



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

**TOLERÂNCIA À SECA E RESPONSABILIDADE À IRRIGAÇÃO EM
GENÓTIPOS ELITES DE QUINOA NO CERRADO**

PATRICIA CARVALHO DA SILVA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM AGRONOMIA

**BRASÍLIA/DF
FEVEREIRO/2019**



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

**TOLERÂNCIA À SECA E RESPONSABILIDADE À IRRIGAÇÃO EM
GENÓTIPOS ELITES DE QUINOA NO CERRADO**

PATRICIA CARVALHO DA SILVA

ORIENTADORA: MARIA LUCRÉCIA GEROSA RAMOS
COORIENTADOR: WALTER QUADROS RIBEIRO JÚNIOR

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM AGRONOMIA

BRASÍLIA/DF
FEVEREIRO/2019



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

**TOLERÂNCIA À SECA E RESPONSABILIDADE À IRRIGAÇÃO
EM GENÓTIPOS ELITES DE QUINOA NO CERRADO**

PATRICIA CARVALHO DA SILVA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS À OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE/DOCTOR EM AGRONOMIA.

APROVADA POR:

MARIA LUCRECIA GEROSA RAMOS, PhD/FAV-UnB/ (Orientadora) email-lucreciaunb@gmail.com

MARCELO FAGIOLI, Dr. /FAV – UnB/ (Membro interno) e-mail: mfagioli@unb.br

CHRISTINA VINSON, Dra. /CAPES (membro externo)

BRASÍLIA/DF, 28 de Fevereiro de 2019

FICHA CATALOGRÁFICA

Silva, Patricia Carvalho

Tolerância à seca e responsividade à irrigação em genótipos elites de quinoa no Cerrado. /Patricia Silva; orientação: Maria Lucrecia Gerosa Ramos. – Brasília, 2019.

126 p. : il.

Dissertação de Mestrado (M) – Universidade de Brasília/Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, 2019.

1. *Quenopodium quinoa* 2. Alimento funcional 3. Irrigação em gradiente decrescente I. Ramos, M.L.G. II. D.Sc.

CDD ou CDU
Agris / FAO

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SILVA, P. C. **Tolerância à seca e responsividade à irrigação em genótipos elites de quinoa no Cerrado**. Brasília: Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, 2018, 126 p. Dissertação de Mestrado.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: PATRICIA CARVALHO DA SILVA

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Tolerância à seca e responsividade à irrigação em genótipos elites de quinoa no Cerrado.

GRAU: Mestre

ANO: 2019

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado para única e exclusivamente propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva para si os outros direitos autorais, de publicação. Nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor. Citações são estimuladas, desde que citada à fonte.

Nome: PATRICIA CARVALHO DA SILVA

CPF: 052.451.565-47

Endereço. SH CONTAGEM, COND. RESID. MANSÕES SOBRADINHO II, SOBRADINHO -DF, BRASIL

Tel. (61) 99980-7721

Email: patriciacarvalhoagro@gmail.com.com

Dedico este trabalho à minha mãe Maria Jaci da Silva e ao meu pai Edmar Carvalho da Silva (in memoriam), pelo amor incondicional e confiança, pois sempre me estimularam a estudar, mostrando uma satisfação imensa em me ver progredindo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus, por me dar sabedoria, coragem, discernimento, perseverança e fé para conseguir concluir mais esse objetivo de vida. Agradeço ainda por me permitir vivenciar tantas vitórias, conquistas, e obter sucesso nessa jornada.

À minha família pela confiança, incentivo e carinho durante toda essa caminhada.

Ao Programa de Pós-graduação em Agronomia– UNB, pela oportunidade de realização do curso de mestrado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), pela concessão da bolsa de estudo.

À Embrapa Cerrados, pela disponibilização da estrutura para realização do projeto.

À Professora e orientadora Dra. Maria Lucrécia Gerosa Ramos e ao pesquisador e coorientador Dr. Walter Quadros Ribeiro Júnior, pela amizade, apoio, confiança e orientação durante todo o curso.

À pesquisadora Dra. Sonia Maria Costa Celestino pela orientação e pelo auxílio na realização de análises.

À Dra Cristiane Andréa de Lima Guimarães pelo carinho, orientação, apoio e auxílio durante a condução do experimento.

Aos colegas de Pós- Graduação Alberto Silva Nascimento, Daiane Soares, Guilherme Filgueiras e Lucas Felisberto pelo apoio, amizade e parceria no desenvolvimento deste projeto.

Aos funcionários da Embrapa Cerrados, Alberto, Daniela e Zé Reis pelo apoio e dedicação durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus amigos Ericka Paloma, Jenilton Gomes, Jóisman Fachini, Marco Aurélio, Wesley Souza, Roni Ferreira e Welton Rodrigues pela amizade incondicional, apoio, ajuda e confiança.

Enfim, a todos que contribuíram de forma direta ou indireta para a realização deste trabalho.

RESUMO GERAL

A demanda mundial por alimentos tem aumentado ao longo dos anos devido ao crescimento populacional que neste século estima-se que atingirá 9,2 bilhões de pessoas. Aumentou, também, o interesse da sociedade contemporânea em consumir alimentos mais saudáveis, com propriedades funcionais como a quinoa, que é considerada uma das culturas mais tolerantes à seca, salinidade, pragas e doenças. Nas regiões com ocorrência de períodos de déficit hídrico acentuado torna-se necessário o plantio de culturas mais tolerantes à seca. Diante disso, este trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho de diferentes genótipos de quinoa cultivados sob regimes hídricos variáveis, no Cerrado. O experimento foi conduzido em uma área experimental da Embrapa Cerrados - Planaltina DF. O delineamento experimental foi em blocos casualizados, com 4 repetições, em parcelas subdivididas, sendo a parcela principal os genótipos de quinoa e a sub-parcela os níveis de água. As parcelas foram compostas por 18 genótipos de quinoa e a cultivar BRS Piabiru precoce; as sub-parcelas foram compostas por quatro regimes hídricos (RH) 150, 247, 389 e 480 mm. Para a aplicação dos diferentes níveis de água foi utilizado o sistema denominado *line source sprinkler system* modificado. Os genótipos e a cultivar foram avaliados quanto às respostas agrônômica (produtividade e eficiência do uso da água (EUA)), morfológica (altura de plantas) e funcional (polifenóis, flavonóides e antocianinas). As características fisiológicas (conteúdo relativo de água, rendimento quântico efetivo do fotossistema II, prolina, índice de clorofilas e trocas gasosas (taxa fotossintética, carbono interno, condutância estomática e transpiração) e a massa seca de mil grãos foram avaliadas em quatro dos genótipos (CPAC 4, CPAC 11, CPAC19 e Piabiru). Os genótipos CPAC 3, CPAC 6, CPAC 12, CPAC 13 e CPAC 17 mostraram alto potencial produtivo e EUA. Os RHs 483, 433 e 376 mm, como eram de se esperar, promoveram maior produtividade. O CPAC 11 apresentou a menor altura de plantas. Os RHs influenciaram a altura de plantas até o RH de 389 mm. O genótipo CPAC 19 e a Piabiru apresentaram maior g_s e A . A relação $F'v/F'm$ foi pouco responsiva ao aumento da irrigação. Os maiores índices de clorofila a foram obtidos no CPAC 19 e na Piabiru. As plantas do RH 480 e 389 mm apresentaram alto CRA na folha, os demais RHs apresentaram plantas com início de murchamento. O maior acúmulo de prolina foi no CPAC 19 e no RH 150 mm. O regime hídrico com estresse moderado (376 mm) de modo geral pode ser indicado como o mais adequado para o cultivo de quinoa sob irrigação no Cerrado. Os genótipos que se destacaram tanto em produtividade quanto em EUA foram o CPAC 6 e o CPAC 13. O CPAC 9 apresentou o maior acúmulo de flavonóides e antocianinas em todos os RHs estudados. O CPAC 19 apresentou a maior condutância estomática, taxa fotossintética e conteúdo de prolina, no entanto, o CPAC 11 juntamente com a Piabiru foram os que apresentaram a maior massa de 1000 grãos.

