen scientific, China) e os cortes corados com chrome azurol S, preparado a 0,5% (0,5 g de chrome azurol S e 5,0g de acetato de sódio, completando o volume para 100 mL com água destilada). As secções radiculares foram submetidas a essa solução por 60 minutos (Kukachka & Miller, 1980). Para análise de fluorescência de imagem foi utilizado o fluorocromo MORIN (Eticha et al., 2005). As imagens foram obtidas em microscópio Olympus (BX61, Tokyo, Japão) acoplado com câmera DP-72 utilizando opção de campo claro e fluorescência.

Os dados quantitativos obtidos foram submetidos à análise de variância e teste de média (t LSD) a 5% de probabilidade com o auxílio do programa SISVAR (Ferreira, 2014).

4.9. RESULTADOS

4.9.1. Experimento I

4.9.1.1. Crescimento

A altura das plantas e a massa seca da raiz e da parte aérea, variou somente em função dos tratamentos de correção de solo (Tabela 2). Com a aplicação isolada do calcário (L) e do gesso (G) obteve-se os maiores valores de massa seca de raiz (RDW) e parte aérea (SDW) e de altura das plantas (Height) (Figura 1A). A aplicação conjunta do calcário com o gesso (LG) obteve valores intermediários e os menores valores foram obtidos no tratamento controle (C) (Figura 1A).

TABELA 2 Resumo da ANOVA (Quadrado médio) das variáveis de crescimento: peso seco de parte aérea (SDW) (g plant⁻¹) e raiz (RDW) (g plant⁻¹), altura (Height) (cm), número de folhas (LQ), diâmetro da base do caule (mm), superfície de raiz (mm²) e volume de raiz (mm³).

Variables	Amendment (A)	<i>A.nodosum</i> (An)	A*An	Error	VC (%)	\bar{x}
SDW	0,0440*	0,0019 ^{ns}	0,0094 ^{ns}	0,0104	42,34	0,2403
RDW	0,0214*	0,0048 ^{ns}	0,0036 ^{ns}	0,0045	26,66	0,2522
Height	315,7809*	0,0331 ^{ns}	111,7659 ^{ns}	69,5500	22,59	36,9115
LQ	1,0312*	1,5312*	0,2812 ^{ns}	0,3437	16,31	3,5900
Diameter	1,0743 ^{ns}	0,0604 ^{ns}	0,4777 ^{ns}	0,5384	18,49	3,9690
Root Surface	8,3x10 ⁷ *	5,6x10 ⁶ ^{ns}	4,5x10 ⁷ ^{ns}	2,9x10 ⁷	28,93	1,8x10 ⁴
Root Volume	2,3x10 ⁵ ^{ns}	1,4x10 ⁵ ^{ns}	3,5x10 ⁵ ^{ns}	3,4x10 ⁵	27,38	2,1x10 ³

*, ** e ^{ns} Significativo a 1 e 5% e não significativo pelo teste de F.

O número de folhas por planta (Leaf Quantity) (LQ) alterou em função da correção do solo e da aplicação de *A. nodosum* (Tabela 2), e semelhantemente as demais variáveis biométricas, as plantas que receberam a aplicação isolada de L e G obtiveram os maiores valores, seguido da aplicação conjunta de LG, e os menores valores obtidos pelo tratamento sem correção (C) (Figura 1B). Observa-se também que, na presença de *A. nodosum*, as plantas apresentaram incremento no número de folhas (Figura 1B).

O diâmetro do colmo das plantas não variou em função dos tratamentos, e média geral foi de 3,96 mm (Tabela 2).

A superfície de raiz (RS) variou em função dos tratamentos de correção do solo (Tabela 2), e a aplicação de gesso (G) e calcário (L) isolados obtiveram os maiores valores, seguidos da aplicação conjunta do calcário mais gesso (LG) e do controle (C) (Figura 1C).

B

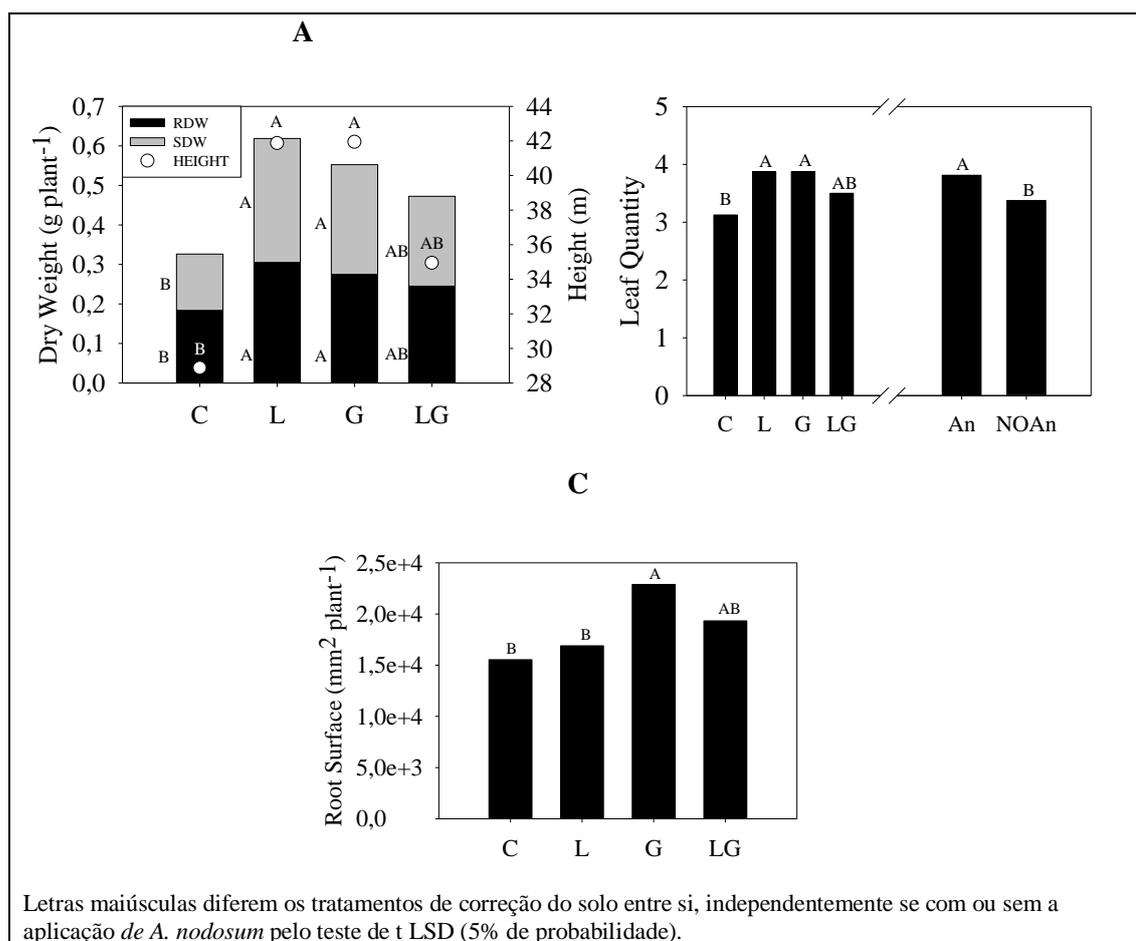


FIGURA 1 Crescimento inicial do milho cv. ARCADE®: peso seco de parte aérea (SDW) e raiz (RDW) (g planta⁻¹) (A), altura de plantas (Height) (cm) (B) e superfície de raiz (mm²) (C), em função dos tratamentos de correção do solo e com aplicação de *A. nodosum*. Nottingham, 2019.

Através das imagens de raiz obtidas com tomografia computadorizada 3D, observa-se que nos tratamentos com a correção do solo há aumento do crescimento do sistema radicular, e que, na aplicação isolada do calcário e do gesso, o crescimento é maior quando comparada à aplicação conjunta dos dois corretivos (Figura 2) (ANEXO 1). Já sobre a aplicação do extrato de *A. nodosum*, observa-se maior número de raízes secundárias quando associado à G e LG, e no controle sem corretivos de solo (Figuras 2 B, F e H). Todavia, a aplicação do extrato de *A. nodosum* associado somente à calagem apresenta efeito inverso, ou seja, quando aplicado junto ao calcário há visivelmente redução das raízes secundárias do milho.

Esse resultado pode ser um indicativo que as alterações fenotípicas morfofisiológicas provocadas pela aplicação do extrato de *A. nodosum* podem estar associadas à presença da acidez no solo. Ou seja, quando houve ausência da acidez do solo, nos tratamentos com a aplicação isolada do calcário, não foi observado efeito do extrato do *A. nodosum* sobre o crescimento de raízes secundárias do milho, observados

nos tratamentos controle (C), com gesso isolado (G) e gesso mais calcário (LG) (Figura 2).

Apesar da variação na superfície de raiz (Figura 1C) de acordo com os tratamentos, o volume de raiz não foi alterado com os tratamentos (Tabela 2), com valor médio de $2,1 \times 10^3 \text{ mm}^3$.

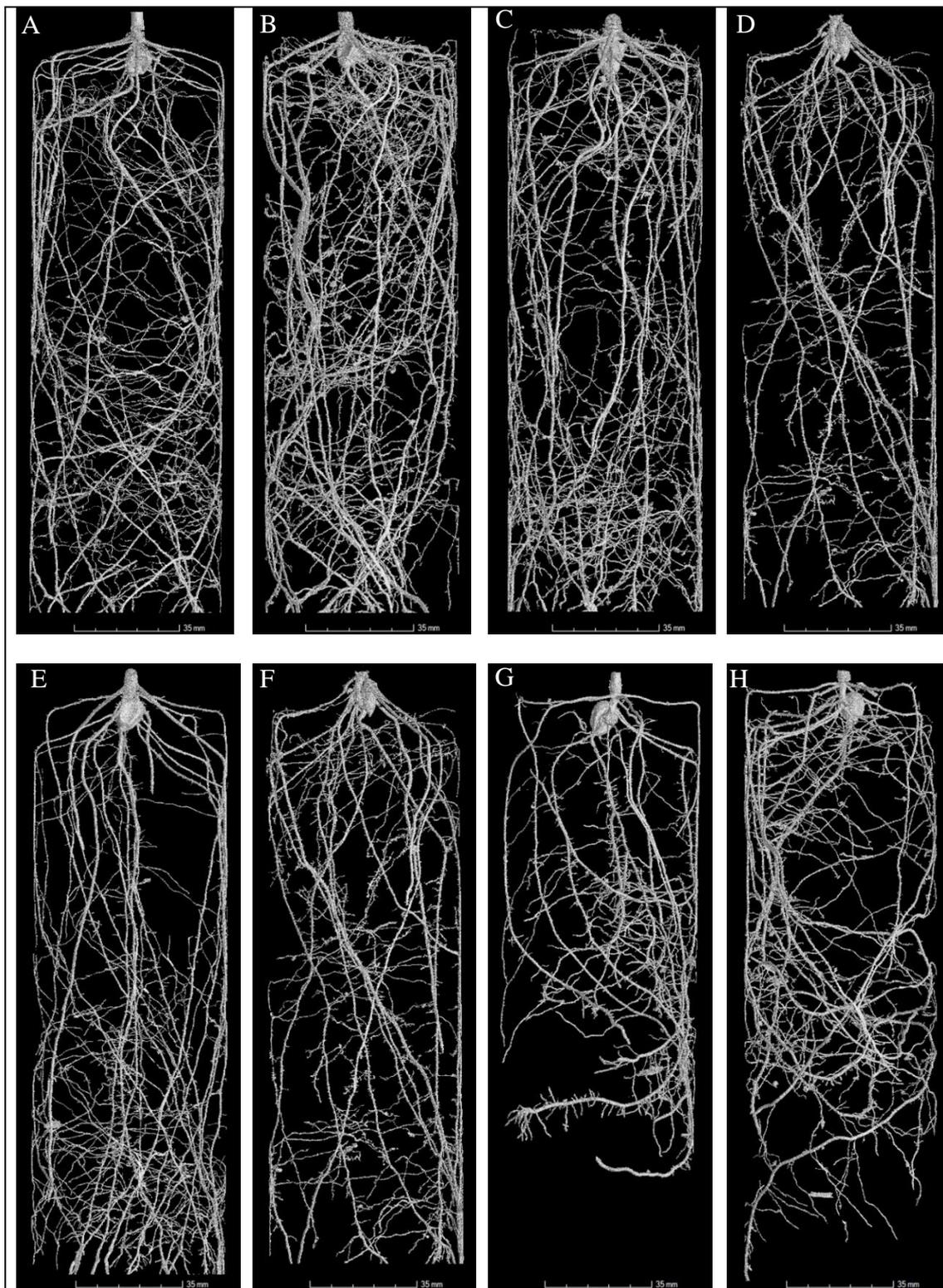


FIGURA 2 Imagens de raiz de plantas de milho aos 14 dias após a germinação (estádio V2) obtidas por tomografia computadorizada de Raio X 3D. A – Gypsum; B – Gypsum e *A. nodosum*; C – Liming; D – Liming e e *A. nodosum*; E – Liming and Gypsum; F – Liming and Gypsum and *A. nodosum*; G – Control; H - *A. nodosum*. Nottingham, 2019.

5.3.1.2. Nutrição

A nutrição das plantas de milho aos 14 dias após germinação variou com os tratamentos. O acúmulo do C, K, Ca e S na parte aérea das plantas variaram em função dos corretivos e o acúmulo do Mg e Al na parte aérea variaram em função da aplicação do extrato da alga *A. nodosum* (Tabela 3). Não houve alteração no acúmulo do N na parte aérea das plantas em função dos tratamentos. Na raiz o acúmulo do C, K, Ca, Mg, S e Al em função dos corretivos e N e P em função da aplicação do *A. nodosum* (Tabela 3).

TABELA 3 Resumo da ANOVA (Quadrado médio) das variáveis nutricionais: Acúmulo de N, C, Mg, P, S, Ca, K e Al (mg plant⁻¹) na parte aérea e raízes de mudas de milho com 14 dias (estádio V2) sob os tratamentos de correção (Amendment), e suas interações com a aplicação de extrato de *Ascophyllum nodosum* (An).

Variables	Parte da planta	Amendment (A)	<i>A.nodosum</i> (An)	A*An	Error	VC(%)	\bar{x}
C	SHOOT	8,2x10 ^{3**}	1,5x10 ^{3ns}	5,8x10 ^{2ns}	1,5x10 ³	37,25	102,6571
	ROOT	2,2x10 ^{3*}	7,4x10 ^{2ns}	3,9x10 ^{2ns}	6,2x10 ²	28,55	87,4200
N	SHOOT	10,006 ^{4ns}	8,072 ^{3ns}	1,829 ^{1ns}	4,2179	30,60	6,7100
	ROOT	1,6400 ^{ns}	7,5415 [*]	1,4527 ^{ns}	1,2780	26,53	4,2606
P	SHOOT	3,97x10 ^{-2ns}	6,48x10 ^{-2ns}	3,89x10 ^{-2ns}	2,33x10 ⁻²	40,86	0,3733
	ROOT	1,3x10 ^{-3ns}	24,3x10 ^{-3*}	2,13x10 ^{-3ns}	4,41x10 ⁻³	26,66	0,2491
K	SHOOT	24,1015 ^{**}	8,79x10 ^{-2ns}	2,8073 ^{ns}	4,8854	33,68	6,5624
	ROOT	6,3901 ^{**}	0,3013 ^{ns}	1,1272 ^{ns}	1,1807	29,54	3,6789
Ca	SHOOT	15,716 ^{**}	0,1646 ^{ns}	0,5571 ^{ns}	1,8195	43,53	3,0987
	ROOT	16,0125 ^{**}	0,7024 ^{ns}	0,9919 ^{ns}	0,5124	27,48	2,6045
Mg	SHOOT	0,1082 ^{ns}	0,2048 [*]	0,664 ^{ns}	4,48x10 ⁻²	37,35	0,5668
	ROOT	6,37x10 ^{-2*}	4,41 x10 ^{-2ns}	1,49 x10 ^{-2ns}	1,54 x10 ⁻²	37,96	0,3272
S	SHOOT	0,4821 ^{**}	2,16x10 ^{-2ns}	4,38x10 ^{-2ns}	6,23x10 ⁻²	45,32	0,5510
	ROOT	5,25 ^{**}	8,43x10 ^{-2ns}	2,84x10 ^{-2ns}	9,97x10 ⁻²	28,53	1,1068
Al	SHOOT	3,26x10 ^{-4ns}	3,528x10 ^{-3*}	1,83x10 ^{-4ns}	3,59x10 ⁻⁴	86,86	0,0218
	ROOT	17,3690 ^{**}	3,78 x10 ^{-4ns}	2,046 ^{ns}	2,3097	37,21	4,0840

*, ** e ns Significativo a 1 e 5% e não significativo pelo teste de F.

O maior acúmulo do C na parte aérea e nas raízes ocorreu com a aplicação dos corretivos (Figura 3A). O acúmulo de N na parte aérea das plantas não variou com tratamentos e a média geral foi de 6,71 mg planta⁻¹ (Tabela 3). Todavia, na parte aérea o maior acúmulo do N foi obtido nas plantas sem a aplicação do *A. nodosum* (Figura 3 B). A aplicação do *A. nodosum* não alterou a produção de biomassa das plantas (Tabela 2), todavia houve alteração no acúmulo do N. Assim, o menor acúmulo de N com a aplicação do *A. nodosum* para a produção da mesma biomassa que as plantas sem a aplicação da alga (Tabela 2), significa que houve aumento da eficiência do uso N aplicado, ou seja, houve a produção da mesma biomassa, em relação as plantas não tratadas com o extrato da alga, mas com menor quantidade de N acumulado.