Palavras chaves: *Chenopodium quinoa* Willd., Alimento funcional, Irrigação em gradiente decrescente.

ABSTRACT

Global demand for food has increased over the years due to population growth which in this century is estimated to reach 9.2 billion people. It also increased the interest of contemporary society to consume healthier foods with functional properties such as quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.), which is considered one of the most tolerant crops to drought, salinity, pests and diseases. In regions with periods of severe water deficit, it is necessary to plant crops that are more drought tolerant. Therefore, this study aims to evaluate the performance of different genotypes of quinoa grown under variable water regimes in the Cerrado. The experiment was conducted in an experimental area of Embrapa Cerrados - Planaltina DF. The experimental design was in randomized blocks, with 4 replications, in subdivided plots, the main plot being the quinoa genotypes and the subplot water levels. The genotypes and the cultivar were evaluated for agronomic (productivity and efficiency of water use (WUE)), morphological (plant height) and functional (polyphenols, flavonoids and anthocyanins) responses. The physiological characteristics (relative water content, effective quantum yield of photosystem II, proline, chlorophyll index and gaseous exchange (photosynthetic rate, internal carbon, stomatal conductance and transpiration) and dry mass of one thousand grains were evaluated in four genotypes (CPAC 4, CPAC 11, CPAC19 e Piabiru). The genotypes CPAC 3, CPAC 6, CPAC 12, CPAC 13 and CPAC 17 showed high production potential and WUE. The RH 483, 433 and 376 mm, as expected, promoted higher productivity. CPAC 11 showed the lowest plant height. RHs influenced plant height up to 389 mm RH. The genotype CPAC 19 and Piabiru showed higher g_s and A . The relation F_v / F_m was little responsive to the increase of irrigation. The highest indexes of chlorophyll a were obtained in CPAC 19 and Piabiru. The plants of RH 480 and 389 mm presented high CRA in the leaf, the other RHs presented plants with beginning of wilting. The greatest accumulation of proline was in CPAC 19 and in RH 150 mm. The water regime with moderate stress (376 mm) can be indicated as the most suitable for the cultivation of quinoa under irrigation in the Cerrado. The genotypes that stood out in both productivity and in the WUE were CPAC 6 and CPAC 13. CPAC 9 presented the highest accumulation of flavonoids and anthocyanins in all the studied RHs. CPAC 19 showed the highest stomatal conductance, photosynthetic rate and proline content; however, CPAC 11 together with Piabiru were the ones with the highest mass of 1000 grains.

Key words: *Chenopodium quinoa*, Functional food, Irrigation in decreasing gradient.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Deposição de oxalato de cálcio nas folhas superiores (a) e inflorescência da Quinoa (b). Fruto no ponto de colheita (c) e semente da quinoa (d).....	23
Figura 2. Visão geral da área experimental com irrigações em gradiente, por meio de imagem com drone.....	62
Figura 3. Precipitação pluviométrica e temperaturas máximas e mínimas ocorridas na área experimental nos meses de maio a setembro de 2017.....	63
Figura 4. Altura média de dezenove genótipos de quinoa, independente dos regimes hídricos.....	75
Figura 5. Altura média de plantas de quinoa em quatro regimes, independente dos genótipos.....	76
Figura 6. Visão geral da área experimental com irrigações em gradiente, por meio de imagem com drone.....	98
Figura 7. Precipitação pluviométrica e temperaturas máximas e mínimas ocorridas na área experimental nos meses de maio a setembro de 2017.....	99
Figura 8. Curva de taxa de assimilação líquida de carbono em resposta à densidade de fluxo de fótons fotossinteticamente ativos para a quinoa.....	103
Figura 9. Efeitos dos regimes hídricos (150, 247, 389 e 480 mm) no rendimento quântico efetivo do fotossistema II (F'_v / F'_m) em genótipos de quinoa.....	109
Figura 10. Efeitos dos regimes hídricos (150, 247, 389 e 480 mm) Conteúdo Relativo de Água (CRA) em genótipos de quinoa.....	112
Figura 11. Efeitos dos regimes hídricos 150, 247, 389 e 480 mm na massa seca de 1000 grãos (M1000) (a) em genótipos de quinoa.....	115

Figura 12. Massa seca de 1000 grãos (M1000) em quatro genótipos (CPAC 4, CPAC 11, CPAC 19 e Piabiru).....116

LISTA DE TABELA

Tabela 1. Descritores morfológicos.....	93
Tabela 2. Resumo da análise de variância com valores de F e coeficiente de variação para produtividade (Prod), eficiência do uso da água (EUA), altura, polifenóis (Poli), flavonóides (Flav) e antocianinas (Ant) em genótipos de quinoa em função dos regimes hídricos.....	67
Tabela 3. Produtividade ($t\ ha^{-1}$) de dezenove genótipos de quinoa sob sete regimes hídricos (128, 160, 218, 309, 376, 433 e 483 mm).....	69
Tabela 4. Eficiência agrônômica do uso de água aplicada ($kg\ ha^{-1}\ mm^{-1}$) de dezenove genótipos de quinoa sob sete regimes hídricos (128, 160, 218, 309, 376, 433 e 483 mm).....	75
Tabela 5. Teores de polifenóis totais (mg/100 g) nos grãos de dezenove genótipos de quinoa sob quatro regimes hídricos (150, 247, 389 e 480 mm).....	80
Tabela 6. Teores de flavonóides totais (mg/100 g) nos grãos de dezenove genótipos de quinoa sob quatro regimes hídricos (150, 247, 389 e 480 mm).....	83
Tabela 7. Teores de antocianinas totais (mg/100 g) nos grãos de dezenove genótipos de quinoa sob quatro regimes hídricos (150, 247, 389 e 480 mm).....	85
Tabela 8. Resumo da análise de variância com valores de F e coeficiente de variação para concentração interna de Carbono (C_i), transpiração (E), condutância estomática (g_s), fotossíntese (A), rendimento quântico efetivo do fotossistema II ($F'v/F'm$) e conteúdo relativo de água (CRA) de genótipos de quinoa em função dos regimes hídricos.....	106
Tabela 9. Condutância estomática ($g_s - mol\ m^{-2}\ s^{-1}$) e taxa de transpiração ($E - mmol\ m^{-2}\ s^{-1}$) de quatro genótipos de quinoa (CPAC 4, CPAC 9, CPAC 11 e Piabiru), sob quatro regimes hídricos (150, 247, 389, 480 mm).....	107

Tabela 10. Carbono interno (C_i - $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e taxa fotossintética (A - $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) de quatro genótipos de quinoa (CPAC 4, CPAC 9, CPAC 11 e Piabiru), em quatro regimes hídricos (150, 247, 389, 480 mm).....111

Tabela 11 - Resumo da análise de variância com valores de F e coeficiente de variação para clorofila a , b , a/b e $a+b$, prolina e massa de mil grãos de genótipos de quinoa em função dos regimes hídricos.....116

Tabela 12. Clorofila a , b , a/b e $a+b$ realizados em quatro genótipos de quinoa, independente dos regimes hídricos (150, 247, 389, 480 mm).....117

Tabela 13. Conteúdo médio de prolina ($\mu \text{mol g}^{-1}$ MF) de quatro genótipos de quinoa (CPAC 4, CPAC 9, CPAC 11 e Piabiru), em quatro regimes hídricos (150, 247, 389, 480 mm).....119