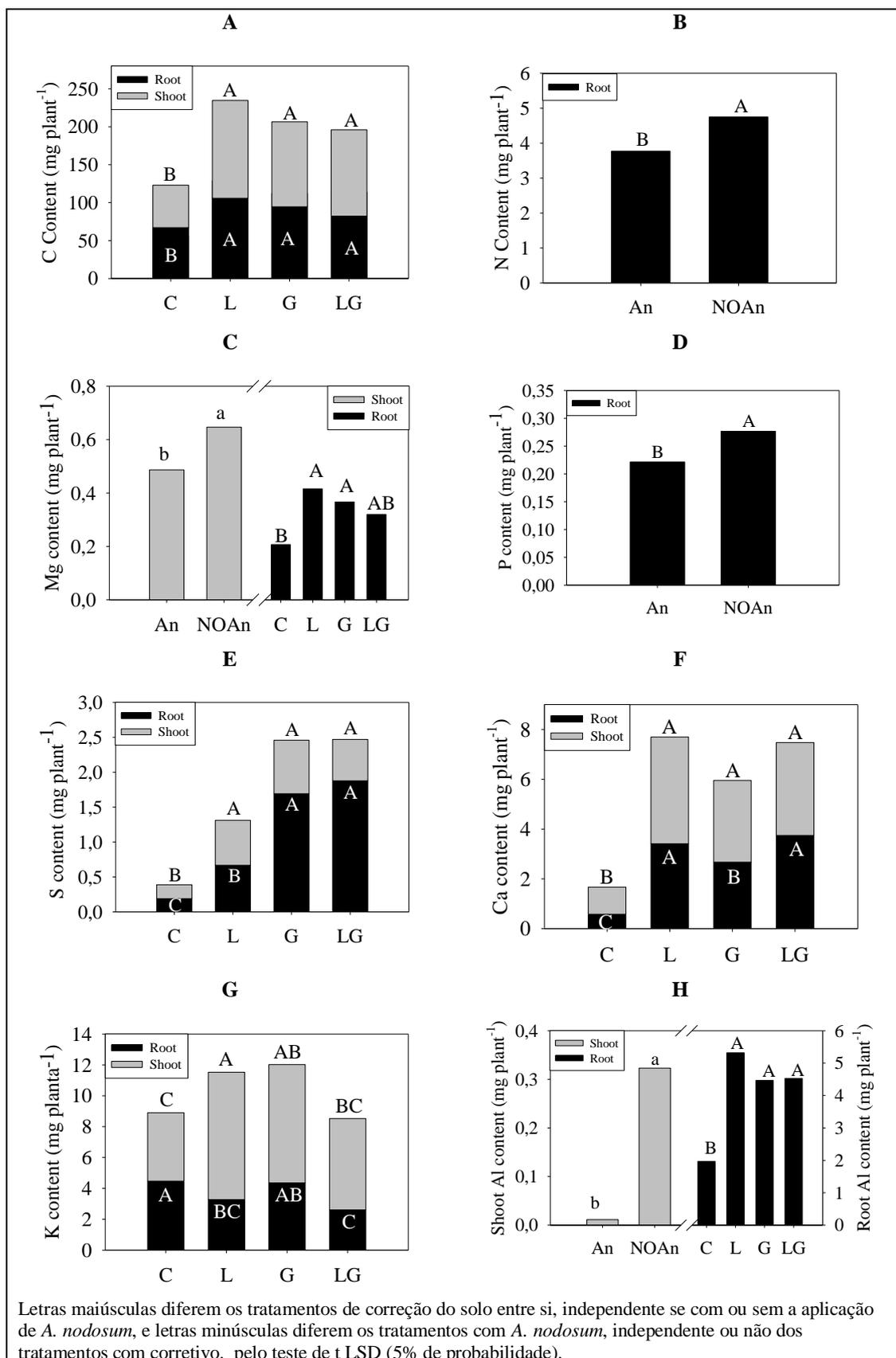


FIGURA 3 Acúmulo de macronutrientes na parte aérea e raiz das plantas em função dos tratamentos de correção do solo e com aplicação de *A. nodosum*. Nottingham, 2019.

Semelhante ao N, o menor acúmulo do Mg na parte aérea foi obtido nas plantas tratadas com *A. nodosum* (Figura 3 C). Indicando, assim, que também houve aumento da eficiência de uso do Mg. Já, nas raízes, os maiores acúmulos do Mg foram obtidos com a correção do solo (Figura 3 C).

O acúmulo do P na parte aérea não foi alterado com a correção do solo e aplicação do *A. nodosum*, com média de $0,37 \text{ mg planta}^{-1}$ (Tabela 3). Já o acúmulo do P nas raízes, semelhantemente ao N (Figura 3B) e Mg (Figura 3C), foi menor com a aplicação do *A. nodosum* (Figura 3D).

O maior acúmulo do S na parte aérea e na raiz foram obtidos nas plantas dos tratamentos com a aplicação do G, reflexo da presença do ânion sulfato (SO_4^{2-}) na constituição desse corretivo (Figura 3E).

Semelhante ao S, o maior acúmulo do Ca na parte aérea e na raiz foram obtidos nos tratamentos com a aplicação do L e G (Figura 3F). Elemento esse que é constituinte do L e do G. O K foi mais acumulado na parte aérea com a aplicação do L e G, seguido do LG e C (Figura 3G). Já na raiz, o maior acúmulo foi obtido sem a aplicação dos corretivos (C).

As plantas que receberam a aplicação do extrato do *A. nodosum* acumularam menos Al em suas folhas (Figura 3H). Já a resposta de acúmulo na raiz variou de acordo com os tratamentos de correção do solo (Tabela 3), sendo maior nas plantas sob influência de corretivos (Figura 3H).

A partição de C na planta variou com os tratamentos de correção do solo (Tabela 4), e o tratamento controle obteve maior partição do C para o sistema radicular (Figura 4 A), uma vez que esse mesmo tratamento obteve o menor peso seco de parte aérea (SDW) (Figura 1A) entre os demais, efeito característico de estresse de Al sobre algumas plantas (Silva et al. 2010).

O transporte do N, K, Ca e S para a parte aérea alteraram em função dos tratamentos com os corretivos do solo e do Al somente em função do tratamento com o *A. nodosum* (Tabela 4). O transporte do P e do Mg mantiveram se inalterado com os tratamentos, com médias de 58 e 62,4%, respectivamente (Tabela 4).

Houve maior transporte do N e K para a parte aérea nos tratamentos com correção do solo (Figura 4 B e C, respectivamente). Nos tratamentos com a aplicação do G foram obtidos os maiores teores de SO_4^{2-} nas raízes das plantas (Figura 3 E) e com a aplicação do G e, ou, L, obtiveram os maiores teores de Ca nas raízes (Figura 3 F), resultado das

altas quantidades de SO_4^{2-} e Ca fornecidos nos tratamentos com G e L. Assim, o maior acúmulo percentual de SO_4^{2-} e Ca foram nas raízes, resultando em baixos valores percentuais de transporte desses nutrientes para a parte aérea (Figuras 4 B e C, respectivamente).

TABELA 4 Resumo da ANOVA (Quadrado médio) das variáveis de partição de C para parte aérea e raiz, e transporte do C, N, P, K, Ca, Mg, S e Al (mg plant^{-1}).

Variables	Amendment (A)	<i>A. nodosum</i> (An)	A*An	Error	VC(%)	\bar{x}
C Shoot	231,7391**	3,3593 ^{ns}	34,7704 ^{ns}	32,9393	10,86	52,8252
C Root	231,7391**	3,3593 ^{ns}	34,7704 ^{ns}	32,9393	12,17	47,1748
N	236,3583**	22,1637 ^{ns}	61,7061 ^{ns}	35,2836	9,80	60,6410
P	253,6774 ^{ns}	9,9348 ^{ns}	391,3083 ^{ns}	143,2282	20,66	57,9345
K	640,7906*	183,6823 ^{ns}	180,6035 ^{ns}	180,7683	21,66	62,0600
Ca	376,0949**	171,2935 ^{ns}	246,5796 ^{ns}	105,8789	18,67	55,1145
Mg	262,5400 ^{ns}	0,4943 ^{ns}	281,3996 ^{ns}	151,9849	19,74	62,4415
S	1558,0103**	123,2050 ^{ns}	43,8347 ^{ns}	63,1997	20,84	38,1414
Al	0,1180 ^{ns}	2,1004**	0,0294 ^{ns}	0,1478	69,17	0,5558

*, ** e ^{ns} Significativo a 1 e 5% e não significativo pelo teste de F.

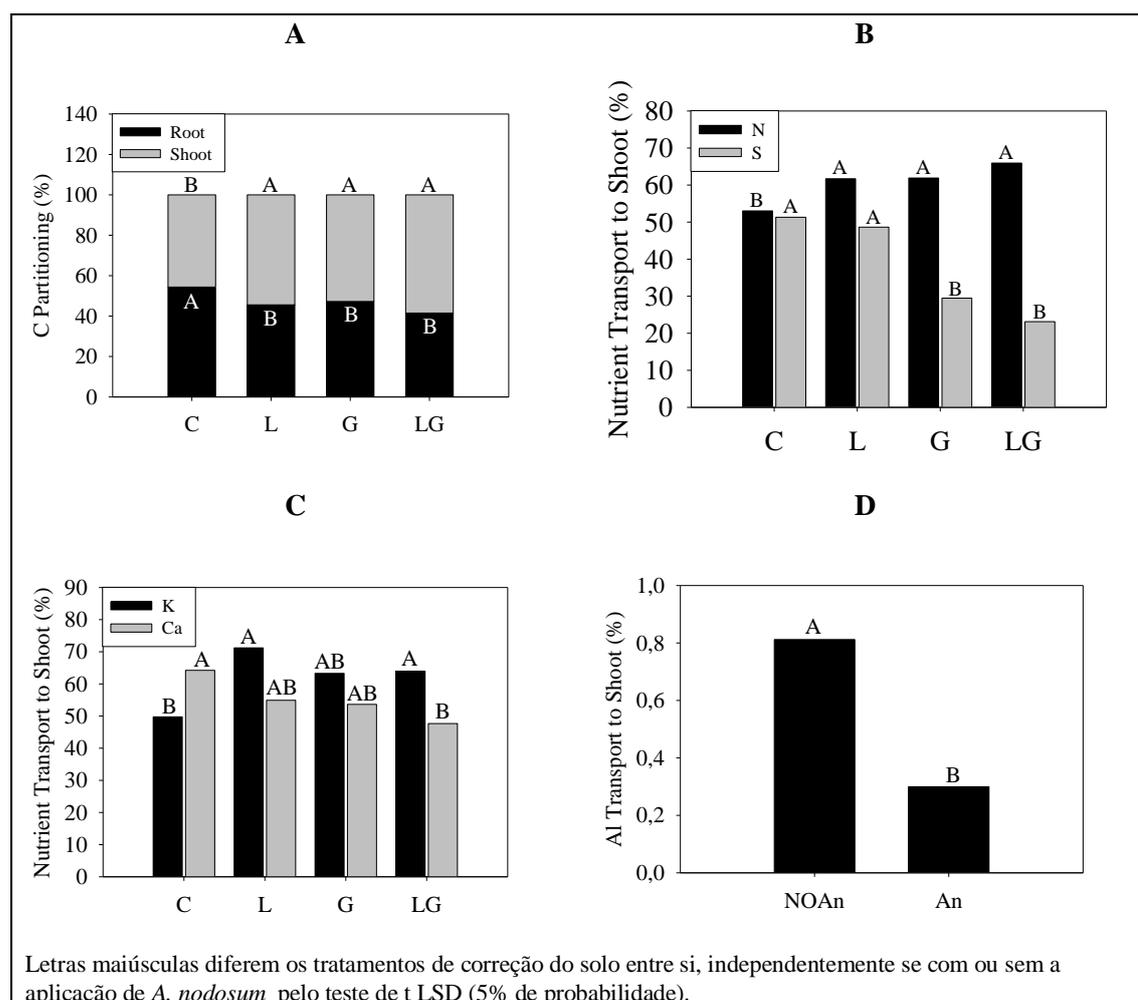


FIGURA 4 Partição de C (A) e transporte (%) de N e S (B), K e Ca (C) e Al (D) em função dos tratamentos de correção do solo e com aplicação de *A. nodosum*. Nottingham, 2019.

O Al foi menos transportado para a parte aérea nas plantas com tratamento do *A. nodosum* (Figura 4 D). Esses resultados, de menor transporte para a parte aérea e maior acúmulo nas raízes com a aplicação dos corretivos (Figura 3H) demonstram a possibilidade de algum mecanismo fisiológico ter sido ativado com a aplicação do *A. nodosum* reduzindo o transporte de Al para a parte aérea das plantas. Já o maior acúmulo nas raízes com a aplicação do G e, ou L, pode ser pela precipitação nos espaços intercelulares do Al em diversas espécies iônicas de hidróxido $[Al(OH)_n^{n+/-}]$ e, ou, hidroxissulfato de alumínio ($AlSO_4OH$).

5.3.1.3. Fotossíntese

Quanto ao teor relativo de clorofila (Relative Chl), houve variação com a aplicação dos corretivos de solo (Tabela 5), e, as plantas sem correção obtiveram os menores índices de clorofila entre as demais (Figura 5A). A fluorescência variável (V), variou de acordo com os tratamentos de solo (Tabela 5). A V_j foi superior nos tratamentos C e L, e V_i nos tratamentos C e LG (Figura 5B). Essa variação é um reflexo de estresse no fotossistema das plantas com maior fluorescência, notado principalmente no tratamento controle.

A M_o , S_s , Ψ_o e Φ_{E_o} também variaram de acordo com os tratamentos de solo (Tabela 5). M_o reflete a taxa de fechamento dos centros de reação do PSII, e quanto menor o seu valor, melhor a estrutura do fotossistema, ou seja, é um índice indireto que reflete a organização estrutural do cloroplasto (Strasser et al., 2000). Assim, semelhante aos dados de fluorescência variável (Figura 5B), o tratamento controle é o que demonstra maior desestruturação do PSII (Figura 5C).

O índice S_s avalia a quantidade de energia necessária para a promoção do simples *turn over* da Quinona *a*, e ao requerer maior energia luminosa para o início da atividade fotossintética, a planta se protege da fotoxidação dos cloroplastos. Os valores de S_s foram maiores em todas as plantas cultivadas em solos corrigidos, indicando, novamente, possível desestruturação do aparato fotossintético das plantas controle (Figura 5C).

TABELA 5 Resumo da ANOVA (Quadrado Médio) das variáveis de teor relativo de clorofila (Relative Chl) determinado por SPAD, índices de fluorescência determinado por Fluorpen FP110 e índices de fotossíntese determinado através de leitura com LiCor (LI 6400-XT).

Variables	Amendment (A)	<i>A.nodosun</i> (An)	A*An	Error	VC(%)	\bar{x}
Chl	628,11**	25,8481 ^{ns}	74,4527 ^{ns}	69,6366	28,28	29,5056
Fo	231.679,84 ^{ns}	358281,1250 ^{ns}	63345,5841 ^{ns}	312833,6806	12,01	4658,75
Fj	6.299.215,53 ^{ns}	3262096,53 ^{ns}	1066908,28 ^{ns}	2701384,89	13,30	12360,343
Fi	663.022,97 ^{ns}	2363138,00 ^{ns}	1052212,80 ^{ns}	4753714,91	13,36	16322,875
Fm	1.290.577,71 ^{ns}	2632365,25 ^{ns}	2106917,71 ^{ns}	7092612,23	13,79	19319,188
Fv	896.253,25 ^{ns}	1048352,00 ^{ns}	1509186,88 ^{ns}	4794318,35	14,94	14660,438
Vj	1,93x10 ^{-2**}	1,14x10 ^{-3ns}	2,19x10 ^{-3ns}	2,69x10 ⁻³	9,84	0,5272
Vi	1,09x10 ^{-3*}	4,80x10 ^{-5ns}	5,91x10 ^{-4ns}	3,54x10 ⁻⁴	2,36	0,7964
Fm/Fo	0,1018 ^{ns}	0,0158 ^{ns}	0,0143 ^{ns}	0,0692	6,34	4.1518
Fv/Fo	0,1018 ^{ns}	0,0158 ^{ns}	0,0143 ^{ns}	0,0692	8,35	3,1518
Fv/Fm	3,36x10 ^{-4ns}	5,5x10 ^{-5ns}	6,1x10 ^{-5ns}	2,31x10 ⁻⁴	2,00	0,7579
Mo	0,1996**	3,04x10 ^{-2ns}	7,8x10 ^{-3ns}	1,29x10 ⁻²	12,02	0,9435
AREA	2,0835x10 ^{13ns}	3,3498x10 ^{10ns}	9,1483x10 ^{11ns}	3,1054x10 ¹³	85,76	6,4980x10 ⁶
FIX AREA	1,2244x10 ^{12ns}	2,4925x10 ^{12ns}	2,1227x10 ^{12ns}	6,8285x10 ¹²	13,76	1,8994x10 ⁸
Sm	130294,6754 ^{ns}	322,5292 ^{ns}	665,1949 ^{ns}	180566,6279	93,92	452,4166
Ss	1,5226x10 ^{-2**}	5,512x10 ^{-3ns}	5,94x10 ^{-4ns}	1,899x10 ⁻³	7,69	0,5669
N	682103,8991 ^{ns}	2787,2818 ^{ns}	8729,6392 ^{ns}	684837,9255	101,15	818,1586
Φ_{Po}	3,36x10 ^{-4ns}	5,5x10 ^{-5ns}	6,1x10 ^{-5ns}	2,31x10 ^{-4ns}	2,00	0,7579
Ψ_o	1,9406x10 ^{-2**}	1,116x10 ^{-3ns}	2,212x10 ^{-3ns}	2,69x10 ⁻³	10,97	0,4729
Φ_{Eo}	1,2899x10 ^{-2**}	8,61x10 ^{-4ns}	1,352x10 ^{-3ns}	1,897x10 ⁻³	12,13	0.3590625
Φ_{Do}	3,31x10 ^{-4ns}	6,1x10 ^{-5ns}	6,5x10 ^{-5ns}	2,31 x10 ⁻⁴	6,27	0,2421
Φ_{Pav}	244,4028 ^{ns}	6,4333 ^{ns}	43,8778 ^{ns}	239,1458	1,63	950,5152
Π_{ABS}	1,0920**	0,1308 ^{ns}	0,1299 ^{ns}	0,1175	26,58	1,2900
ABS/RC	0,3221**	9,1592x10 ^{-2ns}	6,219x10 ^{-3ns}	2,9802x10 ⁻²	7,34	2,3524
TRo/RC	0,1545**	4,3808x10 ^{-2ns}	3,242x10 ^{-3ns}	1,5593x10 ⁻²	7,01	1,7816
ETo/RC	1,6759x10 ^{-2ns}	1,164x10 ^{-3ns}	8,135x10 ^{-3ns}	1,3256x10 ⁻²	13,74	0,8382
Dio/RC	3,1311x10 ^{-2**}	8,878x10 ^{-3ns}	1,090x10 ^{-3ns}	3,966x10 ⁻³	11,03	0,5709
A	42,0109**	0,037592 ^{ns}	4,4259 ^{ns}	8,1955	27,70	10,3332
gS	1,69x10 ^{-4**}	1,7x10 ^{-5ns}	0,9x10 ^{-5ns}	4,7x10 ⁻⁵	33,94	0,0203
E	8,6342x10 ^{-8**}	5,3232x10 ^{-9ns}	3,9447x10 ^{-9ns}	2,1191x10 ⁻⁸	34,19	0,0004
DPV	4,213x10 ^{-3*}	2,02x10 ^{-4ns}	2,499 x10 ^{-3ns}	1,102x10 ⁻³	1,97	1,6889
WUE	0,6190 ^{ns}	0,1416 ^{ns}	4,8187x10 ^{-2ns}	0,2262	18,78	2,5322

*, ** e ns Significativo a 1 e 5% e não significativo pelo teste de F.

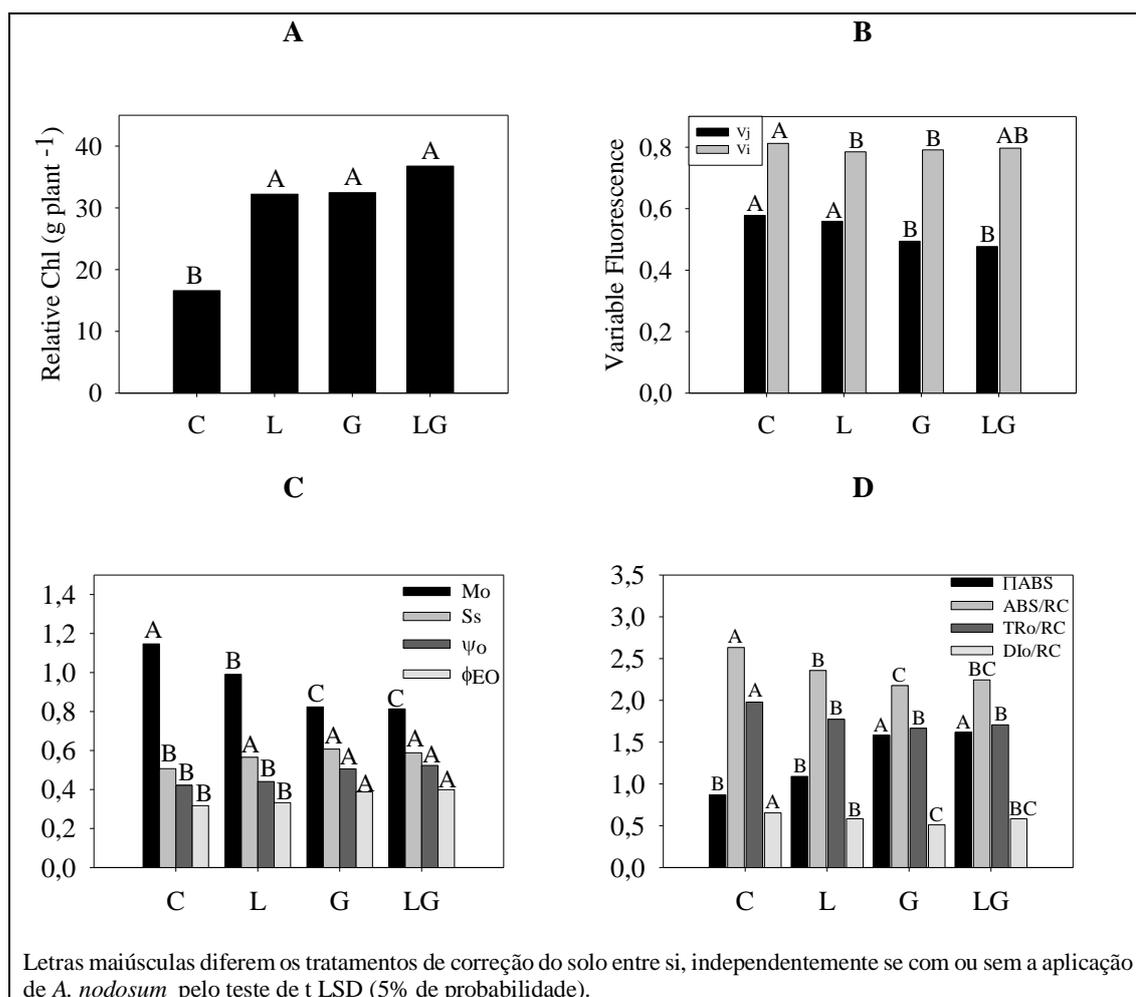


FIGURA 5 Índice SPAD de clorofila (Relative Chl) determinado por SPAD, índices de fluorescência variável (V_i e V_j), taxa líquida do fechamento dos centros de reação do PSII (M_o), quantidade de energia necessária para simples *turn over* (S_s), probabilidade da energia de excitação mover um elétron após a Quinona a (Ψ_o), probabilidade da energia de um fóton absorvido mover um elétron após a Quinona a (Φ_{E_o}), índice de desempenho (π_{ABS}), fluxo de absorção (ABS/RC), captura (TRo/RC) e transporte de elétrons (Dio/RC) determinados pelo Fluorpen FP110 em função dos tratamentos de correção do solo. Nottingham, 2019.

A eficiência fotoquímica (Ψ_o) é a probabilidade de a energia de excitação mover um elétron após a Quinona a , e está intrinsecamente ligado à capacidade da planta de manter o processo fotossintético ativo. O Φ_{E_o} está diretamente ligada à Ψ_o , referindo à probabilidade da energia de um fóton absorvido mover um elétron após a Quinona a , portanto, quanto maior o valor da Φ_{E_o} , maior probabilidade da cadeia de elétrons se manter ativa, fornecendo energia ao processo fotossintético. Os menores valores de Ψ_o e Φ_{E_o} , foram obtidos nas plantas do tratamento C, seguidas da correção com L (Figura 5C), significando que, principalmente as plantas controle tinham maior probabilidade de interrupção da atividade fotossintética.

Os índices π_{ABS} , ABS/RC, TRo/RC e Dio/RC foram influenciados pelos corretivos de solo (Tabela 5) e refletem o desempenho geral do fotossistema II. Esses

índices refletiram novamente uma possível desestruturação dos cloroplastos das plantas controle, que apresentaram menor índice de desempenho (π_{ABS}), pois o maior fluxo de absorção (ABS/RC), captura (TRo/RC) e transporte de elétrons (Dio/RC), não resultou em aumento da eficiência fotoquímica (Ψ_o), e sim em perda de energia na forma de fluorescência (Figura 4D), demonstrando baixo aproveitamento dos elétrons gerados no processo de fotólise da água, no início da cadeia de transporte de elétrons.

A taxa fotossintética (A), condutância estomática (gS), transpiração (E) e déficit de vapor de água (VPD), também, só variaram em função dos tratamentos de correção do solo (Tabela 5). Os menores valores da A, gS, E e VPD foram obtidos nas plantas sem corretivo, ou seja, nas plantas sob estresse abiótico por acidez e toxidez de alumínio (Figuras 6A, B, C e D). Esses resultados são consequência dos piores índices de fluorescência (Figura 5B, C e D) e refletem a baixa partição de carbono na parte aérea das plantas controle (Figura 4A).

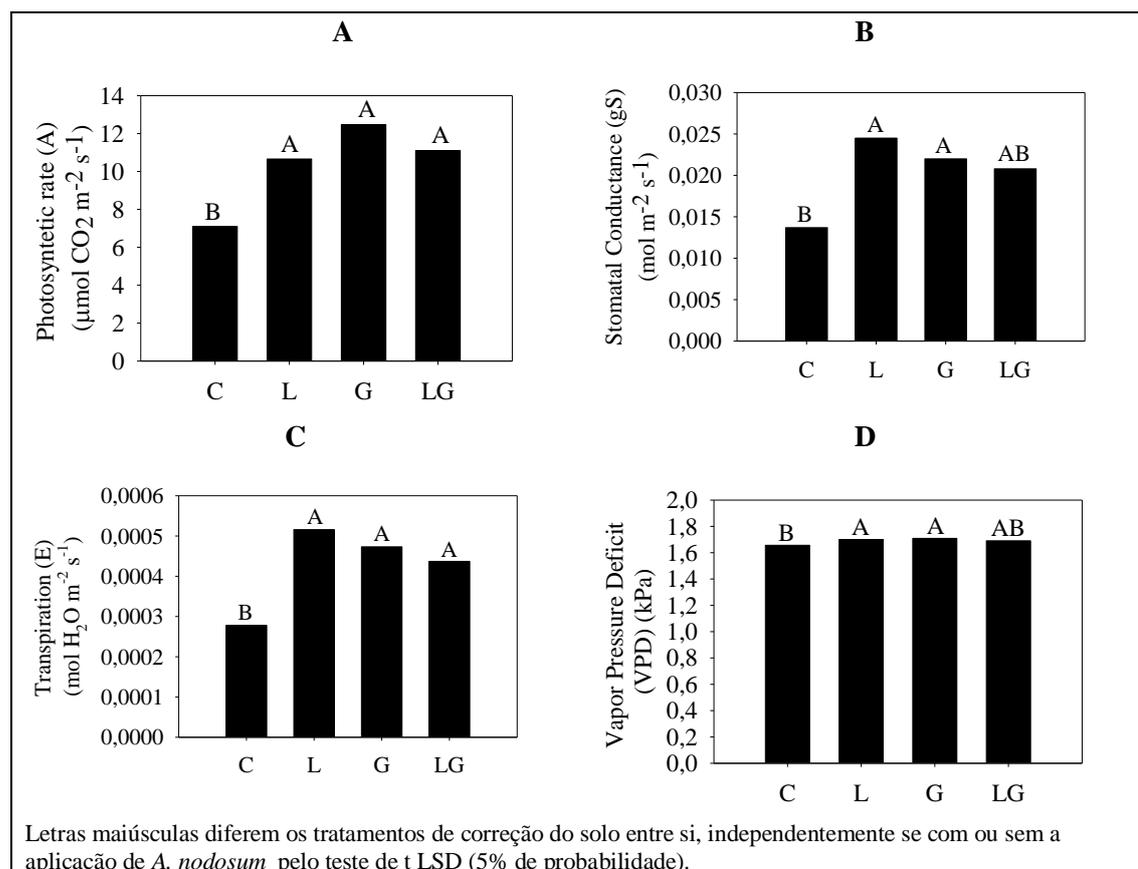


FIGURA 6 Fotossíntese Líquida (A), condutância estomática (gS), transpiração (E) e déficit de pressão de vapor (VPD), determinados por LiCor LI 6400-XT, em função dos tratamentos de correção do solo. Nottingham, 2019.

5.3.2. Experimento II

No ensaio realizado em rhizotron, as variáveis peso seco de parte aérea (SDW) e raiz (RDW), superfície de raiz (Root Surface), acúmulo de N em parte aérea (NCS) e transporte de N (NT) foram significativos (Tabela 6). A profundidade de raiz (Root Depth) e acúmulo de N em raiz (NCR) não alteraram com os tratamentos, e suas médias foram 35,85 cm e 33,69 mg planta⁻¹, respectivamente (Tabela 6).

TABELA 6 Resumo da ANOVA (Quadrado médio) das variáveis de crescimento: peso seco de parte aérea (SDW) (g plant⁻¹) e raiz (RDW) (g plant⁻¹), superfície de raiz (Root Surface) (cm²), profundidade de raiz (Root Depth) (cm) e das variáveis acúmulo de nitrogênio (N) em parte aérea (NCS) e em raiz (NCR) (mg planta⁻¹), e transporte de N na planta (%).

Variables	Ammendment (A)	<i>A.nodosum</i> (An)	A*An	Error	VC (%)	\bar{x}
SDW	0,2010**	0,0157 ^{ns}	0,0459 ^{ns}	0,0370	32,84	0,5863
RDW	2,7772**	0,0609 ^{ns}	0,4709 ^{ns}	0,6523	37,41	2,1591
Root Depth	53,4591 ^{ns}	5,0052 ^{ns}	125,5541 ^{ns}	55,3509	19,66	37,8479
Root Surface	1847,5469**	263,4282 ^{ns}	570,8867**	130,1198	30,74	37,1052
NCS	890,8675**	6,9901 ^{ns}	99,9974*	33,7636	37,51	15,4929
NCR	328,5625 ^{ns}	56,1192 ^{ns}	37,2272 ^{ns}	163,5340	37,95	33,6945
NT	714,0858**	417,7621**	610,2377**	60,3482	25,89	30,0054

*, ** e ^{ns} Significativo a 1 e 5% e não significativo pelo teste de F.

As plantas que obtiveram maior peso seco de parte aérea e raiz foram as que receberam os tratamentos L e LG, enquanto as com menor peso foram as do tratamento controle (Figura 7A).

A superfície de raiz (Root Surface) obteve interação entre os tratamentos de solo com e sem a aplicação do *A. nodosum*, (Tabela 6). Os tratamentos de correção do solo que proporcionaram maior superfície de raiz foram L e LG com *A. nodosum*, e na ausência da alga, LG, L e G foram os com maior área de raiz (Figura 7B). A correlação positiva entre L e LG e aplicação de alga demonstra que, nesses tratamentos, com a aplicação de *A. nodosum*, a planta desenvolveu melhor o seu sistema radicular, tendo maior área e aumentando sua superfície de contato com o solo, que é essencial para a maior absorção de água e nutrientes, e maior tolerância às condições de estresses abióticos.

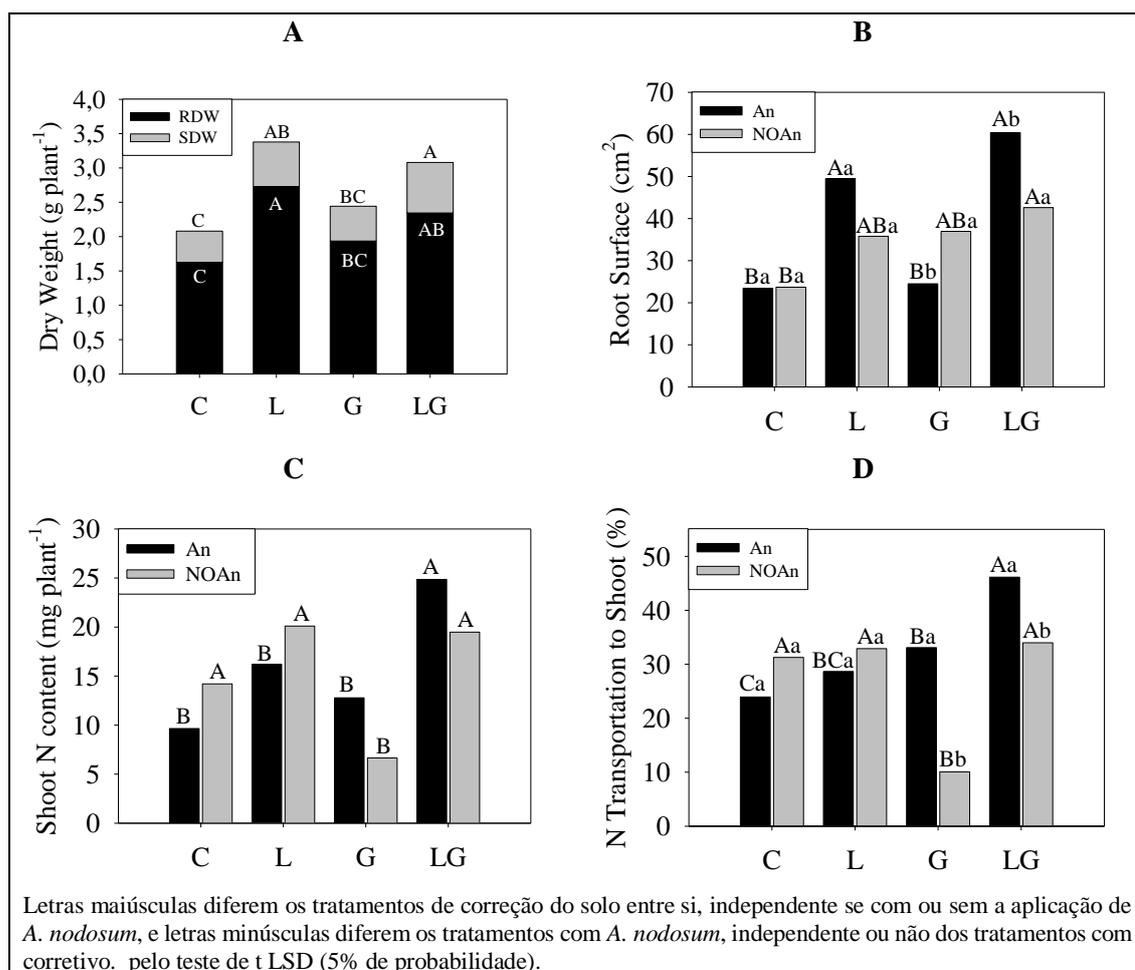


FIGURA 7 Crescimento inicial do milho cv. P3754 PWU: peso seco de parte aérea (SDW) e raiz (RDW) (g planta⁻¹) (A), área de raiz (Root Area) (cm²) (B), acúmulo de N em parte aérea (mg planta⁻¹) (C) e transporte de N para parte aérea (%) (NT) (D), em função dos tratamentos de correção do solo e com aplicação de extrato de *A. nodosum*. Rio Verde, 2019.