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
1.1 Objetivo geral.....	14
1.2 Objetivos específicos	15
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	16
2.1 Bioma Cerrado.....	16
2.2 Aspectos gerais da cultura da quinoa.....	20
2.3 Descrição botânica da planta.....	22
2.4 Consumo e eficiência do uso de água pelas plantas.....	25
2.5 Necessidade hídrica da cultura.....	27
2.6 Influência do déficit hídrico sobre a morfologia e fisiologia das plantas.....	29
2.7 Efeitos do estresse hídrico nas variáveis fisiológicas.....	32
2.7.1 Clorofilas.....	32
2.7.2 Prolina.....	33
2.8 Qualidade funcional dos grãos.....	35
2.9 Melhoramento genético para tolerância à seca.....	39
2.10 Referências bibliográficas.....	42
3. CAPÍTULO I - CARACTERÍSTICAS AGRONÔMICAS E QUALIDADE DE GRÃOS DE GENÓTIPOS ELITES DE QUINOA SUBMETIDOS À REGIMES HÍDRICOS VARIÁVEIS.....	57
RESUMO.....	57
ABSTRACT.....	58
3.1 INTRODUÇÃO	59
3.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	61
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	66
3.4 CONCLUSÕES.....	86
3.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	87
APÊNDICE.....	93
4. CAPÍTULO II - ALTERAÇÕES FISIOLÓGICAS DE GENÓTIPOS ELITES DE QUINOA SUBMETIDOS À REGIMES HÍDRICOS VARIÁVEIS.....	94
RESUMO.....	94
ABSTRACT.....	95

4.1 INTRODUÇÃO.....	96
4.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	98
4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	105
4.4 CONCLUSÕES.....	123
4.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	123

1. INTRODUÇÃO

A demanda mundial por alimentos tem aumentado ao longo dos anos e estimativas da Organização das Nações Unidas (ONU) indicam que para 2050 a demanda global pode sofrer um aumento de 60% em relação ao ano de 2015, devido ao crescimento populacional, que neste século estima-se chegar a 9,2 bilhões de pessoas. Entretanto, esse aumento só será sustentável se, para tal, a agricultura não ultrapassar a expansão das áreas de cultivo para além dos cerca de 20% considerada sustentável (MUTEIA, 2015).

Para superar as dificuldades advindas do crescimento populacional e das estimativas da demanda mundial por alimentos, o setor agrícola busca adotar tecnologias inovadoras e conservacionistas, além da otimização no uso dos recursos hídricos e a seleção de cultivares mais tolerantes à seca e mais eficientes no uso de água (ZHANG et al., 2016). Além do mais, é necessário que se adote sistemas de produção mais diversificados capazes de produzir em quantidade e qualidade, a fim de satisfazer a demanda populacional por alimentos.

Diversos estudos mostram a relação direta entre dieta e saúde, somados à crescente busca da sociedade contemporânea em consumir alimentos mais saudáveis, assim como o interesse da comunidade científica e da população em geral pelos alimentos funcionais (ABREU et al., 2007). A partir desta crescente procura por alimentos com propriedades funcionais, surgiu um interesse considerável na utilização de culturas alternativas, como a quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) (BERTI et al., 2005) que tem como principal característica a qualidade de sua proteína (SILVA et al., 2011), além de apresentar teores elevados de compostos fenólicos, como os flavonóides e os polifenóis, que estão associados à prevenção de doenças humanas.

A quinoa é considerada uma das culturas mais tolerantes à seca, além de apresentar tolerância a solos salinos, doenças e pragas, (JACOBSEN; MUJICA, 2001; MUJICA et al., 2001). A quinoa é um pseudocereal, originário dos Andes (TAPIA, 2013), com bom

desenvolvimento em condições de limitações ambientais e apresenta estratégias de adaptação ao déficit hídrico, tanto fisiológicas quanto morfológicas (SILVA et al., 2014). Apesar de a quinoa apresentar boa resistência ao déficit hídrico, o fornecimento de água em quantidade ideal poderá favorecer o desempenho máximo de suas funções fisiológicas, o que pode proporcionar uma maior produtividade (GEERTS et al., 2008; GARCÍA; JACOB 2003), pois a água é um dos fatores mais indispensáveis para a produção agrícola e a falta ou excesso afeta de forma significativa o rendimento das culturas (SILVA et al., 2011).

Nas regiões com ocorrência de períodos de déficit hídrico acentuado torna-se necessário o plantio de culturas mais tolerantes à seca (IANMAN-BAMBER; MITH, 2005), pois o déficit hídrico pode ocasionar problemas ao desenvolvimento e à produtividade de várias culturas agrícolas (MACHADO et al., 2009; PIMENTEL, 2004), além de perda na qualidade do produto final.

Desta forma, pesquisas que associem respostas morfofisiológicas, produtividade e qualidade dos grãos à aplicação variável de lâminas de irrigação são considerados primordiais para avaliar a tolerância das plantas aos diferentes regimes hídricos e a implantação de projetos de irrigação que permitam maior eficiência do uso da água.

Com base no exposto, é evidente a necessidade de pesquisas relacionadas à resposta de genótipos de quinoa aos diferentes regimes hídricos para se conhecer possíveis mecanismos de tolerância à seca, a variabilidade de genótipos de quinoa sob estresse hídrico, a necessidade hídrica da quinoa e o efeito do déficit na produtividade e qualidade funcional dos grãos, para promover o desenvolvimento de cultivares adaptadas ao Cerrado do Planalto Central.

1.1 Objetivo geral

Avaliar o desempenho e qualidade funcional de diferentes genótipos de quinoa cultivados sob regimes hídricos variáveis, no Cerrado do Planalto Central.

1.2 Objetivos específicos

(a) Avaliar o desempenho morfológico, agronômico e a qualidade funcional dos genótipos de quinoa sob os regimes hídricos variáveis.

(b) Avaliar as alterações fisiológicas de genótipos de quinoa sob os regimes hídricos variáveis.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Bioma Cerrado

A região dos Cerrados abriga o segundo maior bioma brasileiro, com 204 milhões de hectares, abrangendo aproximadamente 25% do território brasileiro. A maior área do Cerrado está localizada no Brasil Central e possui grande destaque no cenário agrícola nacional e mundial, sendo ao mesmo tempo uma importante reserva da biodiversidade e potencial produtora de alimentos (SANO et al., 2009).

Esse bioma por apresentar acentuada biodiversidade é considerado um dos 34 *hotspots* mundiais (BUSTAMANTE et al., 2012). É a segunda maior formação vegetal brasileira e a savana tropical mais rica do mundo em biodiversidade (FALEIRO et al., 2008). Foram registradas mais de 10 mil espécies de plantas, 159 espécies de mamíferos, 837 de aves, 180 de répteis, 150 de anfíbios, 1200 de peixes, 67 mil espécies de invertebrados, e cerca de mil gêneros de fungos (AQUINO; OLIVEIRA, 2006; EMBRAPA, 2009). Além disso, o bioma Cerrado é o centro de origem das nascentes de seis grandes bacias hidrográficas brasileiras: Amazônica, Tocantins-Araguaia, Atlântico Norte-Nordeste, São Francisco, Atlântico-Leste e Paraná-Paraguai (LIMA; SILVA, 2007).

Os Latossolos predominam nessa região e compreendem aproximadamente 40% dos solos do Cerrado (REATTO et al., 2007). Os Latossolos são intemperizados e profundos, possuem boas condições físicas devido ao seu enriquecimento por óxidos de ferro e alumínio, que dão aspecto maciço e poroso ao solo, favorecendo a mecanização (RESENDE et al., 2007). Além disso, são caracterizados como solos com baixa disponibilidade de fósforo (P) disponível, e alta retenção desse elemento, tornando-se fundamental o uso de fertilizantes fosfatados para a produção agrícola (SOUSA et al., 2010).

A contribuição do Cerrado para o desenvolvimento do agronegócio brasileiro é de grande relevância, pois este representa uma das maiores fronteiras agrícolas do mundo. Os benefícios provenientes da ocupação agrícola do Cerrado são incontestáveis, mas para que os sistemas produtivos sejam estabelecidos de forma sustentável, é necessário o conhecimento desse bioma para que se obtenha o máximo de benefícios com o mínimo de impactos negativos nas áreas de produção estabelecidas (SANO et al., 2008).