A interação dos tratamentos de correção de solo com a aplicação de *A. nodosum* também alterou o acúmulo do N na parte aérea (Tabela 6). O maior acúmulo de N ocorreu nas plantas tratadas com o extrato de *A. nodosum* e com aplicação do LG (Figura 7 C). Nas plantas sem a aplicação do extrato da alga, o maior acúmulo de N foi obtido nos tratamentos com aplicação dos corretivos L e LG e no C (Figura 7C). Para o transporte de N (NT), também, houve interação entre os tratamentos de correção do solo e a aplicação do extrato de alga (Tabela 6). O maior transporte do N ocorreu nas plantas desenvolvidas nos solos com a aplicação do LG e G, quanto tratadas com *A. nodosum*, e com a aplicação do L e LG e no C na ausência do *A. nodosum* (Figura 7D).

Através das imagens obtidas do rhizotron (Figura 8) é possível notar o aumento no número de pelos radiculares e raízes secundárias nos tratamentos com maior quantidade de cálcio, LG x An e LG (Figura 8A e B), com destaque para associação de calcário, gesso e extrato de *Ascophyllum nodosum* (LG x An), que obteve maior superfície

de raiz entre os tratamentos (Figura 7B), com aumento de 42% em comparação com o mesmo tratamento sem o extrato da alga. Efeito similar foi observado também no tratamento L x An, com visível aumento de superfície de raiz e pelos radiculares com a aplicação de *A. nodosum* (Figuras 7B e 8E).

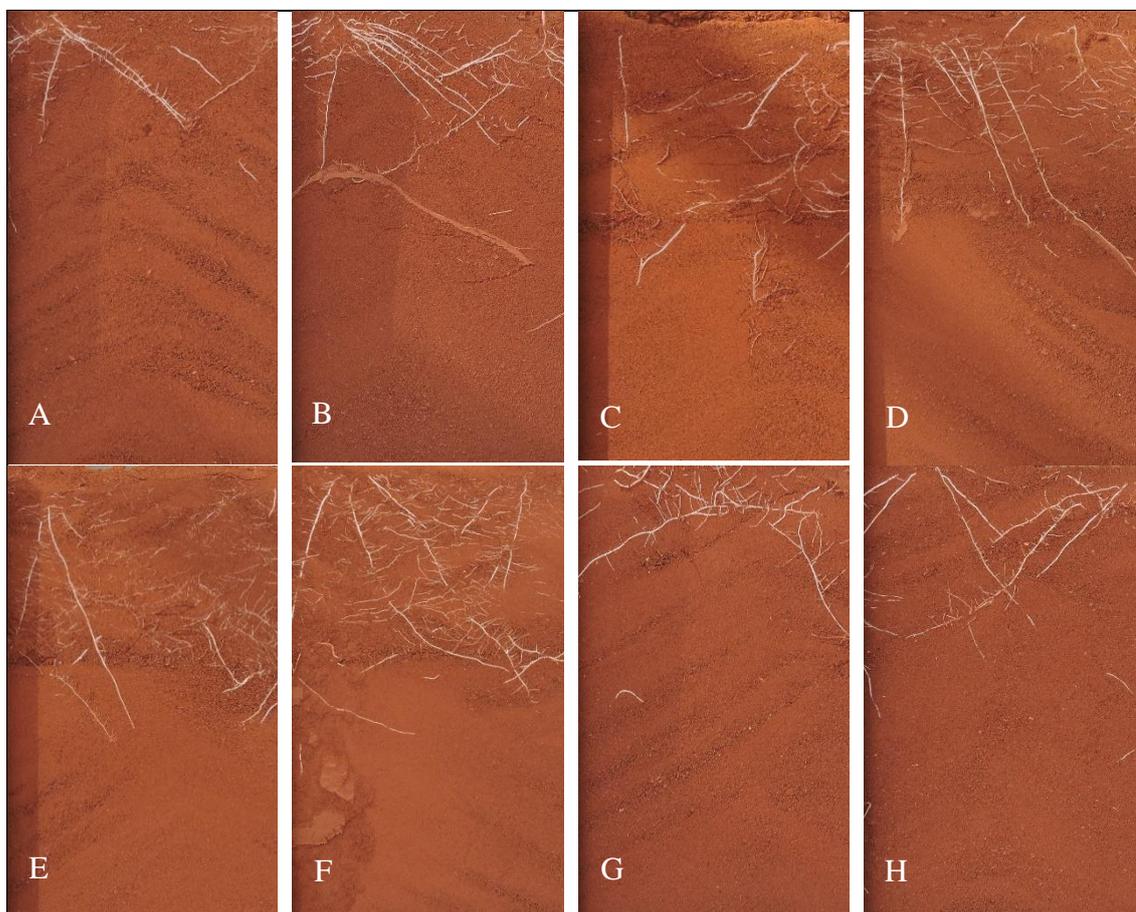


FIGURA 8 Imagens de rhizotron com 60 cm, mostrando a raiz de mudas de milho com 15 dias (estádio V2) A – Gypsum; B – Gypsum e *A. nodosum*; C – Liming; D – Liming e *A. nodosum*; E – Liming and Gypsum; F – Liming and Gypsum and *A. nodosum*; G – Control; H - *A. nodosum*. Todas as imagens estão na mesma escala de tamanho. Rio Verde, 2019.

É necessário destacar que, nos tratamentos apenas com gessagem (Figuras 8C e D), a predominância das raízes no terço superior do rhizotron, refletiu a aplicação do gesso apenas em superfície, prática comum dos agricultores em campo. Possivelmente, em 15 dias não houve tempo suficiente para a percolação do sulfato de cálcio. As mesmas limitações impostas pela gessagem em superfície podem ser observadas nas outras variáveis avaliadas (Figuras 7A, B, C e D), em que os tratamentos com gesso tiveram desempenho similar ao tratamento controle, enquanto os tratamentos com calcário, incorporado até 20 cm, tiveram melhor performance.

Apesar das limitações, em termos de acúmulo e transporte de N (Figuras 7C e D), o tratamento apenas com gesso foi o mais responsivo à aplicação do extrato de alga, com aumento de 328,7% no transporte de N para parte aérea quando comparado ao gesso sem *A. nodosum*.

5.4. DISCUSSÃO

Como esperado, a correção do solo, independente do tratamento em ambos experimentos, acarretou em plantas com maior massa seca, maior superfície de raiz e maior acúmulo de C, resultados similares aos observados por Tiecher et al, (2018) e Schenfert et al., (2019). Isso se deve ao melhoramento do ambiente radicular através da ação da calagem, que aumenta o pH do solo e precipita os cátions de Al^{3+} em hidróxido de alumínio, além de fornecer Ca para a cultura, e também da ação do gesso, que apesar de não corrigir a acidez do solo, fornece Ca e S em profundidades maiores, além de também promover a precipitação do Al (Caires et al., 2011).

A aplicação de corretivos, sejam eles calcário ou gesso, sozinhos ou combinados, aumentou o acúmulo de Ca, Mg e S. O potássio (K) foi mais acumulado nos tratamentos com os corretivos isolados, possivelmente por ter sido deslocado no solo no tratamento LG, pela grande quantidade de Ca^{3+} (Soares et al., 2018). Mesmo nos nutrientes em que o acúmulo na parte aérea e na raiz não foi significativo, os corretivos alteraram a partição dos mesmos nas plantas, resultando em mais N e K transportados para a parte aérea do que retidos na raiz.

Dito isso, através da precipitação do Al^{3+} e redução da toxidez por alumínio no solo, os tratamentos com corretivos aumentaram o teor relativo de clorofila, a atividade fotossintética das plantas, e também reduziram perdas por fluorescência. A diminuição dos teores de clorofila *a* e *b* é uma das consequências da toxidez por alumínio (Peixoto et al., 2002), e funciona como mecanismo de defesa, pois além de diminuir a absorção de luz pela redução na concentração de clorofila, a presença de Al aumenta a taxa de fechamento dos centros de reação, como forma de proteção a danos por estresse luminoso (Jiang et al., 2008), porém, ao mesmo tempo, levando a redução na eficiência fotossintética das plantas.

A redução de Ψ_o , e conseqüentemente, Φ_{E_o} em plantas sob estresse de alumínio também foi observada por Jiang et al. (2008) em trabalho com *Citrus grandis* (L.). Os

resultados demonstram que a toxidez por alumínio reduziu o índice desempenho (π_{ABS}), o fluxo de absorção (ABS/RC) e o transporte de elétrons (Dio/RC), além de reduzir a assimilação de CO₂ (A). Jiang et al. (2008) encontraram resultados semelhantes, em que a redução da capacidade de transporte de elétrons, acompanhada pela falta de equivalentes redutores parecem ser os principais fatores que contribuem para a diminuição da assimilação de CO₂ em plantas sob estresse de Al.

Em geral, as plantas do tratamento controle foram as que tiveram pior performance, tanto em crescimento de parte aérea e raiz, quanto em absorção de nutrientes e atividade fotossintética, uma vez que essas plantas foram cultivadas em ambiente sob toxidez de Al. Quando o teor de alumínio trocável está acima do nível crítico, ele restringe o crescimento das raízes e conseqüentemente, reduz a eficiência de absorção de nutrientes da planta (Yadesa et al., 2019). Vale destacar que, nas plantas controle, a partição de C (Figura 4 A) favoreceu as raízes, ou seja, a planta sob estresse preteriu a emissão de novas folhas, possivelmente como forma de diminuir perdas por transpiração (Silva et al., 2010), em busca de ambiente menos tóxico, com maior possibilidade de absorção de nutrientes. Apesar disso, as plantas cultivadas sem a aplicação dos corretivos (controle) foram as que tiveram menor superfície de raiz, e pode ser notado nas imagens de raiz das plantas sem corretivos (Figuras 2 G e H, e Figuras 8 G e H).

Muitos trabalhos ao longo dos anos relatam inibição do crescimento de raiz sob toxidez de Al (Wright, 1989; Ryan et al., 1992; Ryan & Kochian, 1993; Wang et al., 2004; Poschenrieder et al., 2008; Trachsel et al., 2010; Silva, 2012; Furlan et al., 2019), e também pode ser observado neste trabalho, que através das imagens de tomografia computadorizada se notam raízes com pontas grossas e atrofiadas, curvadas irregularmente, pelos radiculares reduzidos e raízes laterais finas que se iniciam próximo à ponta das raízes axiais, efeitos típicos de raízes cultivadas sob toxidez de alumínio, de acordo com Wright (1989) e Čiamporová (2002).

No ensaio em rhizotron (Experimento II), houve interação entre os tratamentos de correção do solo e a aplicação do extrato de *A. nodosum*. Nos tratamentos com a aplicação de LG, obteve-se o maior valor de superfície de raiz quando associado com o extrato de alga, bem como maior acúmulo de N. Neste ensaio, todos os tratamentos de calcário, quando na presença do extrato da alga, obtiveram incremento da superfície de raiz e acúmulo de nitrogênio, podendo sugerir maiores efeitos do *A. nodosum* na presença do calcário e, ou pH próximo à neutralidade. Esse resultado é semelhante aos obtidos para a

cultura do feijão mungu com o uso de extrato da alga *Ecklonia máxima* (Arthur et al., 2013) e a cultura da uva sob *A. nodosum* (Sabir et al., 2014). Arthur et al. (2013) ainda relataram aumento nos teores dos pigmentos fotossintéticos (ChlA, ChlB e carotenoides) quando associado ao extrato da alga com o fornecimento de cálcio e solo com pH 6,5.

O aumento do crescimento de raiz como resultado da associação entre extrato de alga e calcário ocorre pela presença de fitormônios no extrato de *A. nodosum*, principalmente a auxina citoplasmática, que é transportada entre os tecidos da planta quando ligada ao Ca^{2+} . A auxina possui movimento acropetal, através do tecido vascular, e basipetal para o córtex externo e epiderme das raízes, através de carreadores de influxo e efluxo específicos para facilitar o movimento entre as células. O gradiente de auxina é fundamental para regular a organização do meristema da raiz e sua atividade. O fornecimento extra de auxina pelo extrato de alga reduz o pH citosólico e aumenta as concentrações de Ca^{2+} . Essa mudança no pH pode causar flutuações no potencial da membrana celular, aumentando a excreção de prótons (Shishova & Lindberg, 2004; Lanteri et al., 2006; Arthur et al., 2013; Vanneste & Friml, 2013).

Outro efeito observado com a aplicação do extrato de alga foi a redução do acúmulo de Al nas folhas, quando comparado com plantas sem aplicação da alga. A redução do acúmulo de Al foliar é de extrema importância, uma vez que a presença de grandes quantidades do metal nas folhas pode levar à produção de espécies reativas de oxigênio (EROs), com consequente peroxidação dos lipídios da plasmalema, causando danos aos componentes celulares (Panda et al., 2009).

Os resultados de acúmulo de Al radicular sugerem que ele pode ter ficado retido no apoplasto das raízes, principalmente aquelas sob corretivos de solo e extrato de alga. É possível visualizar esse acúmulo através das imagens de microscopia (Figuras 9 e 10), com a presença de grandes quantidades de Al no apoplasto das raízes, principalmente sob calcário e calcário + *A. nodosum* (Figuras 9 D e E, respectivamente). É possível notar também, que nos tratamentos controle há a presença de alumínio dentro das células (Figura 10 A e B), que corrobora com os demais efeitos deletérios no crescimento e fotossíntese observados nas plantas controle.

O alto acúmulo de Al no tecido radicular e baixa concentração do metal nas folhas sugere que o mesmo pode ter sido precipitado por ácidos orgânicos ou em diferentes espécies iônicas de hidróxido e, ou, hidróxisulfato de alumínio no apoplasto das raízes, dificultando o seu transporte para o simplasto e consequentemente para a parte aérea. A

liberação de solutos complexantes de Al, particularmente ânions de ácidos orgânicos como malato e citrato, na zona da raiz apical sensível ao Al é a maneira mais eficaz de reduzir o impacto do Al sobre funções apoplásticas, através da formação de complexos não tóxicos de alumínio, reduzindo seus efeitos deletérios nas plantas (Horst et al., 2010; Kopittke et al., 2017)

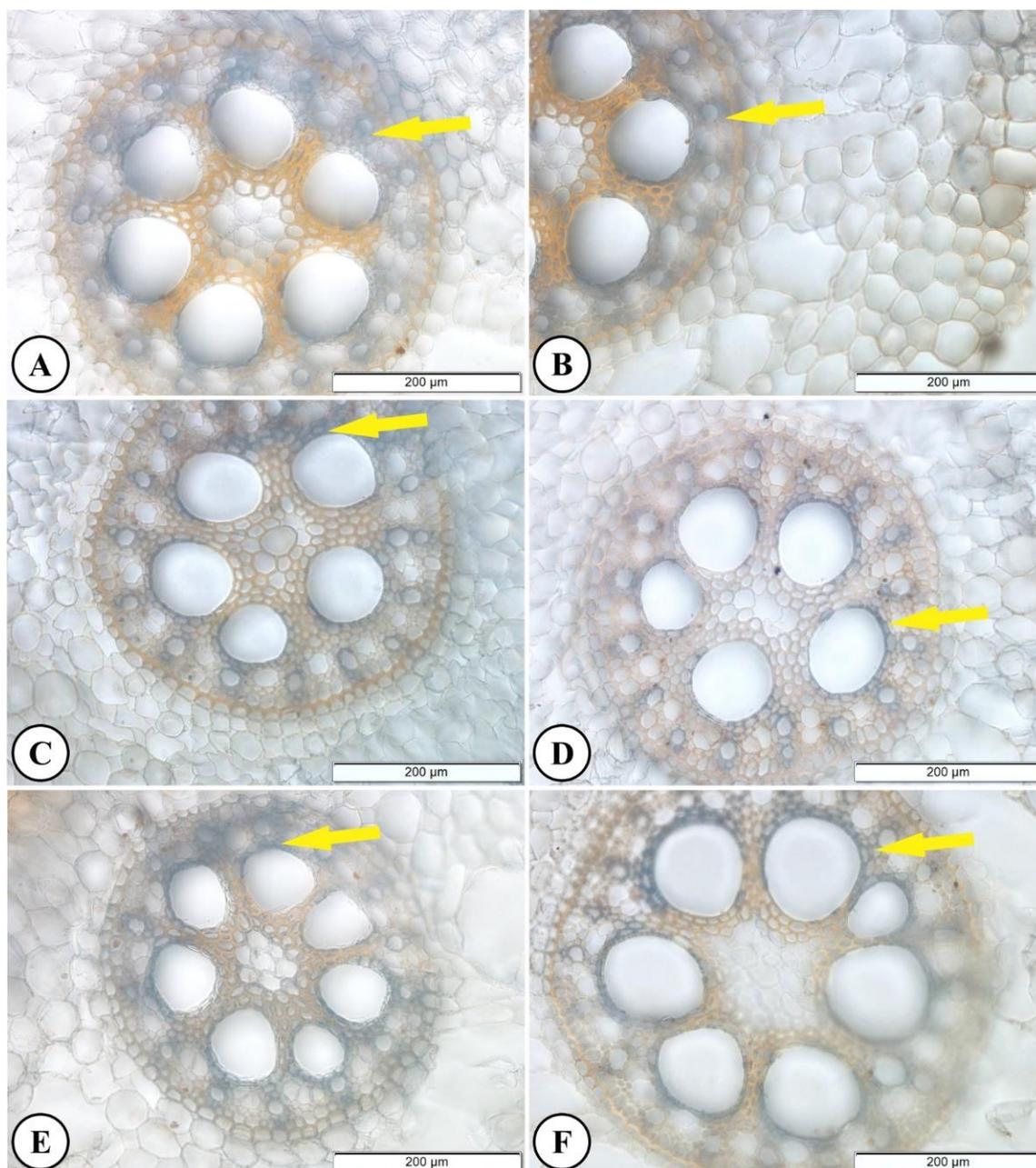


FIGURA 9 Caracterização anatômica das raízes de milho coradas com Chrome azurol após 15 dias de cultivo (estádio V2), sob os tratamentos: controle (A-B), controle + *Ascophyllum nodosum* (C-D), calcário + *Ascophyllum nodosum* (E) e calcário. Barras 200 µm, Meio. Setas amarelas indicam acúmulo alumínio nas células. Todas as imagens estão na mesma escala de tamanho. Rio Verde, 2019.