2.2 Aspectos gerais da cultura da quinoa

A quinoa pertence à família Amaranthaceae, (MUJICA-SANCHEZ et al. 2001; GEWEHR et al. 2012), é originária dos Andes, onde tem sido cultivada há milênios (MUJICA-SANCHEZ et al., 2001). É uma cultura que foi utilizada pelos Incas, e é explorada atualmente na alimentação animal e humana (ALMEIDA et al., 2009). Distribuída por diferentes regiões do mundo, mesmo sendo endêmica da região andina, a quinoa possui características que lhe permitem adaptar-se a diversas condições ambientais (WAHLI, 1990).

Apesar de suas características de cereal, mas por não pertencer à família Poaceae e por seus aspectos botânicos, como a presença de inflorescência tipo panícula e excepcional balanço nutricional entre proteína e lipídios, a quinoa é considerada um “pseudocereal” e, até mesmo, uma “pseudossemente” oleaginosa (VEGA-GÁLVEZ et al., 2010). Suas partes comestíveis envolvem as folhas e os grãos, sendo estes últimos os mais explorados econômica e cientificamente (SPEHAR, 2006).

A quinoa tem sido cultivada principalmente na Argentina, Bolívia, Chile, Colômbia, Equador e Peru, locais que coincidem na maioria com os limites do Império Inca (BRADY et al., 2007). Seu maior produtor mundial é o Peru com 130 mil toneladas, seguido pela Bolívia com 92 mil toneladas e pelo Equador com 16 mil toneladas. Possui alto valor econômico e a

tonelada do grão é comercializada a U\$ 4,500 (QUISPE, 2015). Altos rendimentos de grãos já foram registrados no Quênia (4 t ha^{-1}), assim como no Himalaia e nas planícies do norte da Índia (FAO, 2013). A Bolívia e o Peru destacam-se como os principais exportadores de quinoa, sendo responsáveis por 88% da produção mundial (RUIZ et al., 2014), de 1980 a 2011 aumentou em cerca de 300%. Outros países desenvolvem atualmente ensaios de campo com vista a melhorar a produção e produtividade desta cultura (RUIZ et al., 2014).

No Brasil, desde 1990 são realizadas pesquisas pela Embrapa Cerrados para adaptação desse grão ao cultivo no país. De maneira que, após várias experiências e seleções, surgiu a primeira variedade BRS Piabiru (SPEHAR; SOUZA; 1993; SPEHAR; SANTOS, 2002), para cultivo granífero no Brasil adaptada às condições dos Cerrados, com excelentes rendimentos agrônômicos. Essa variedade foi originada da linhagem EC 3, selecionada a partir de uma população procedente de Quito, Equador (SPEHAR; SANTOS, 2002).

Seu grão possui proteína de qualidade, que atende às necessidades básicas em aminoácidos essenciais, no balanceamento proteico de alimentos e ração animal (SPEAHR et al., 2011). Ademais, atende, também, à crescente demanda por alimentos equilibrados e funcionais, relacionada à busca de alternativas dietéticas, como a ausência de glúten. Com estas propriedades, a quinoa tem sido demandada mundialmente, o que tem levado à expansão de seu cultivo, inclusive como alternativa aos cultivos (SPEAHR et al., 2011).

Este pseudocereal é utilizado como suplemento alimentar, pois contém maiores teores de proteína total, metionina e lisina, em comparação com os cereais tradicionais, como arroz, milho, cevada e trigo; além disso, possui em sua composição lipídica ácidos graxos semelhantes àqueles do óleo de soja (SPEHAR, 2007; VEGA-GÁLVEZ et al., 2010). Os grãos possuem quantidades significativas de flavonóides e ácidos fenólicos. Os derivados fenólicos são agentes antimicrobianos naturais e apresentam-se como bons antioxidantes, reduzindo a quantidade de radicais livres e quelam metais (GEWEHR et al., 2012). Por sua

vez, os polifenóis são benéficos à saúde, prevenindo enfermidades, como câncer e doenças cardiovasculares (DOGAN; KARWE, 2003)

O ano de 2013 foi eleito pela FAO (Food and Agriculture Organization), como “Ano Internacional da Quinoa”, pelo potencial da espécie em desempenhar importante papel na erradicação da fome, da desnutrição e da pobreza (FAO, 2013). Aliado a esse fato, o mercado de alimentos funcionais tem apresentado elevado crescimento nos últimos anos em função do interesse do consumidor por alimentos capazes de conferir benefícios à saúde (ANNUNZIATA; VECCHIO, 2011).

2.3 Descrição botânica da planta

A quinoa é uma planta dicotiledônea classificada como: família Amaranthaceae, (GEWEHR et al., 2012), sub família Chenopodioideae, subclasse Dicotyledoneae, grupo Thalamiflorae, ordem Caryophyllales, gênero *Chenopodium*, espécie *Chenopodium quinoa* (BHARGAVA; OHRI; SHUKLA, 2005). A espécie é anual e pertencente ao grupo C3 de plantas (JACOBSEN et al., 2003), com ciclo variável entre 80 e 150 dias, nas condições do Brasil Central (SPEHAR et al., 2002). Após 30 dias da semeadura, o seu crescimento é rápido, e as variedades mais tardias atingem cerca de 2,0 m na safrinha (outono), com bom suprimento de umidade no solo.

As folhas são do tipo lanceoladas, grandes na parte inferior e pequenas na parte superior da planta, sendo todas dentadas (Figura 1). As cores das folhas são diversas, devido à presença de betacianinas (BHARGAVA; SHUKLA; OHRI, 2005). A ocorrência e a deposição de oxalato de cálcio nas folhas possibilitam a retenção de umidade, característica desejável para a tolerância à seca (Figura 1) (SPEHAR et al., 2002).

A inflorescência é racêmica (Figura 1), disposta em forma de panícula ao longo do caule, podendo chegar de 15 a 70 cm de comprimento (Figura 1) (GEWEHR et al. 2008). As inflorescências originam-se no topo da planta e nas axilas das folhas inferiores, possuem um eixo principal mais desenvolvido, a partir do qual originam os eixos secundários e, em alguns casos, terciários que podem ser de dois tipos: amarantiforme e glomerular (BHARGAVA 2006; HUNZIKER, 1943). As flores da quinoa são pequenas e podem atingir até 3 mm e apresentam até três tipos de flores: as hermafroditas que estão localizadas na parte distal e correspondem a cinco lóbulos periantais, cinco anteras e um ovário superior com dois ou três estigmas (BHARGAVA 2006; HUNZIKER, 1943). De acordo com estes autores, as flores femininas apresentam apenas pistilo e são localizadas na parte inferior do glomérulo e alguns cultivares apresentam macho estéril em algumas ou todas as flores femininas, neste caso apresenta o pistilo fértil e o estame estéril.



Figura 1. Deposição de oxalato de cálcio nas folhas superiores (a) e inflorescência da quinoa (b). Fruto no ponto de colheita (c) e sementes de quinoa (d).

O fruto é do tipo aquênio, podendo ter forma cônica, cilíndrica ou elipsoidal (MUJICA et al., 2001). É constituído pelo perigônio, que envolve a semente por completo, e contém uma única semente, de coloração variável, com diâmetro de 1,5 a 4,0 mm, que se desprende com facilidade após a maturidade (MUJICA et al., 2001). A semente constitui o fruto maduro sem o perigônio, podendo ter formatos lenticular, elipsoidal, cônico ou esférico (Figuras 01).

O grão, fruto do tipo aquênio, amadurece enquanto a planta seca, o que permite colheita mecanizada. Quando amadurecem, apresentam rápida germinação na presença de umidade (SPEHAR, 2006). O grão apresenta três camadas, sendo elas o perisperma, embrião e endosperma onde ficam armazenados os macronutrientes, o amido é armazenado no perisperma e os lipídios e as proteínas no endosperma e embrião da semente de quinoa (BHARGAVA; OHRI; SHUKLA, 2005).