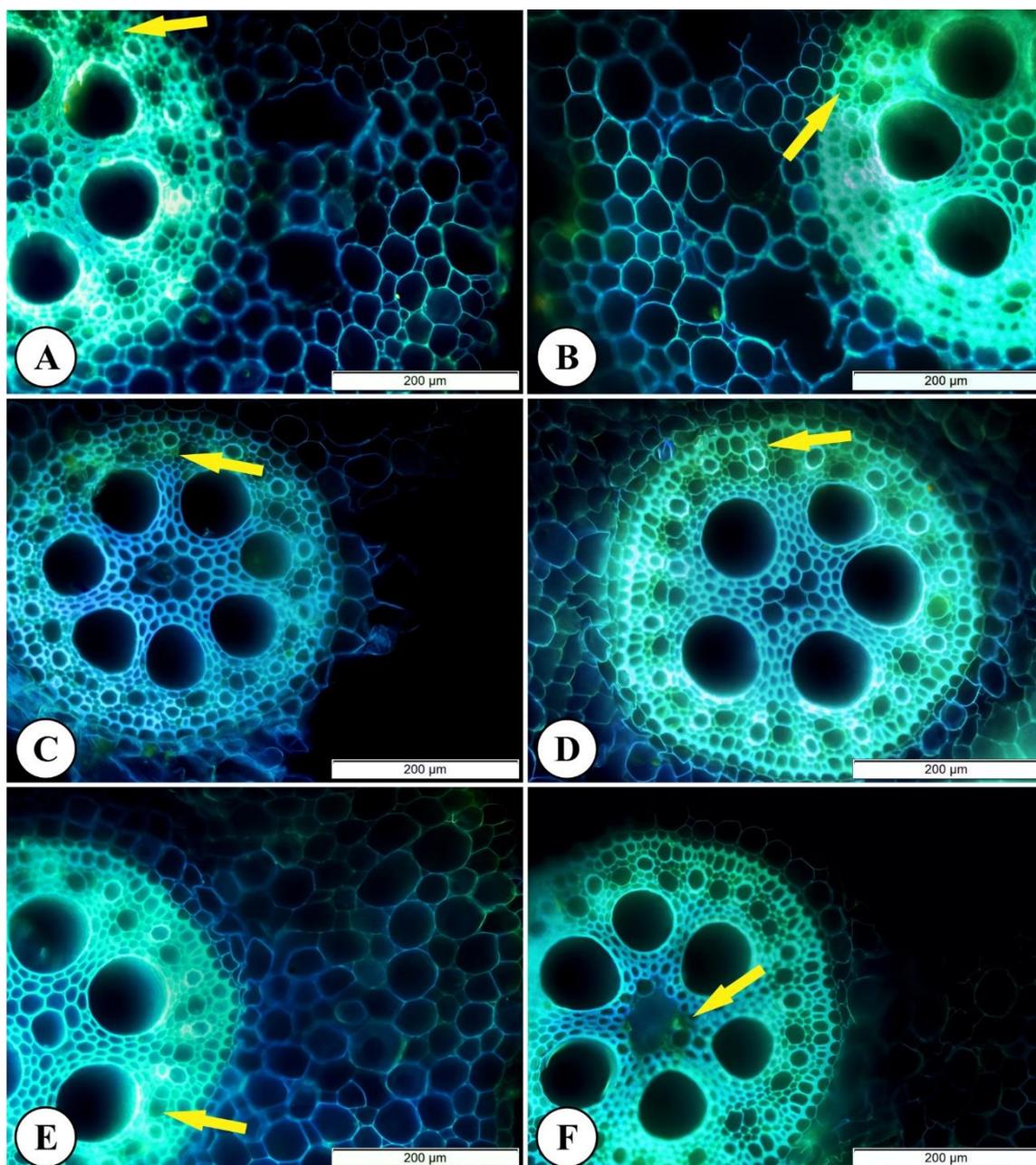


FIGURA 10 Fluorescência de imagem das raízes de milho tratadas com fluorocromo Morin após 15 dias de cultivo (estádio V2), sob os tratamentos: controle (A-B), controle + *Ascophyllum nodosum* (C-D), calcáreo + *Ascophyllum nodosum* (E) e calcáreo. Barras 200 µm, Meio. Setas amarelas indicam acúmulo alumínio nas células. Todas as imagens estão na mesma escala de tamanho. Rio Verde, 2019.

Apesar de existirem poucos trabalhos sobre os efeitos do *A. nodosum* em plantas desenvolvidas sob estresse pelo Al no solo, vários autores relatam que a aplicação do extrato da alga pode levar ao aumento de exsudatos de raiz, entre eles os flavonoides (Lola-Luz et al., 2013; Elansary et al., 2016; Jithesh et al., 2018; e Shukla et al. 2019), metabólitos secundários do grupo de compostos fenólicos, com alta habilidade de quelação de Al, e sua exsudação pelas raízes pode potencialmente reduzir a atividade do

Al no apoplasto, evitando que ele seja transportado para a parte aérea (Kidd et al. 2001; Panda et al., 2009).

Em geral, o resultado positivo da aplicação do *A. nodosum* isoladamente ou em conjunto com corretivos de acidez do solo, aumentando a eficiência de uso do N e de outros nutrientes aplicados, em plantas sob estresse abiótico pelo Al no solo é inédito, e pode auxiliar no desenvolvimento de novas tecnologias. Mas, também, é necessário o desenvolvimento de mais estudos, para avaliar a hipótese de exudados de raiz complexar o alumínio no apoplasto, reduzindo seu transporte para a parte aérea e conseqüentemente seus efeitos tóxicos para as plantas.

5.5. CONCLUSÕES

O tratamento de sementes com o extrato de *A. nodosum* e sua aplicação nas plântulas de milho levou ao incremento na superfície de raiz nos tratamentos com calcário, e ao menor transporte de alumínio para a parte aérea das plantas. Os tratamentos com calcário e gesso foram eficientes em minimizar os efeitos deletérios da toxidez por alumínio, mesmo com sua aplicação a curto prazo em solo de textura média, proporcionando melhor atividade fotoquímica, melhor uso e eficiência de nutrientes, melhor enraizamento e, por consequência, maior peso seco de parte aérea e raiz.

São necessários mais estudos focados nos efeitos do uso de *A. nodosum* em plantas sob toxidez de alumínio e solos ácidos, com foco em crescimento radicular, efeitos na rizosfera e exsudatos de raiz, para melhor compreensão dos mecanismos de redução dos efeitos deletérios da toxidez de Al.

5.6. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

ARTHUR G. D., et al. Growth promoting effects of a seaweed concentrate at various pH and water hardness conditions. *South African Journal of Science*. v. 109 issue 11-12, p. 39-44. 2013. <http://dx.doi.org/10.1590/sajs.2013/20120013>

BSPB. 2019 Forage Maize and Biogas Maize Descriptive Lists. BSPB, NIAB. 2019. Retrieved from http://www.plantbreedermatters.com/sg_userfiles/BSPB_2019_Forage_Maize_Descriptive_Lists+_AD.pdf

ČIAMPOROVÁ, M. Morphological and Structural Responses of Plant Roots to Aluminium at Organ, Tissue, and Cellular Levels. *Biologia Plantarum*. v. 45, p. 161–171. 2002. <https://doi.org/10.1023/A:1015159601881>

CAIRES E. F., et al. Long-term effects of lime and gypsum additions on no-till corn and soybean yield and soil chemical properties in southern Brazil. *Soil Use and Management*. v. 27, p. 45–53. 2011. doi: 10.1111/j.1475-2743.2010.00310.x

CAIRES EF, et al. Optimizing nitrogen use efficiency for no-till corn production by improving root growth and capturing NO₃-N in subsoil. *Pedosphere*. v. 26 p. 474-485. 2016. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(15\)60058-3](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(15)60058-3)

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento de safra brasileiro – grãos: décimo segundo levantamento, setembro 2020 – safra 2019/2010: Brasília: Companhia Nacional de Abastecimento. 2020. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos>>.

DU JARDIN, P. Plant biostimulants: definition, concept, main categories and regulation. *Scientia Horticulturae*. v. 196, p.3–14, 2015. Doi: 10.1016/j.scienta.2015.09.021

ELANSARY, H. O., et al. Enhancement of Calibrachoa growth, secondary metabolites and bioactivity using seaweed extracts. *BMC Complementary and Alternative Medicine*. v. 16 p. 341-352. 2016. doi: 10.1186/s12906-016-1332-5

EMBRAPA. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. 2 ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2009. 627p.

EMBRAPA SOLOS. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 5. ed. Rio de Janeiro, 2018. 355p.

ETICHA, D., et al. Localization of aluminium in the maize root apex: can morin detect cell wall-bound aluminium? *Journal of Experimental Botany*. v. 56 p. 1351–1357. 2005. doi:10.1093/jxb/eri136

FERREIRA, D. F. Sisvar: a guide for its bootstrap procedures in multiple comparisons. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 38, n. 2, p. 109-112, 2014. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542014000200001>

FURLAN, F., et al. Aluminum-induced toxicity in *Urochloa brizantha* genotypes: A first glance into root Al-apoplastic and -symplastic compartmentation, Altranslocation and antioxidant performance. *Chemosphere*. v. 243, 125362. 2019.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125362>

HALPERN, M., et al. The use of biostimulants for enhancing nutrient uptake. *Advances in Agronomy*. v.130, p.141–174. 2015. DOI: 10.1016/bs.agron.2014.10.001.

HOEFT, R. G., et al. Evaluation of Various Extractants for Available Soil Sulfur. *Soil Science Society of America Journal*, v. 37 issue 3, p. 401-404. 1973.
doi:10.2136/sssaj1973.03615995003700030027x

HORST, W. J., et al. The role of the root apoplast in aluminium-induced inhibition of root elongation and in aluminium resistance of plants: a review. *Annals of Botany*. v. 106, p. 185–197. 2010. doi: 10.1093/aob/mcq053

JIANG, H. et al. Aluminum-induced effects on Photosystem II photochemistry in Citrus leaves assessed by the chlorophyll a fluorescence transient. *Tree Physiology* v. 28, p. 1863–1871. 2008. doi: 10.1093/treephys/28.12.1863.

JITHESH, M. N. et al. Physiological and transcriptomics analyses reveal that *Ascophyllum nodosum* extracts induce salinity tolerance in *Arabidopsis* by regulating the expression of stress responsive genes. *Journal of Plant Growth Regulation*. 38, p. 463–478. 2018. doi: 10.1007/s00344-018-9861-4

KIDD P.S., et al. The role of root exudates in aluminium resistance and silicon-induced amelioration of aluminium toxicity in three varieties of maize (*Zea mays* L.). *Barceló Journal of Experimental Botany*, v. 52, issue 359, p. 1339–1352. 2009.
<https://doi.org/10.1093/jexbot/52.359.1339>

KILMER, V.J. & ALEXANDER, L.T. Methods of making mechanical analysis of soils. *Soil Science*, v.68, p.15-24, 1949.

KOPITTKE, P.M., et al. Aluminum complexation with malate within the root apoplast differs between aluminum resistant and sensitive wheat lines. *Frontiers in Plant Science* v. 8, p. 1377, 2017. doi:627 10.3389/fpls.2017.01377

KUKACHKA, B.F. & MILLER, R.B. A chemical spot-test for aluminum and its value in wood identification. *IAWA Bulletin*, v. 1, issue 3, p.104-109. 1980.

LANTERI, M. L., et al. Calcium and calcium-dependent protein kinases are involved in nitric oxide- and auxin-induced adventitious root formation in cucumber. *Journal of Experimental Botany*, v. 57, issue. 6, p. 1341–1351. 2006. doi:10.1093/jxb/erj109

LOLA-LUZ, T., et al. Enhancement of phenolic and flavonoid compounds in cabbage (*Brassica oleraceae*) following application of commercial seaweed extracts of the brown seaweed, (*Ascophyllum nodosum*). *Agricultural Food Science*. v. 22, p.288–295. 2013.
doi: 10.23986/afsci.7676

MALAVOLTA, E. et al. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. Piracicaba: POTAFOS, 1997. 201p.

PANDA, S. K. et al. Aluminum stress signaling in plants. *Plant Signaling & Behavior*, v. 4, issue 7, p. 592-597. 2009. doi: 10.4161/psb.4.7.8903

PEIXOTO, H. P. et al. Responses of the photosynthetic apparatus to aluminum stress in two sorghum cultivars. *Journal of Plant Nutrition*, v. 25 issue 4, p.821-832. 2002. doi: 10.1081/PLN-120002962

POSCHENRIEDER, C., et al. A glance into aluminum toxicity and resistance in plants. *Science of the Total Environment*. v. 400, p. 356-368. 2008. doi:10.1016/j.scitotenv.2008.06.003

RYAN, P. R. & KOCHIAN L. V. Interaction between aluminum toxicity and calcium uptake at the root apex in near-isogenic lines of wheat (*Triticum aestivum* L.) differing in aluminum tolerance. *Plant Physiology*. v. 102, p. 975–982. 1993. <https://doi.org/10.1104/pp.102.3.975>

RYAN, P. R. et al. Aluminum Toxicity in Roots. *Plant Physiology*. v. 99 issue 3, p. 1193-1200.1992. doi: 10.1104/pp.99.3.1193

SABIR, A., et al. Vine growth, yield, berry quality attributes and leaf nutrient content of grapevines as influenced by seaweed extract (*Ascophyllum nodosum*) and nanosize fertilizer pulverizations. *Scientia Horticulturae*, v. 175, p. 1-8. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.05.021>

SCHENFERT, T. A. et al. Lime and gypsum in the implantation no-till system promote the nutrition and yield of soybean. *Journal of Plant Nutrition*, v. 43, issue 5, p. 641-654. 2019. doi:10.1080/01904167.2019.1701028

SHARMA H. S. S., et al. Plant biostimulants: a review on the processing of macroalgae and use of extracts for cropmanagement to reduce abiotic and biotic stresses. *Journal of Applied Phycology*. v. 26 p. 465–490. 2014. doi: 10.1007/s10811-013-0101-9

SHISHOVA, M. & LINDBERG, S. Auxin induces an increase of Ca²⁺ concentration in the cytosol of wheat leaf protoplasts. *Journal of Plant Physiology*. v. 161, p. 937–945. 2004. doi:10.1016/j.jplph.2003.12.005

SHUKLA P. S. et al. *Ascophyllum nodosum*-Based Biostimulants: Sustainable Applications in Agriculture for the Stimulation of Plant Growth, Stress Tolerance, and Disease Management. *Frontiers in Plant Science*. v. 10 p.655. 2019. doi: 10.3389/fpls.2019.00655

SILVA, S. et al. Differential aluminium changes on nutrient accumulation and root differentiation in an Al sensitive vs. tolerant wheat. *Environmental and Experimental Botany*. v. 68 p. 91–98. 2010. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2009.10.005>

SILVA, S. Aluminium Toxicity Targets in Plants. *Journal of Botany*. v. 2012, id. 219462, 2012. doi:10.1155/2012/219462.

SOARES, G. F. et al. Gypsum and phosphorus in improving biometric and nutritional attributes of soybean/second Season corn succession. *Revista Caatinga*. v. 31, n. 2, p. 326 – 335, 2018. <http://dx.doi.org/10.1590/1983-21252018v31n208rc>

SOBRAL, A. F. & GUIMARÃES, V. O. S. Relação entre a toxidez do alumínio e a produção de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*). *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 27 issue 2 p. 287-292, 1992.

SOUZA, D. M. G. & E. LOBATO. Cerrado: correcao do solo e adubacao. Planaltina: EMBRAPA Cerrados, 2004. 416 p.

STRASSER, R.J. et al. The fluorescence transient as a tool to characterize and screen photosynthetic samples. In: YUNUS, M.; PATHRE, U.; MOHANTY, P. *Probing Photosynthesis: Mechanism, Regulation and Adaptation*. Taylor and Francis, cap.25, p.445-483., 2000.

TABATABAI, M. A., & BREMNER, J. M. A Simple Turbidimetric Method of Determining Total Sulfur in Plant Materials. *Agronomy Journal*, v. 62 issue 6, p. 805. 1970. doi:10.2134/agronj1970.00021962006200060038x

TIECHER T. et al. Crop response to gypsum application to subtropical soils under no-till in Brazil: a systematic review. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. v. 42 id 0170025. 2018. <https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20170025>

TRACHSEL, S., et al. Effect of high temperatures, drought and aluminum toxicity on root growth of tropical maize (*Zea mays L.*) seedlings. *Maydica*, v. 55 p. 249-260. (2010)

UGARTE R. A., et al. Changes in the brown seaweed *Ascophyllum nodosum* (L.) Le Jol. Plant morphology and biomass produced by cutter rake harvests in southern New Brunswick, Canada. *Journal of Applied Phycology*, v. 18 p. 351–359. 2006. DOI: 10.1007/s10811-006-9044-8.

VALE, F. X. R. et al. *Quantificação de doenças – Quant versão 1.0.1*. Viçosa: UFV, 2001. Software.

VANNESTE, S & FRIML, J. Calcium: The Missing Link in Auxin Action. *Plants*, v. 2, p. 650-675, 2013. doi:10.3390/plants2040650

VIEIRA, E. L. et al. *Manual de Fisiologia Vegetal*. São Luis: EDUFMA, 2010. 186p.

WALKLEY, A. & BLACK, I.A. An Examination of the Degtjareff Method for Determining Soil Organic Matter and a Proposed Modification of the Chromic Acid Titration Method. *Soil Science*, v.37, p.29-38. 1934. <http://dx.doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003>

WRIGHT, R. J. Soil aluminum toxicity and plant growth. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, v. 20 issue 15-16, p. 1479-1497. 1989. <https://doi.org/10.1080/00103628909368163>

YADESA, W., et al. Effect of liming and applied phosphorus on growth and P uptake of maize (*Zea mays* subsp.) plant grown in acid soils of West Wollega, Ethiopia. *Journal of Plant Nutrition*, v. 42, issue 5, p. 477-490. 2019. DOI: 10.1080/01904167.2019.1567769

YUNXIA W. et al. Apoplastic Binding of Aluminum Is Involved in Silicon-Induced Amelioration of Aluminum Toxicity in Maize. *Plant Physiology.*, v. 136 issue 3, p. 3762-3770. 2004. DOI: 10.1104/pp.104.045005

YUSUF, M. A., et al. Overexpression of γ -tocopherol methyl transferase gene in transgenic *Brassica juncea* plants alleviates abiotic stress: Physiological and chlorophyll a fluorescence measurements. *Biochimica et Biophysica Acta*. v. 1797 p. 1428–1438. 2010. <https://doi.org/10.1016/j.bbabi.2010.02.002>

6. CONCLUSÃO GERAL

A partir de ambos estudos conduzidos para a realização desta tese, pode-se concluir que:

A variação dos índices obtidos pelos sensores clorofilômetro, fluorômetro e pela câmera multiespectral obtiveram melhor correlação com a produtividade de grãos do que com a estimativa da nutrição nitrogenada. O sensor portátil de fluorescência de clorofila tem potencial para a predição de produção na cultura da soja, especialmente os índices Ψ_o (probabilidade de a energia de excitação mover um elétron após a quinona a) e Φ_{Eo} (probabilidade de a energia de um fóton absorvido mover um elétron após a quinona a).

A aplicação do *A. nodosum* como tratamento de sementes e solução foliar nas plântulas de milho leva ao incremento em superfície de raiz e diminui o transporte de Al para a parte aérea das plantas. Os corretivos de solo são eficazes em diminuir os efeitos deletérios da toxidez por alumínio, proporcionando melhor atividade fotoquímica, melhor uso e eficiência de nutrientes, melhor enraizamento e, por consequência, maior peso seco de parte aérea e raiz.

APÊNDICES

6.1. APÊNDICE A: CAPÍTULO I

FIGURA 1 Análise de dados discrepantes do número de vagens (NV) (A), da produtividade de grãos da soja (PG) (kg ha⁻¹) (B), do peso de mil grãos (PMG) (g) (C), teores foliares em R3 (N) (g kg⁻¹) (D) e dos índices Clorofílog da clorofila a (Chla) (E), b (Chlb) (F) e total (ChIT) (G) e a relação entre os índices Clorofílog de Chla:Chlb (H).

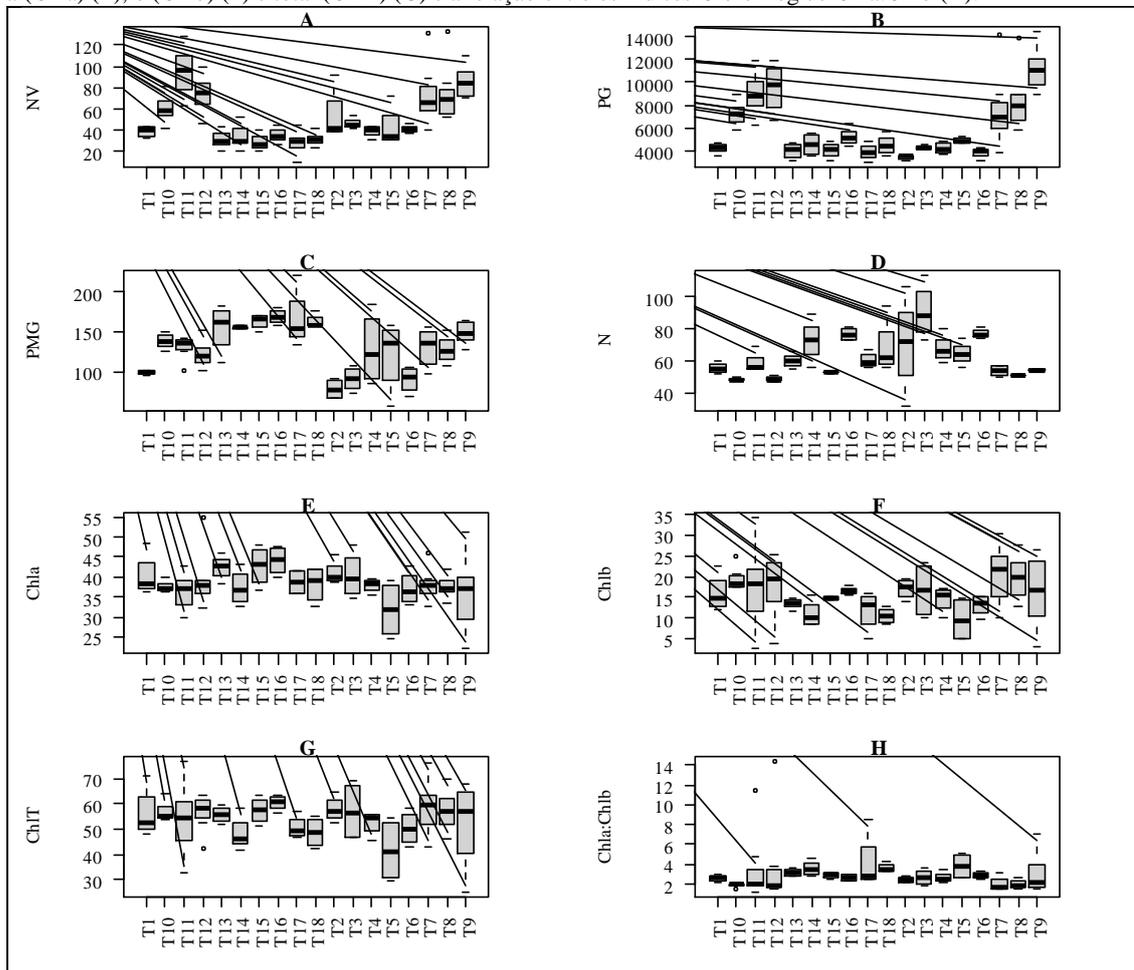


FIGURA 2 Análise de dados discrepantes dos índices FluorPen de fluorescência de clorofila a (Chla) Fo (A), Fj (B), Fi (C), Fm(D), Fv (E), Vj (F) e Vi (G).

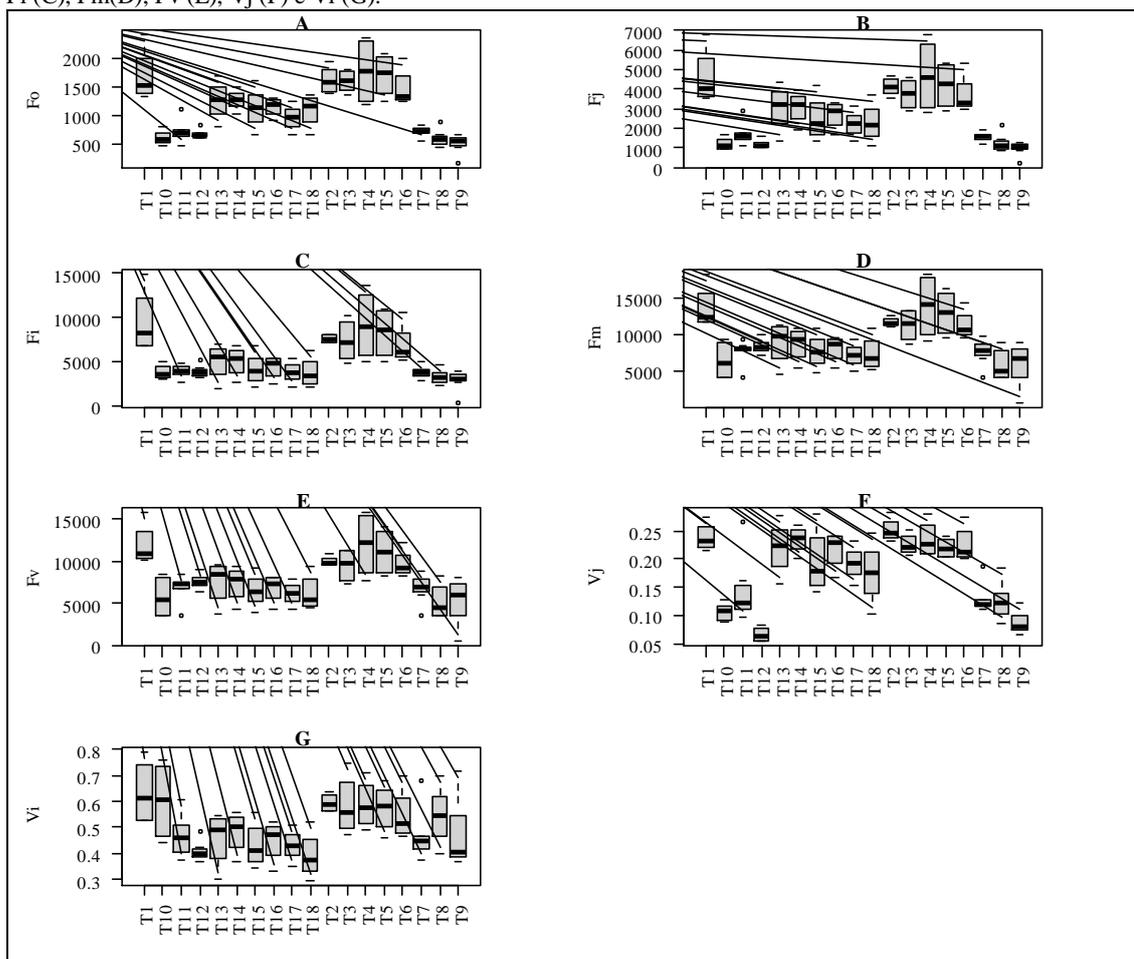


FIGURA 3 Análise de dados discrepantes dos índices FluorPen de fluorescência de clorofila a (Chla) Fm/Fo (A), Fv/Fo (B), Mo (C), Area (D), Fix Area (E), Sm (F), Ss (G) e N (H).

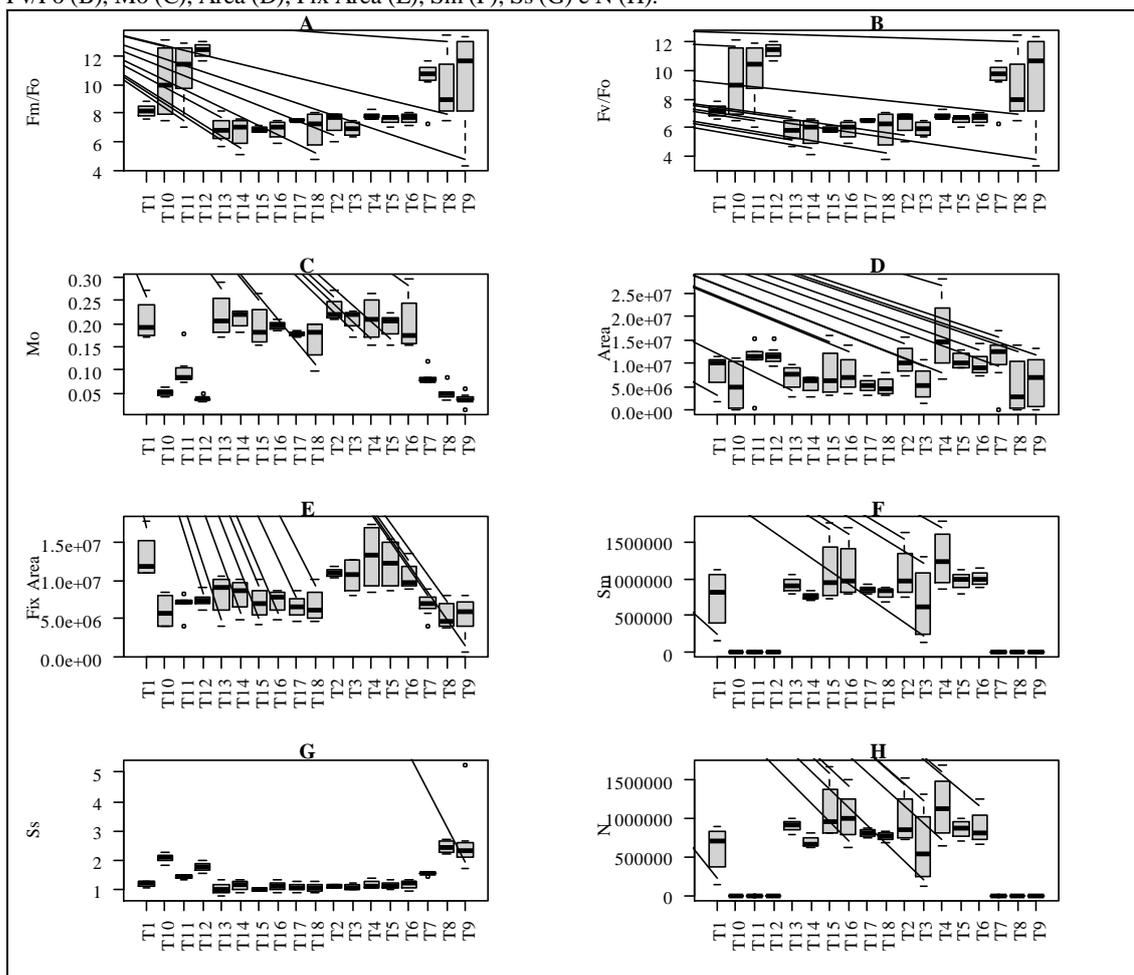


FIGURA 4 Análise de dados discrepantes dos índices FluorPen de eficiência máxima do fotossistema dois (PSII) (Phi-Po) (A), da probabilidade da energia de excitação mover um elétron após a quinona A (Psi-o) (B), da probabilidade da energia de um photon absorvido mover um elétron após a quinona A (Phi-Eo) (C), do rendimento de dissipação de energia (Phi-Do) (D), do rendimento quântico médio de reações fotoquímicas primárias (Phi-Pav) (E), do índice de desempenho do PSII (Pi-Abs) (F), do fluxo de absorção de elétrons pelo centro de reação (RC) (ABS/RC) (G), do fluxo de captura de elétrons pelo RC (TRo/RC) (H), do fluxo de transporte de elétrons pelo RC (ETo/RC) (I) e fluxo de dissipação de elétrons pelo RC (Dio/RC) (J).