A cultura da quinoa apresenta doze fases fenológicas facilmente distinguíveis: germinação, duas folhas verdadeiras, quatro folhas verdadeiras, seis folhas verdadeiras, ramificação, início de emissão da panícula, emissão da panícula, prefloração, floração, grão leitoso, grão pastoso e maturação fisiológica (CASAS, 2012). Segundo, Spehar (2006), em relação à BRS Piabiru, observou-se que a diferenciação floral ocorre aproximadamente aos 30 dias após a emergência, e a antese inicia-se aos 45 dias.

2.4 Consumo e eficiência do uso de água pelas plantas

A ONU revela que aproximadamente 70% da água doce disponível no mundo é utilizada para irrigação, no Brasil, esse índice chega a 72%. Diante disso, a obtenção de alternativa para se produzir mais alimentos com menor utilização de água é um dos maiores desafios enfrentados pela humanidade (CHRISTOFIDIS, 2008). No entanto, é possível obter

ótimos resultados de produtividade utilizando menos água com práticas apropriadas de irrigação deficitária (BRITO et al., 2012).

A irrigação deficitária consiste na aplicação de água abaixo dos requisitos necessários para atender plenamente a evapotranspiração máxima das culturas (MARTINS et al., 2016). Em geral, as irrigações são controladas e realizadas em períodos em que a planta é mais sensível aos efeitos do déficit hídrico (KANG, et al., 2002; GEERTS; RAES, 2009). Kanget al., (2002) mostram que esta prática tem se tornado importante nos últimos anos, principalmente em locais onde os recursos hídricos são limitados. Desta forma, o principal objetivo desta prática é o aumento da eficiência do uso de água na cultura e, conseqüentemente, a eliminação de irrigações que não favoreçam incrementos de produtividade (KIRDA, 2002). O manejo da água para a irrigação, em um cenário de escassez, deve ser realizado de forma eficiente, visando a economia de água e maximização da sua produtividade (FERERES; SORIANO, 2007).

O manejo da irrigação é feito em função do tipo e das características do solo, da variedade plantada, do estágio fenológico da cultura e das condições climáticas (SILVA et al., 2012). Além do manejo da irrigação, o momento de aplicar a lâmina de água é de grande importância, depende da fase de crescimento da cultura e das condições meteorológicas e para maximizar a lucratividade dos sistemas de produção irrigados, a quantidade de água a ser aplicada também deve ser baseada na demanda hídrica e no manejo da cultura (SILVA et al., 2012).

A água é necessária como reagente no metabolismo vegetal, transporte e translocação de solutos, na turgescência celular, bem como na abertura e fechamento dos estômatos (LAWLOR, 2002). No solo e em quantidade adequada, essa molécula facilita a penetração do sistema radicular (HUND et al., 2009). Por ser fundamental no metabolismo das plantas, a redução na disponibilidade da água no solo pode afetar a produtividade das culturas, uma vez

que essa molécula é necessária à maioria das funções vitais, reações e rotas metabólicas (CARLESSO; ZIMMERMANN, 2000; TAIZ; ZEIGER, 2010)

A eficiência no uso da água (EUA) relaciona a produção de biomassa ou produção comercial pela quantidade de água aplicada ou evapotranspirada (MACHADO et al., 2010). Dessa forma, plantas mais eficiente no uso da água produzem mais matéria seca por grama de água transpirada (BAPTISTA et al., 2001). O uso mais eficiente da água está diretamente associado ao tempo de abertura estomática, pois, enquanto a planta absorve CO₂ para a fotossíntese, a água é perdida para o ambiente por evapotranspiração, seguindo uma corrente de potenciais hídricos (PEREIRA-NETTO et al., 2002).

Existem vários indicadores de eficiência do uso da água (PEREIRA et al., 2012). Dentre eles, podem-se citar a produtividade da água da cultura, a produtividade econômica da água e a eficiência do uso de nutrientes. A produtividade da água da cultura considera a capacidade conversão da água em biomassa da cultura (DI PAOLO; RINALDI, 2008). Outro indicador de eficiência é a produtividade econômica da água, sendo de grande importância, uma vez que permite mensurar o incremento produtivo e o retorno econômico gerado em função do uso da água no sistema de produção (ARAYA et al., 2011; PEREIRA et al., 2012). A eficiência do uso de nutrientes analisa a capacidade da cultura em absorver nutrientes da solução do solo, com base na água consumida por ela (AMARAL et al., 2011).

A eficiência do uso da água tem sido bastante utilizada na seleção de variedades mais tolerantes ao estresse hídrico (IGBADUN et al., 2006; KO; PICCINNI, 2009). Por outro lado, o seu conhecimento também é de fundamental importância para o manejo da frequência e duração dos intervalos de reposição de água no solo, bem como para análise da viabilidade econômica da utilização de tecnologias de irrigação e de seus efeitos sobre o rendimento das culturas (ALI et al., 2007; KARAM et al., 2007).

A eficiência do uso da água relaciona a produção de biomassa pela quantidade de água aplicada, sendo bastante importante o seu reconhecimento na agricultura irrigada, pois auxilia na otimização do uso da água, além de auxiliar nos problemas de escassez de água provocados pelo aumento da demanda social em relação à oferta ambiental (SILVA et al., 2013). Dentre as técnicas adotadas para aumentar a eficiência do uso da água na agricultura irrigada, a alta frequência da irrigação com baixo volume de água tem se mostrado eficiente (TOPAK et al., 2010).

Segundo Reichardt e Timm (2004) cerca de 98% do volume de água absorvida pela planta passa por ela perdendo-se para a atmosfera, por meio da transpiração. Este fluxo é necessário para uma série de atividades fisiológicas e para o bom desenvolvimento das plantas e deve-se manter o adequado suprimento hídrico para as mesmas (TOSTA et al., 2014). Em algumas regiões com limitações de água, o objetivo da irrigação deve ser a obtenção da máxima produção por unidade de água aplicada, adequando a irrigação aos períodos críticos de déficit hídrico, tais como durante a germinação, floração e enchimento dos grãos ou frutos (BERNARDO et al., 2005).

2.5 Necessidade hídrica da cultura

A água é essencial para a produção vegetal, pois tanto o déficit como o excesso numa cultura são prejudiciais ao seu desenvolvimento (LEITE et al., 2005). A determinação das necessidades hídricas das culturas, em seus diferentes estádios de desenvolvimento, é uma etapa importante para o manejo de irrigação (SEDIYAMA, 1996). Mesmo a quinoa, que apresenta boa resistência ao déficit hídrico, responde muito favoravelmente à disponibilidade de água em quantidade ideal, permitindo o desempenho máximo das suas funções fisiológicas, o que pode proporcionar uma maior produtividade (RÊGO, 2015).

Vacher (1998) mostrou que a quinoa otimiza os ganhos de carbono com uma mínima perda de água e mantém alta eficiência de uso de água foliar para compensar a diminuição da condutância estomática. Esses autores relataram que a maior necessidade hídrica da quinoa é especialmente nas fases de floração e amadurecimento, para assegurar a produção da cultura nos anos secos ou durante os períodos de seca.

Como já foi relatado acima, a quinoa é tolerante à seca e essa cultura pode se desenvolver com apenas 200 mm de precipitação anual em solo arenoso. Rendimentos superiores a 100 kg ha⁻¹ foram relatados com irrigação de apenas 50 mm no deserto de Atacama, no norte do Chile. No entanto, os rendimentos aumentam significativamente em regiões áridas sob irrigação (AGUILAR; JACOBSEN, 2003).

O efeito da seca sobre o rendimento varia com o estado de desenvolvimento da planta. Geerts et al. (2006) observaram que a ocorrência de seca nos estados iniciais de crescimento da quinoa aumentou a eficiência do uso da água. Quando a seca ocorreu entre a pré-floração e o grão leitoso, foram observadas reduções significativas no rendimento. Jensen et al. (2000) também encontraram baixos rendimento quando ocorreu seca durante a fase de floração e do enchimento do grão.