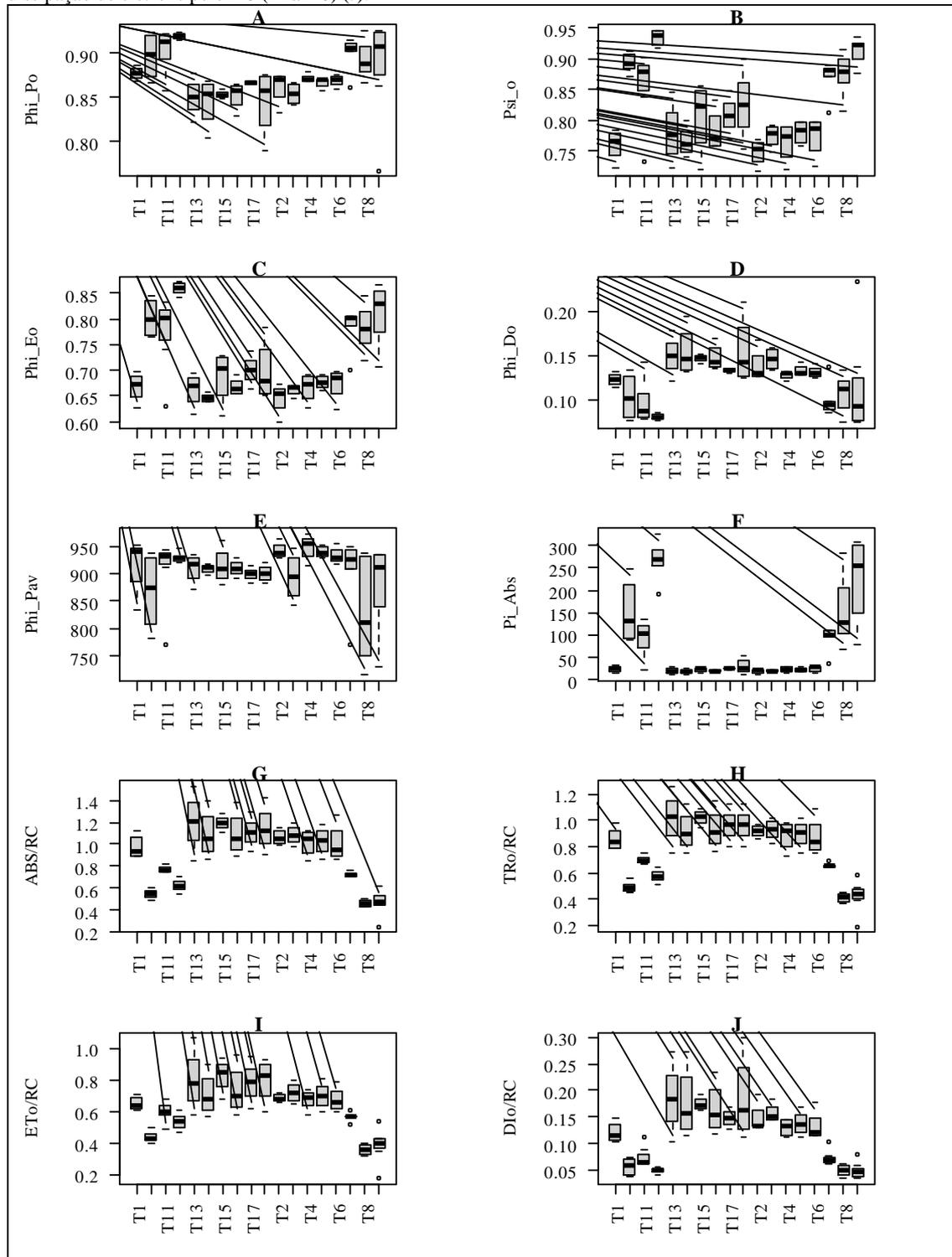
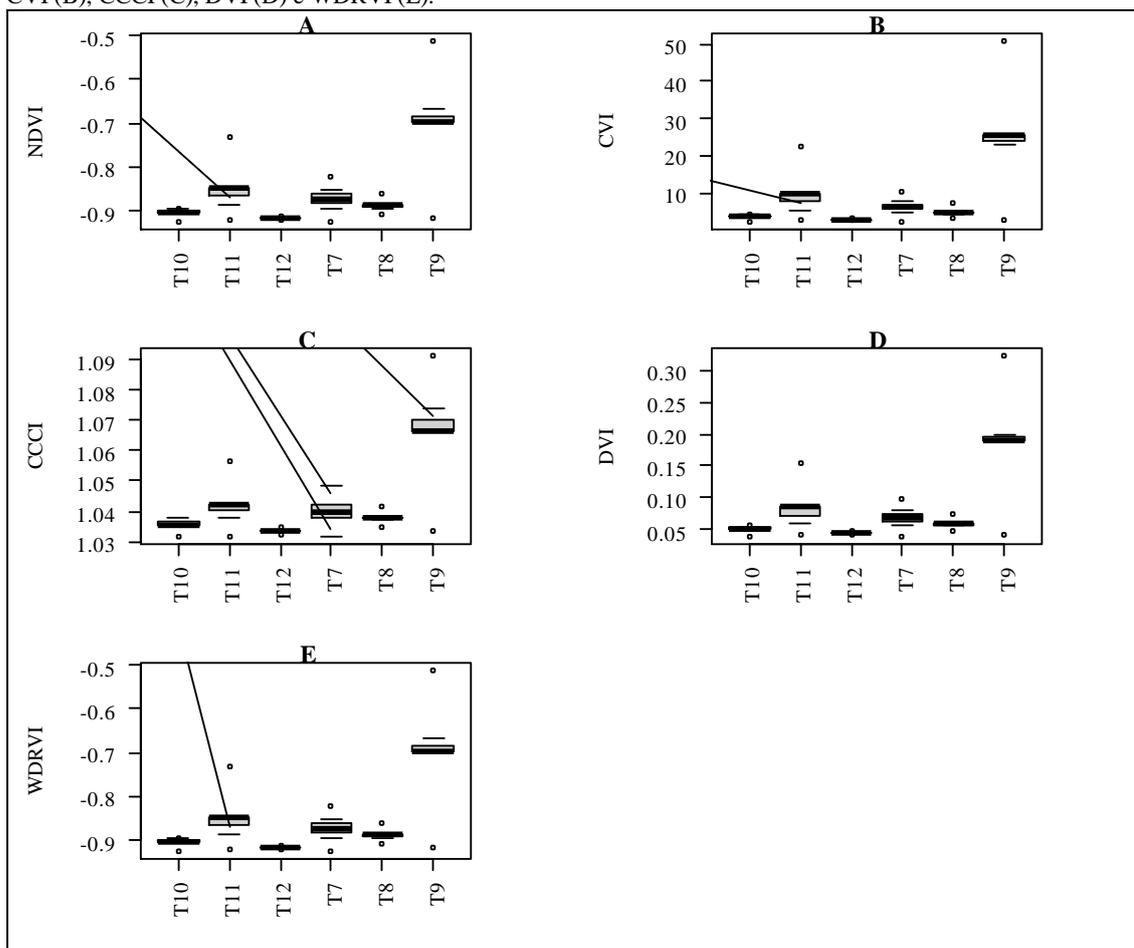


FIGURA 5 Análise de dados discrepantes dos índices do infra-vermelho próximo obtidos por imagem área NDVI (A), CVI (B), CCCI (C), DVI (D) e WDRVI (E).



6.2. APÊNDICE B: CAPÍTULO II

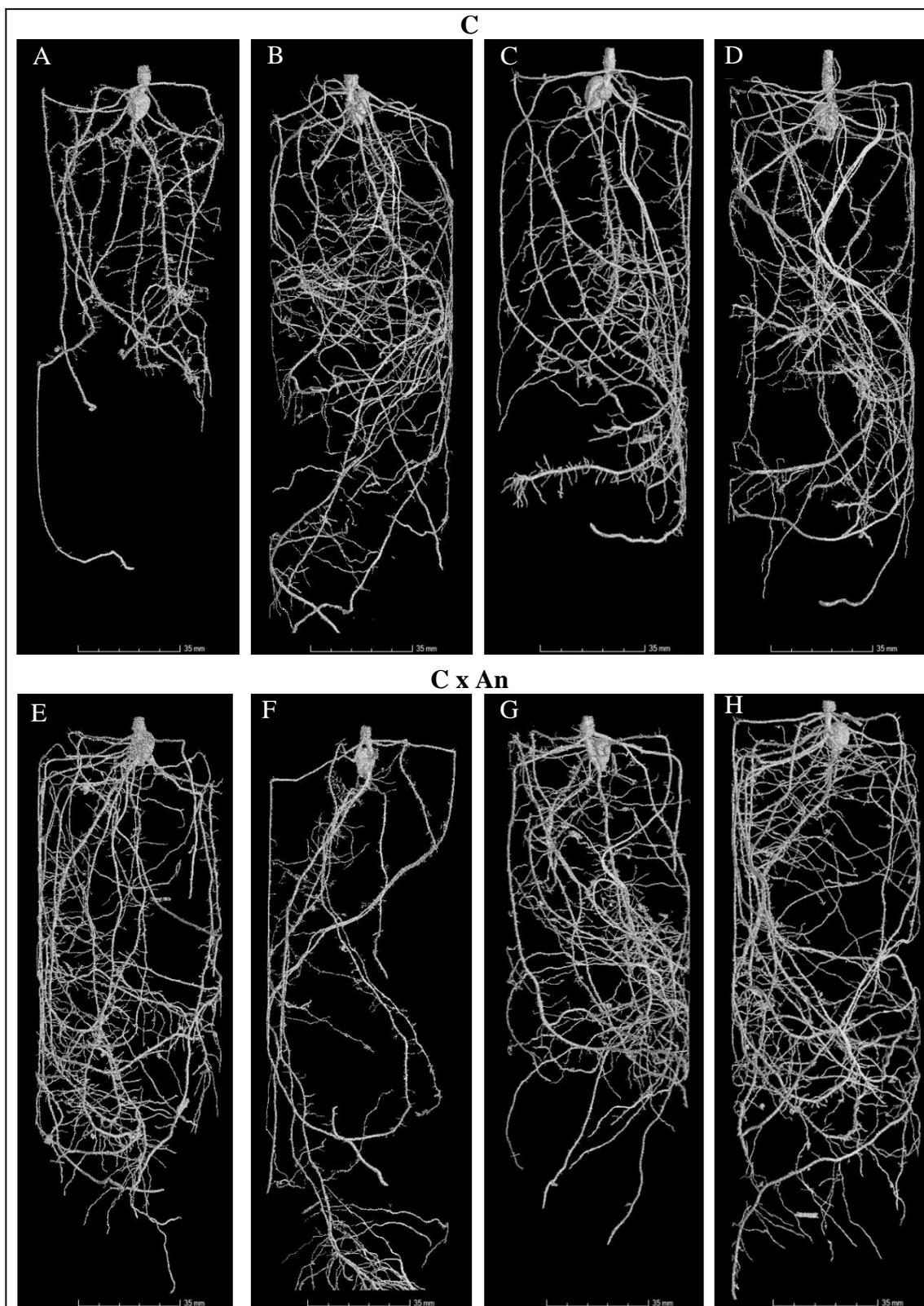


Figura 1 Imagens de raiz de plantas de milho sob tratamento controle (C) e controle + *Ascophyllum nodosum* (C x An) aos 14 dias após a germinação (estádio V2) obtidas por tomografia computadorizada de Raio X 3D. Nottingham, 2019.

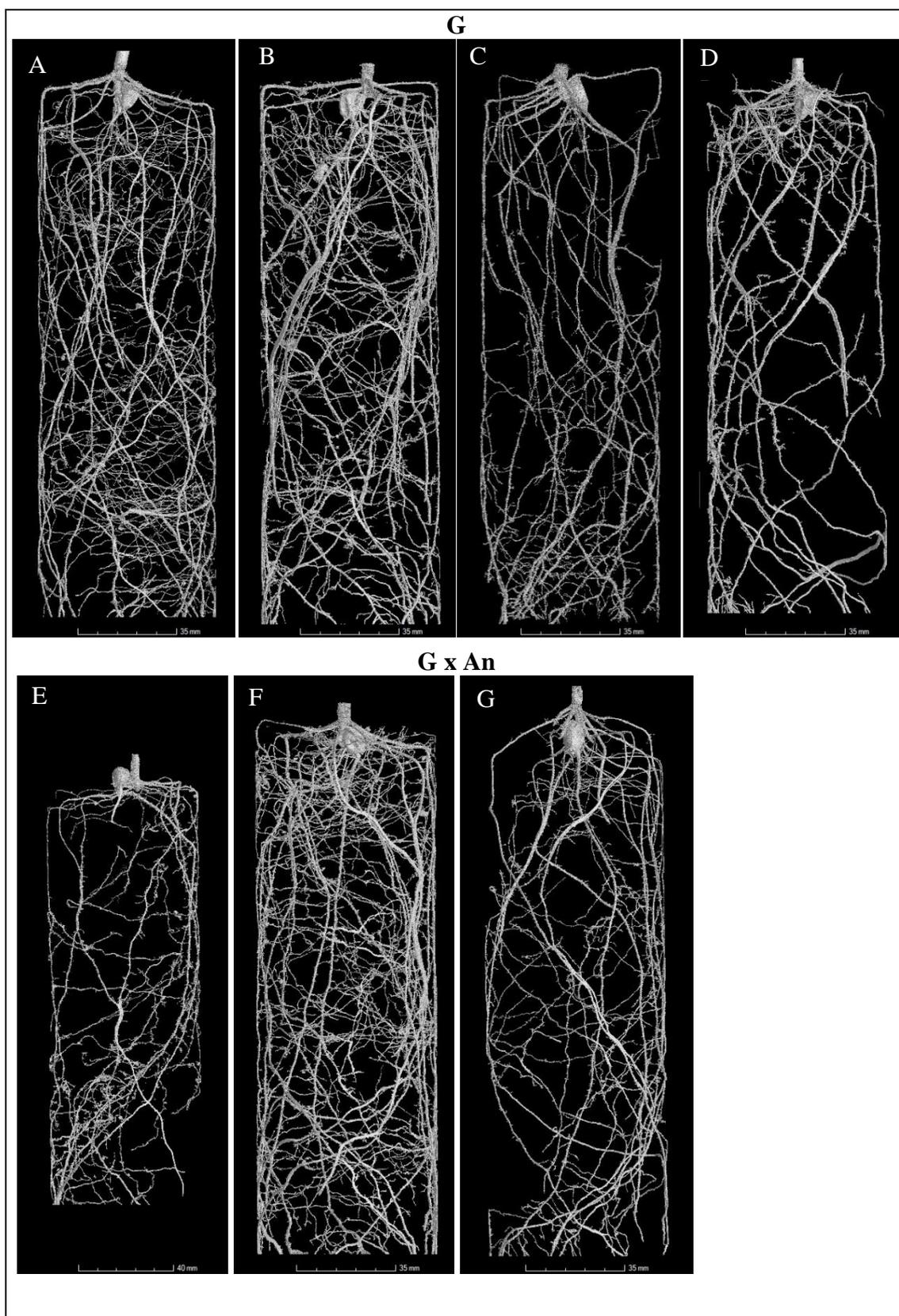


Figura 2 Imagens de raiz de plantas de milho sob tratamento gesso (G) e gesso + *Ascophyllum nodosum* (G x An) aos 14 dias após a germinação (estádio V2) obtidas por tomografia computadorizada de Raio X 3D. Nottingham, 2019.

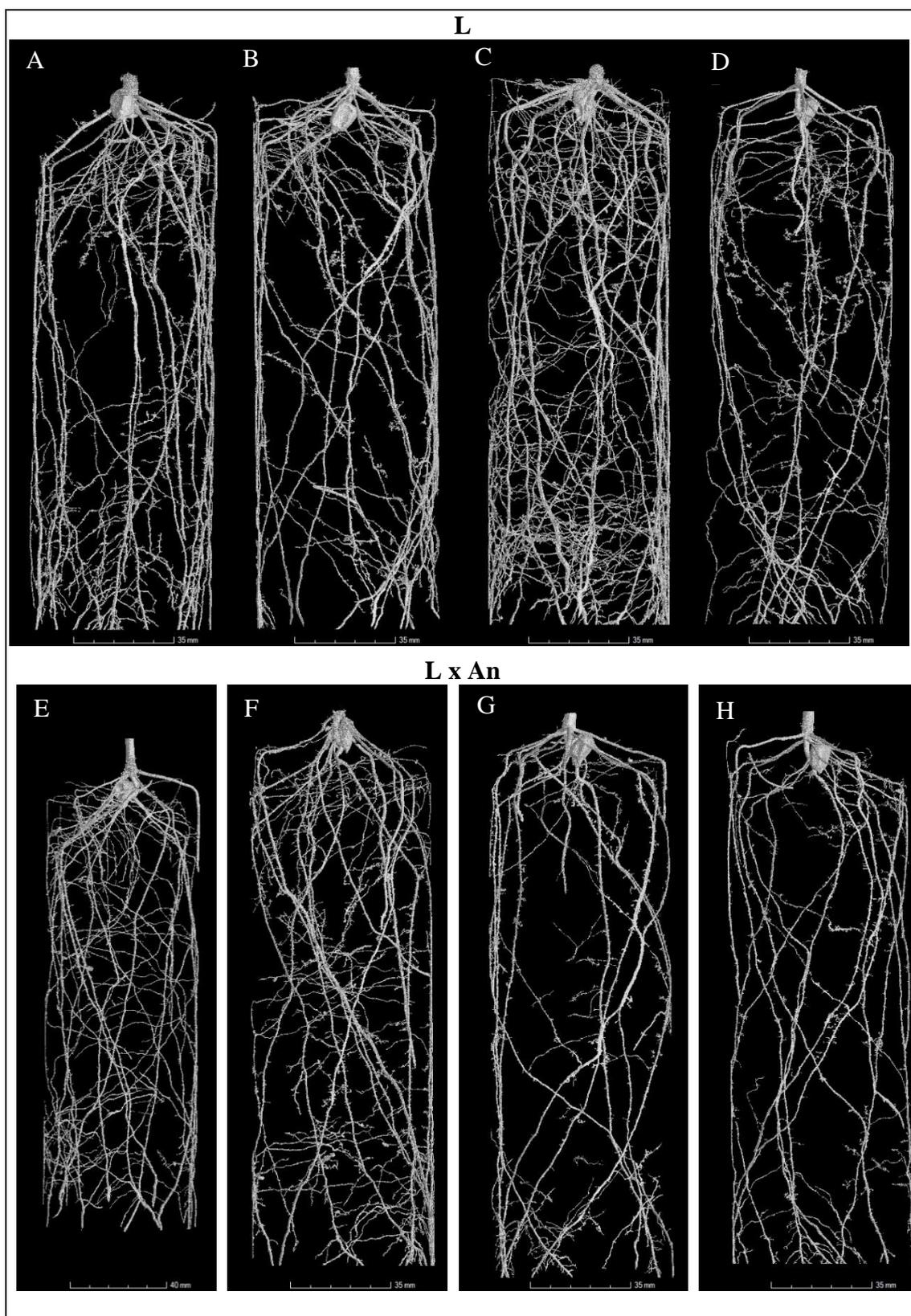


Figura 3 Imagens de raiz de plantas de milho sob tratamento calcário (L) e o calcário + *Ascophyllum nodosum* (L x An) aos 14 dias após a germinação (estádio V2) obtidas por tomografia computadorizada de Raio X 3D. Nottingham, 2019.

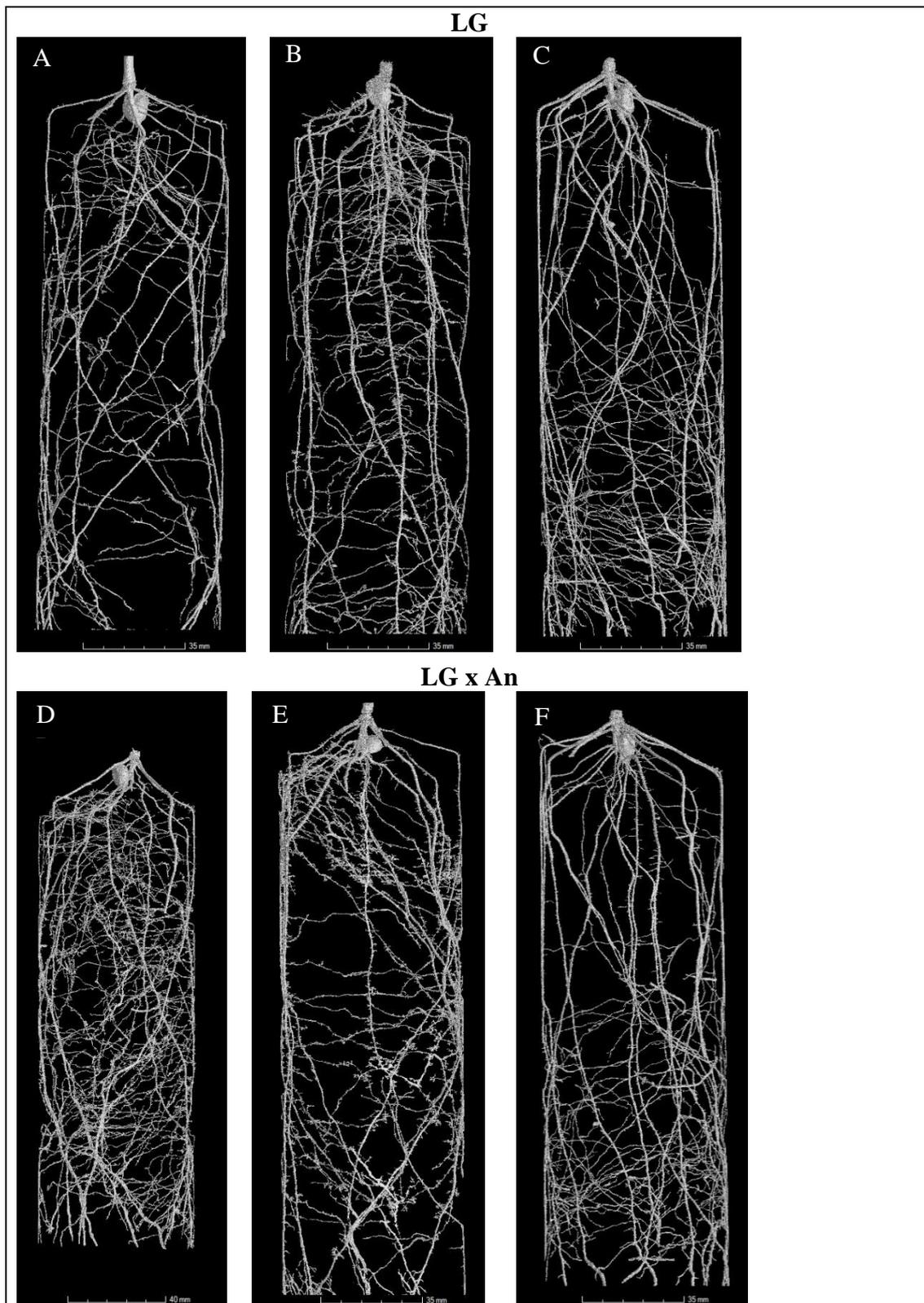


Figura 4 Imagens de raiz de plantas de milho sob tratamento calcário + gesso (LG) e o calcário + gesso + *Ascophyllum nodosum* (LG x An) aos 14 dias após a germinação (estádio V2) obtidas por tomografia computadorizada de Raio X 3D. Nottingham, 2019.

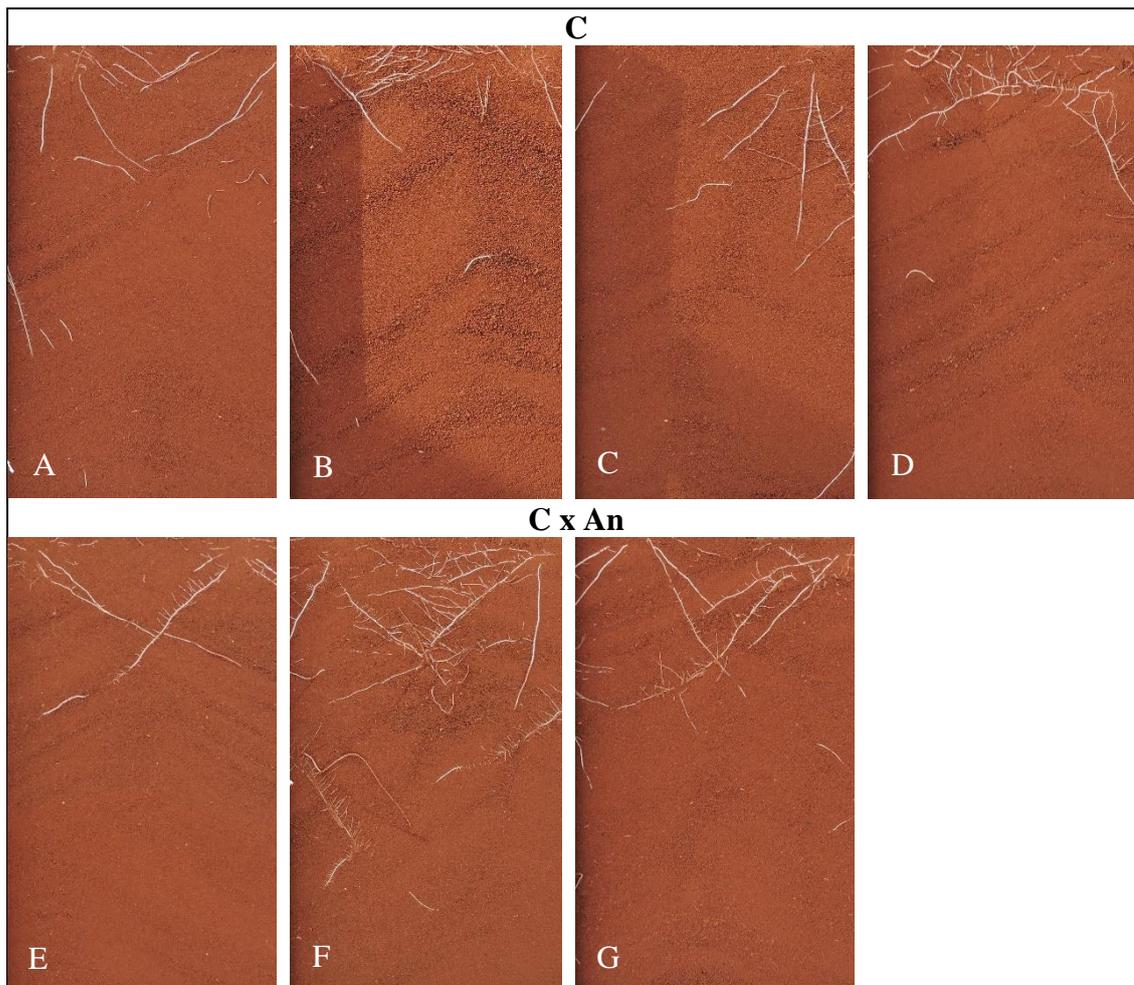


Figura 5 Imagens de rhizotron com raiz de plantas de milho sob tratamento controle (C) e controle + *Ascophyllum nodosum* (C x An) aos 14 dias após a germinação (estádio V2). Rio Verde, 2019.

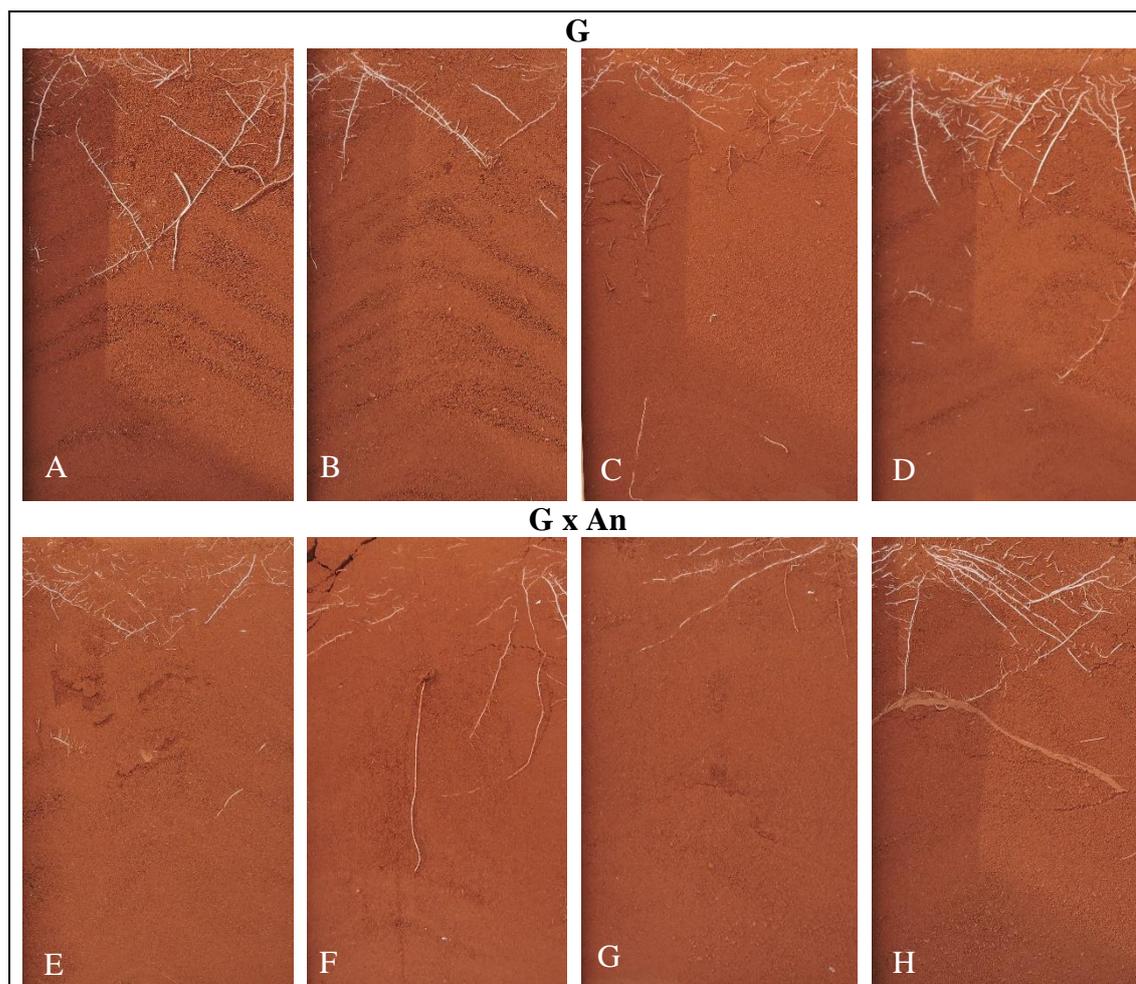


Figura 6 Imagens de rhizotron com raiz de plantas de milho sob tratamento gesso (G) e gesso + *Ascophyllum nodosum* (G x An) aos 14 dias após a germinação (estádio V2). Rio Verde, 2019.

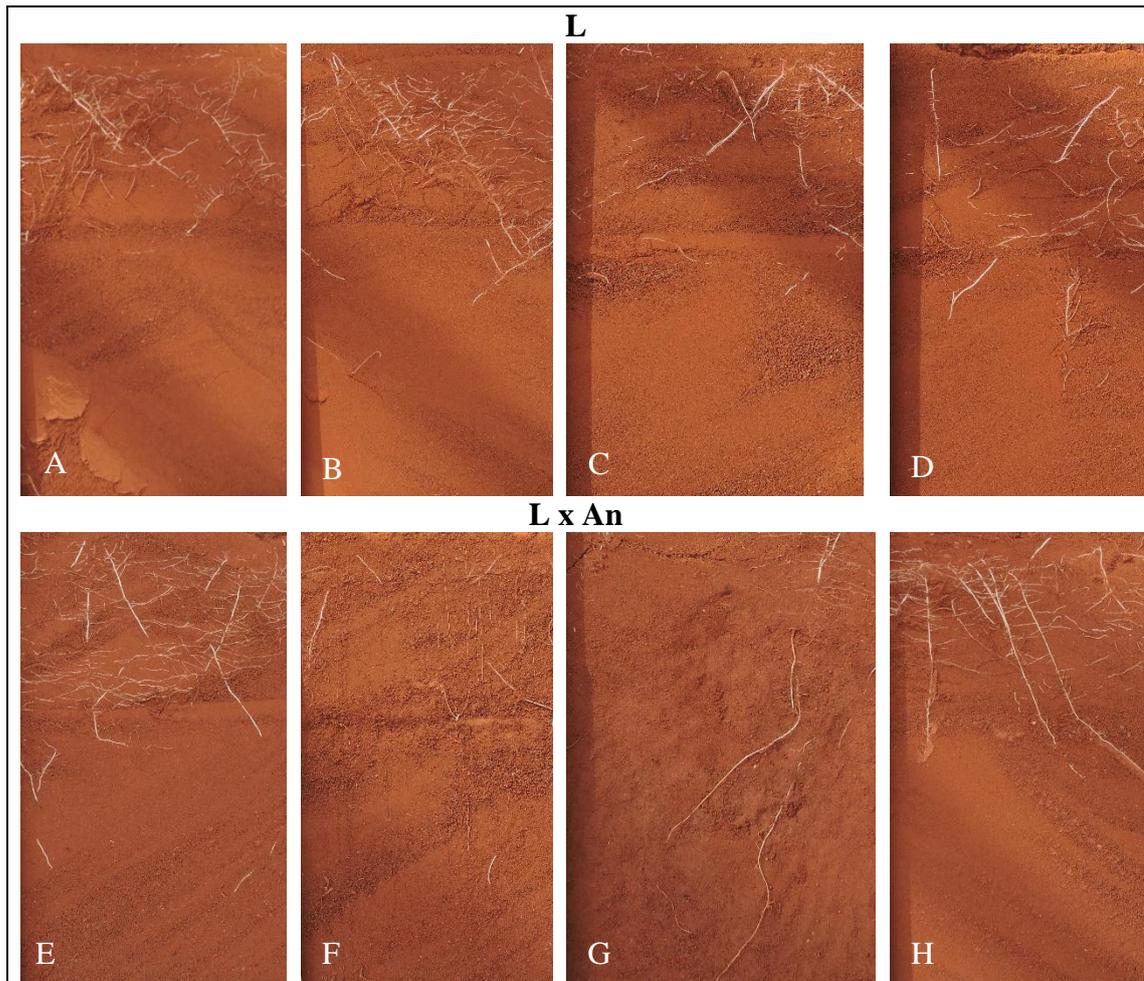


Figura 7 Imagens de rhizotron com raiz de plantas de milho sob tratamento calcário (L) e calcário + *Ascophyllum nodosum* (L x An) aos 14 dias após a germinação (estádio V2). Rio Verde, 2019.

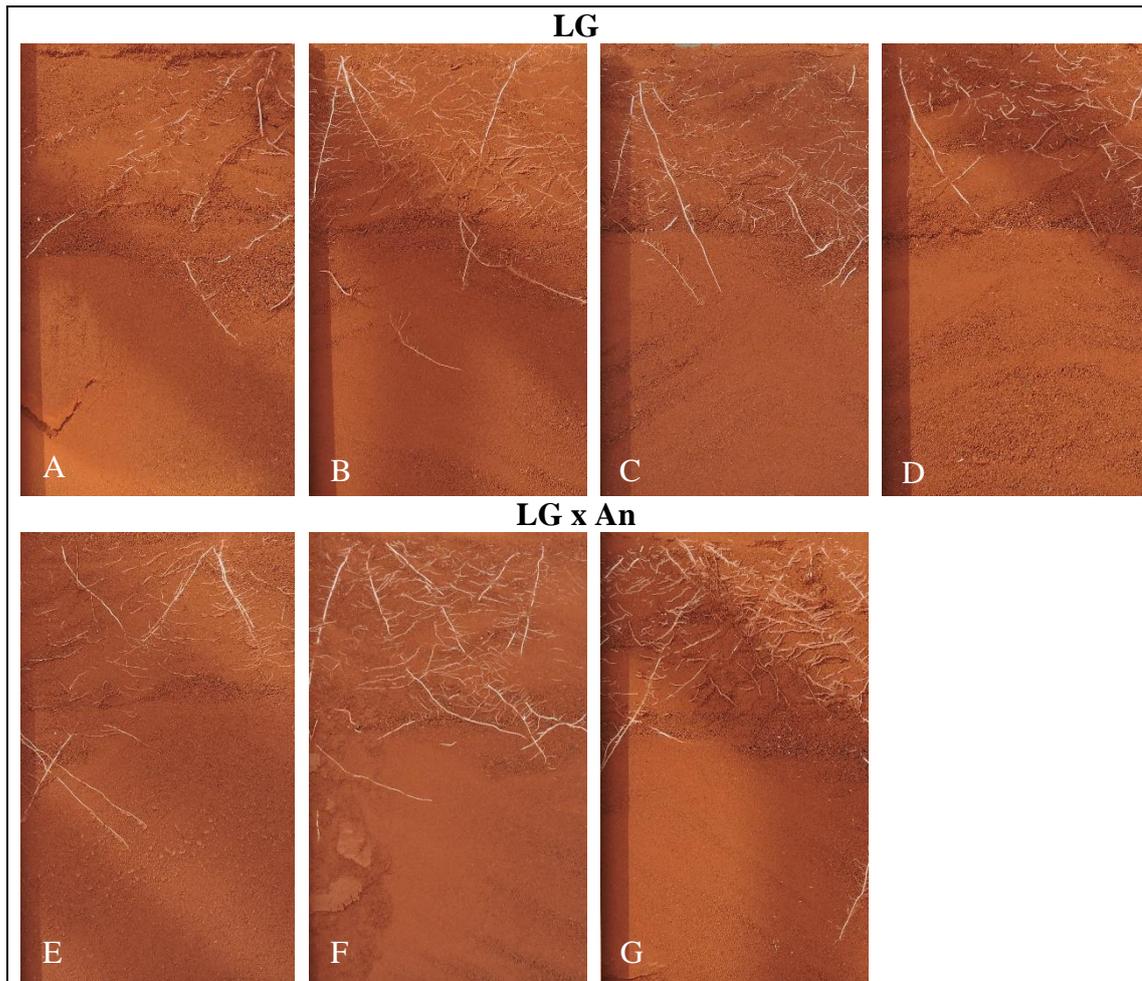


Figura 8 Imagens de rhizotron com raiz de plantas de milho sob tratamento calcário + gesso (LG) e calcário + gesso + *Ascophyllum nodosum* (LG x An) aos 14 dias após a germinação (estádio V2). Rio Verde, 2019.