Segundo Geerts e Garcia (2012), o fato de a quinoa ser resistente à seca, faz dela uma cultura cultivada só com a água da chuva, mesmo em locais semi-áridos. Os pesquisadores, no entanto, começaram a estudar o impacto de água adicional na produção de quinoa e descobriram que a irrigação deficitária (ID) era altamente benéfica.

De acordo com Geerts e Raes, (2009), por meio da adoção da irrigação deficitária, pode-se maximizar a produtividade da água, pois, mesmo havendo redução na produtividade da cultura, a sua qualidade ainda é assegurada, sendo semelhante à irrigação plena. Em situações onde a água é fator limitante, o objetivo principal não é a máxima produtividade por área, mas

sim, a máxima produtividade por unidade de água (ALI; TALUKDER, 2008) que pode ser o total de água (armazenada no solo + irrigações + precipitações) ou a água aplicada via irrigação (ALI; TALUKDER, 2008; MARTINS, et al., 2012).

2.6 Influência do déficit hídrico sobre a morfologia e fisiologia das plantas

A disponibilidade hídrica é um dos fatores ambientais que mais influencia a produtividade das culturas, pois aproximadamente 90% do peso da planta são constituídos por água. A água atua em, praticamente, todos os processos fisiológicos e bioquímicos além de desempenhar a função de solvente, transportando gases, minerais e outros solutos na planta (FARIAS et al., 2009).

Nas regiões onde ocorrem períodos de déficit hídrico acentuado, é necessário estudar a tolerância das culturas à seca, para que estratégias de manejo possam ser adotadas (IANMAN-BAMBER; SMITH, 2005), pois o déficit hídrico pode ocasionar problemas ao desenvolvimento e à produtividade de várias culturas agrícolas (MACHADO et al., 2009; PIMENTEL, 2004).

A deficiência hídrica pode ser definida como todo o conteúdo de água de um tecido ou célula que está abaixo do conteúdo de água mais alto exibido no estado de maior hidratação (TAIZ; ZEIGER, 2009). A maioria das plantas está sujeita a uma deficiência de água durante o dia seguida de uma recuperação à noite (MORENO, 2009). A frequência e a intensidade do déficit hídrico constituem os fatores mais importantes à limitação da produção agrícola mundial, por esse motivo muitos esforços têm sido realizados para melhorar a produtividade dos cultivos agrícolas sob condições de seca (CATIVELLI et al., 2008; OLIVEIRA et al., 2011).

A água utilizada pelas plantas é absorvida pelas raízes e transportada para a parte aérea juntamente com os nutrientes, através dos vasos lenhosos ou xilema (GARCIA et al., 2014). O déficit hídrico é um fenômeno que ocasiona nas plantas alterações fisiológicas e bioquímicas, ocorrem mudanças estruturais e funcionais em todos os níveis organizacionais, e estas ocorrem das moléculas grandes tais como proteínas e lipídios, e as agregações delas nas membranas, para as mais complexas organelas (cloroplastos, mitocôndrias), e em seguida, nas células, tecidos e órgãos, através de toda a planta (LOWER, 2012).

A ocorrência de déficit hídrico inviabiliza o processo fotossintético, uma vez que a água, além de ser componente básico da reação, também é responsável pela manutenção da transpiração, essencial para a permeabilidade do gás carbônico no mesófilo foliar (BUCHANAN et al., 2000). Os principais efeitos do estresse hídrico que podem ser detectados nos atributos fisiológicos estão correlacionados com o potencial hídrico da folha, que leva à redução do seu turgor e a alterações na condutância estomática e na taxa fotossintética, no CO₂ interno da folha, entre outros indicadores (GARCIA DEL MORAL et al., 2003).

Um dos primeiros efeitos do déficit hídrico nas plantas vasculares manifesta-se sobre os estômatos. Em geral, sob deficiência hídrica, a queda da taxa de fotossíntese pode ser relacionada com a limitação das trocas gasosas, devido ao fechamento dos estômatos em resposta a um decréscimo no potencial hídrico foliar (OLIVEIRA et al., 2002), e como consequência, menores intensidades luminosas são aproveitadas no processo fotossintético. Sob essas condições, as plantas não podem utilizar toda energia luminosa para a produção de ATP e NADPH, aumentando, dessa forma, a suscetibilidade à fotoinibição (OUKARROUM et al., 2007).

Para Chaves et al. (2002) a extensão dos efeitos do déficit hídrico nas espécies vegetais depende da sua intensidade e duração, e da capacidade genética das plantas em responder às

mudanças do ambiente. As respostas mais proeminentes das plantas ao estresse hídrico, segundo Taiz e Zeiger (2009), consistem no decréscimo da produção da área foliar, pois a expansão depende da pressão de turgescência que por sua vez é dependente do potencial hídrico, do fechamento dos estômatos, da aceleração da senescência e da abscisão das folhas. Em contrapartida, as raízes podem usar mais energia para o seu crescimento buscando umidade em profundidade, pela redistribuição dos fotoassimilados devido à redução de consumo na parte superior da planta. Estas modificações são úteis para minimizar a perda excessiva de água e conservar a água disponível (CHAVES; OLIVEIRA, 2004).

Vários mecanismos de proteção são ativados nas plantas em resposta a condições adversas de crescimento. Uma das consequências imediatas do fechamento estomático é a redução da absorção de CO₂, sendo que, quanto mais prolongado for o fechamento estomático, menor será a fotossíntese da planta (ROYER, 2001). Outra resposta das plantas ao déficit hídrico está associada à acumulação no citosol de solutos compatíveis (prolina, glicina, betaína, entre outros) que contribuem para a manutenção do equilíbrio hídrico e a preservação da integridade de proteínas, enzimas e membranas celulares (ASHAF et al., 2011; MARIJUAN; BOSCH, 2013).

O ajuste osmótico é um dos mecanismos fisiológicos mais eficazes para a manutenção da turgescência celular, sob condições de baixo potencial hídrico, confere proteção por curtos períodos de tempo e é importante quando as condições não tardam a normalizar (MARIJUAN; BOSCH, 2013).

O estresse por déficit hídrico também aumenta a deposição de cera na cutícula, sendo essa característica controlada geneticamente, o que reduz a perda de água. Apesar de a perda pela epiderme ser relativamente pequena, sob condições severas de déficit hídrico, a perda de água cuticular pode ser acentuada e a cutícula pode desempenhar papel importante na redução da perda de água (KERSTIENS, 2006).

A tolerância à seca implica na capacidade da planta de suportar a restrição hídrica sem danos; assim uma cultura tolerante à seca teria a capacidade de resistir ao déficit hídrico sem decréscimo da produtividade (LOWER, 2012). Algumas plantas podem suportar a falta de água através de diferentes mecanismos, envolvendo adaptações fisiológicas e morfológicas que permitem a sua sobrevivência e uma produtividade satisfatória (XOCONOSTLE-CAZARES et al., 2010).

Se a tolerância aumenta como consequência da exposição anterior ao estresse, a planta está aclimatada (TAIZ; ZEIGER, 2010), porém se a tolerância ocorrer devido à resistência genética adquirida por seleções durante várias gerações, a planta é considerada adaptada. Tanto a adaptação como a aclimação resultam de situações que ocorrem nos níveis anatômicos, morfológico, celular, bioquímico e molecular (TAIZ; ZEIGER, 2009).

2.7 Efeitos do estresse hídrico nas variáveis fisiológicas

2.7.1 Clorofilas

A clorofila é o pigmento mais abundante no planeta e é um componente essencial para a fotossíntese, pois absorve a energia da luz e a direciona para os fotossistemas por ressonância (processo físico). A absorção de luz ocorre, principalmente, nas regiões do vermelho e azul do espectro luminoso; assim, o aumento na concentração desse pigmento pode aumentar a eficiência fotossintética das plantas (HÖRTENSTEINER; KRÄUTLER, 2011).

A clorofila *a* é a responsável pela maior parte da absorção de luz, entretanto, nas plantas superiores 15 a 25% da clorofila total é composta pela clorofila *b* que, apesar, de esta não ser essencial para a fotossíntese (considerada um pigmento acessório), contribui para o processo,

absorvendo luz de comprimento de onda entre 425 e 475 nm e transferindo sua energia para a clorofila *a*, a qual absorve pouco nesses comprimentos (TANAKA; TANAKA, 2007).

Em decorrência da absorção dos fótons, as moléculas de clorofila passam de um estado basal para outro excitado, com maior nível de energia, muito instável. Tais pigmentos podem dissipar o excesso de energia absorvida da luz de quatro formas: dissipação fotoquímica (utilizada na fotossíntese), fluorescência (emissão na forma de luz), conversão direta de energia (retorno ao estado base sem emissão de fótons) e dissipação não-fotoquímica (reemissão na forma de calor) (TAIZ; ZEIGER, 2009; CAMPOSTRINI, 2010).

As moléculas de clorofila são formadas por complexos derivados das porfirinas e tem o Magnésio (Mg) como átomo central (TAIZ; ZEIGER, 2009). Existem diversos fatores que alteram a biossíntese das clorofilas como luz, temperatura, pH, deficiência hídrica, produção de ABA e etileno e atividades enzimáticas, que alteram o conteúdo foliar de clorofila (BATAGIN, 2008).

A deficiência hídrica atua na degradação de pigmentos nas folhas e esse processo tem início no cloroplasto e envolve uma complexa rota metabólica catalisada sequencialmente por uma série de enzimas e pelo fitormônio ABA (GAO et al., 2016). A degradação de clorofila durante a senescência foliar envolve conversão da clorofila *b* em clorofila *a*, abertura oxigenolítica do anel tetrapirólico da clorofila *a* (com remoção do átomo de Mg) e a formação de ficobilinas (pigmento acessório), cujo mecanismo regulador transcricional global não está esclarecido (MEGURO et al., 2011; CHRIST et al., 2012, CHRIST et al., 2013; KRAUTLER de 2014).

A degradação constitui um mecanismo de defesa da planta porque a clorofila *a* tem um poder antioxidante maior do que a clorofila *b* e consome espécies reativas de oxigênio (ROS), produzido em condições de estresse e que são fitotóxicas às plantas (HÖRTENSTEINER;

KRÄUTLER, 2011; STREIT et al., 2005). Deste modo, Lima et al. (2004) afirmam que em períodos de baixa umidade no solo, os conteúdos de clorofila são drasticamente afetados. Sendo assim, tais pigmentos podem ser utilizados como parâmetro indicativo de estresse hídrico na planta (DUCRUET, 2003; CARLIN, 2009).

2.7.2 Prolina

Vários mecanismos de proteção são ativados nas plantas em resposta a condições adversas de crescimento. O ajuste osmótico constitui-se um dos mecanismos fisiológicos mais eficazes para manutenção da turgescência celular, sob condições de baixo potencial hídrico no solo (MARIJUAN; BOSCH, 2013).

Esse mecanismo estabelece-se mediante o acúmulo no vacúolo ou no citosol de solutos compatíveis (prolina, glicina betaína, trealose, sacarose, poliaminas, manitol, pinitol, entre outros) que contribuem para a manutenção do equilíbrio hídrico e a preservação da integridade de proteínas, enzimas e membranas celulares. Esses solutos também têm a função osmoprotetora contra subprodutos tóxicos do metabolismo, resultantes do estresse (ASHRAF et al., 2011; MARIJUAN; BOSCH, 2013).

O acúmulo de solutos compatíveis não é nocivo ao metabolismo celular e, por aumentar a pressão osmótica no interior das células mantém a absorção de água e a pressão de turgor das células, promovendo a manutenção dos processos fisiológicos, ainda que em níveis menores (MARIJUAN; BOSCH, 2013).

Sabe-se que a prolina desempenha um importante papel adaptativo na tolerância das plantas ao estresse, principalmente devido à sua propriedade osmoprotetora. Durante situações de seca e alta salinidade, o seu acúmulo resulta em aumento na osmolaridade da

célula, que leva ao influxo de água e promove a manutenção do turgor necessária para a expansão celular (KAVI KISHOR et al., 2005).

Em plantas, a resposta ao estresse ocorre a partir de uma série de eventos envolvidos na ativação de genes e síntese de compostos que induzem modificações bioquímicas e fisiológicas. A diminuição da condutância estomática e aumento no comprimento das raízes melhoram o desempenho das espécies cultivadas durante a imposição à seca. Porém, há menor captação de CO₂ devido ao fechamento dos estômatos e desvio da energia requerida para o crescimento de raízes (VERSLUES et al., 2006). Como forma de tolerância em casos de deficiência hídrica severa, as plantas promovem o influxo de água, por meio do acúmulo de solutos na célula, que reduz o potencial osmótico (ZHANG et al., 1999).

2.8 Qualidade funcional dos grãos

Nos últimos anos, uma atenção crescente tem sido dedicada ao papel da dieta na saúde humana. Vários estudos epidemiológicos indicaram que a alta ingestão de produtos vegetais está associada com uma redução no risco de uma variedade de doenças como o câncer e doenças crônicas, como a arteriosclerose (SILVA, et al., 2010). Estes efeitos têm sido particularmente atribuídos aos compostos que possuem atividade antioxidante. Os principais antioxidantes nos vegetais são as vitaminas C e E, os carotenóides e os compostos fenólicos, especialmente os flavonóides (SILVA, et al., 2010). Esses antioxidantes absorvem radicais livres e inibem a cadeia de iniciação ou interrompem a cadeia de propagação das reações oxidativas promovidas pelos radicais (PODSEDEK, 2007).

Os compostos fenólicos compõem outro importante grupo de bioativos, normalmente encontrados em plantas ou produtos alimentares, que possuem ação antioxidante devido à capacidade de transferir elétron e/ou átomos de hidrogênio aos radicais livres, bem como pela

capacidade de se ligar a íons metálicos potencialmente pró-oxidantes, resultando em um radical estável (CRAFT et al., 2012).

Os compostos fenólicos são substâncias amplamente distribuídas na natureza, mais de 8000 compostos fenólicos já foram detectados em plantas, entre estes estão polifenóis que são metabólitos secundários bioativos que são amplamente presente em alimentos comumente consumidos de origem vegetal (SILVA et al., 2010).

Os três tipos principais de polifenóis são flavonóides, ácidos fenólicos e taninos, que atuam como poderosos antioxidantes. Estes compostos são considerados portadores de muitos efeitos benéficos à saúde (SILVA et al., 2010). Os flavonóides compreendem um grupo de compostos fenólicos amplamente distribuídos nas frutas e nos vegetais, apresentando-se sob muitas variações como flavonóis, flavonas, flavanonas, catequinas e antocianinas (SILVA et al., 2010). A importância destes compostos está no fato de eles apresentarem capacidade de neutralizar ou inibir os radicais livres, que causam diversas doenças degenerativas; ou seja, possuem atividade antioxidante (ARAÚJO, 2015; SALGADO, 2009).

Nos cereais, a maior proporção dos compostos fenólicos está localizada na camada mais externa dos grãos (ARAÚJO, 2015). Os grãos de quinoa contêm elevada capacidade antioxidante devido, principalmente, ao seu teor de compostos fenólicos e flavonóides, assim como vitaminas E e C (MIRANDA et al., 2010).

Pásko et al. (2009) observaram que os grãos de quinoa escura apresentaram uma grande proporção de compostos fenólicos denominados antocianinas (PÁSKO et al., 2009). Tang et al. (2015) encontraram até 23 compostos fenólicos presentes nos grãos de quinoa, dos quais as betacianinas, principalmente betainas e isobetainas, eram responsáveis pela coloração vermelha e preta nos grãos.

Além disso, dentre os compostos fenólicos individuais identificados no grão, os ácidos ferúlico e vanílico são predominantes. Já os principais flavonóides são quercetina e kampferol (REPO-CARRASCO et al, 2010; TANG et al., 2015). Diante disso, a quantificação e avaliação desses compostos são de importância, por exercerem efeito protetor a diversas doenças como câncer, alergias, doenças inflamatórias e cardiovasculares (DINI, 2010; MIRANDA et al., 2010).

O teor de compostos fenólicos na planta é outro fator afetado pelo estresse hídrico. A quantidade de metabólitos nas plantas pode ser afetada por diferentes fatores, como processos biológicos, ambientais, bioquímicos, fisiológicos, ecológicos e evolutivos (RAMAKRISHNA, et al., 2011). Entre esses fatores, o estresse hídrico pode aumentar muito a concentração de compostos do metabolismo secundário das plantas (SELMAR et al., 2013).

Aninbon et al. (2016) aplicaram exposição a seca de aproximadamente 25 dias no fim do ciclo de cultivo em genótipos de amendoim com diferentes índices de tolerância à seca e observaram um aumento no teor de compostos fenólicos em folhas e hastes de amendoim, no entanto, relataram que a seca promoveu uma redução no teor de compostos fenólicos dos grãos com película.

O efeito do estresse hídrico sobre os compostos fenólicos foi revisto por muitos pesquisadores em muitas espécies e em diferentes partes de plantas. Foi documentado em ensaios de restrição de água que a capacidade antioxidante das sementes de quinoa aumenta à medida que as plantas são submetidas a níveis mais baixos de disponibilidade de água (FISCHER et al., 2013). Estudos realizados por Santos e Kaye (2009) e Chavarria et al., (2011) verificando a influência de estresse hídrico em *Vitis vinifera* L. concluíram que a restrição hídrica proporcionou maiores teores de polifenóis totais.

Em *Hypericum brasiliense*, o teor de vários fenóis e ácido betulinico foi elevado sob estresse hídrico (DE ABREU et al., 2005). De Abreu e Mazzafera (2005) mostraram que a quantidade total de alguns produtos secundários vegetais foi elevada significativamente em *H. brasiliense* cultivada sob estresse hídrico. Nogués et al. (1998) também relataram um aumento considerável de compostos fenólicos em plantas de ervilha crescendo sob condições de estresse. A quantidade total de antocianinas em plantas de ervilha cultivadas sob estresse hídrico também foi elevada em comparação com os regimes normais de irrigação (SELMAR et al., 2013).

No entanto, o estresse hídrico reduziu a concentração fenólica nas folhas de algodão (YILDIZ-AKTASET al., 2009), tomate cereja (SANCHEZ-RODRIGUEZ et al, 2011) e no óleo de semente de genótipos de milho (ALI et al., 2010).

Genótipos de milho com resistência ao estresse hídrico aumentaram o teor total de compostos fenólicos em folhas sob déficit hídrico, enquanto que genótipos moderados e sensíveis não aumentaram o conteúdo fenólico total (HURA et al., 2008).

Diferentes espécies de plantas podem usar diferentes mecanismos para distribuir flavonóides entre os compartimentos subcelulares (WINKEL-SHIRLEY et al., 2002). A elevação de flavonóides e fenólicos sob condições severas de estresse hídrico é atribuída ao acúmulo de carboidratos solúveis nas células vegetais devido ao transporte reduzido de açúcar solúvel sob estresse hídrico (JAAFAR et al., 2012; IBRAHIM, et al., 2011).

Os polifenóis, como flavonóides e ácidos fenólicos, são biossintetizados com diferentes vias, incluindo o ácido chiquímico e o ácido malônico. A via do ácido chiquímico é responsável pela conversão de precursores de carboidratos simples em aminoácidos aromáticos (GHASEMZADEH et al., 2010). Além disso, a quantidade de flavonóides e outros antioxidantes de baixo peso molecular em plantas de estresse hídrico podem estar

parcialmente relacionados à variação morfológica das folhas e às alterações metabólicas que impedem o dano oxidativo (HERNANDEZ et al., 2004). Assim, a literatura documenta que o conteúdo fenólico vegetal diferirá em resposta à seca, e esta resposta difere entre espécies, partes de plantas e tolerância à seca de genótipos dentro de uma espécie (ANINBON et al., 2016).

2.9 Melhoramento genético para tolerância à seca

Em face das mudanças climáticas globais, os estudos preveem, para os próximos anos, o aumento da temperatura média global e a maior frequência de fenômenos extremos, como a seca (IPCC, 2011). Entre os vários recursos essenciais para produção vegetal, a água é o mais abundante e também, o mais limitante. A restrição hídrica é a mais importante limitação a produtividade agrícola (MATOS et al., 2017).

Aproximadamente 35% da superfície terrestre é considerada árida ou semi-árida, não recebendo precipitação ou suprimento hídrico adequado para a maioria das espécies cultivadas (DIAZ-LÓPEZ et al., 2012). À medida que os recursos hídricos tornam-se escassos, o desenvolvimento de plantas tolerantes à seca ou mais eficientes no uso da água passam a ser prioridade para obtenção de altas produtividades. Esse trabalho tem sido desenvolvido por vários melhoristas ao redor do mundo. No entanto, apesar dos progressos, ainda há muito a ser feito para reverter os prejuízos atuais e futuros (FERRÃO et al., 2016).

O uso de cultivares adaptadas aos sistemas de produção e às condições ambientais da região de cultivo, além dos mecanismos desenvolvidos pela planta para tolerar estresses abióticos, constitui fatores importantes para a maximização do rendimento de grãos (SCHAFFERT et al., 2011). Diante do exposto, a obtenção de genótipos mais adaptados às condições edafoclimáticas estressantes, com capacidade de resistir a períodos com deficiência

hídrica sem grandes prejuízos à produção, torna-se de fundamental importância para programas de melhoramento genético de planta, uma vez que esse processo auxilia na escolha de critérios de seleção de genótipos com maior tolerância à seca e/ou maior eficiência do uso da água (FERRÃO et al., 2016).

Para que os trabalhos de melhoramento de plantas adaptadas ao déficit hídrico tenham maior perspectiva de êxito, é essencial que os melhoristas conheçam a probabilidade de ocorrência de deficiência hídrica, bem como suas características, como intensidade, duração e época de ocorrência, em função da fase fenológica da cultura (FERRÃO et al., 2016). Isso porque a resposta ao estresse depende da combinação entre características do estresse e os atributos da planta (FRITSCHÉ-NETO; BOREM, 2011).

A tolerância à seca é resultante de várias características (anatômicas, morfológicas, fisiológicas, moleculares) que se expressam diferente e concomitantemente, dependendo da severidade e da taxa de imposição do déficit hídrico, da idade e das condições nutricionais da planta, do tipo e da profundidade do solo, da carga pendente de frutos, da demanda evaporativa da atmosfera e da face de exposição do terreno (SAMATTI; CAYLOR, 2007). Segundo Wu et al. (2011) o controle genético da tolerância a estresses e a eficiência no uso de recursos pelas plantas, tem natureza quantitativa, o que envolve vários genes distribuídos aleatoriamente em várias regiões do genoma, dificultando a seleção de genótipos tolerantes à seca.

Portanto, a adoção de uma única estratégia de adaptação à seca é, certamente, inadequada para qualquer tipo de ambiente (SAMBATT; CAYLOR, 2007). Na obtenção de cultivares adaptadas ao déficit hídrico, dois princípios podem ser empregados: o melhoramento visando à tolerância a seca, e, alternativamente, o melhoramento para a eficiência no uso da água (EUA). Uma planta tolerante à seca pode resistir a condições adversas, sobreviver e deixar descendentes, ou seja, é uma planta capaz de manter suas

funções numa situação de deficiência hídrica (FERRÃO et al., 2016). No contexto genético, refere-se à capacidade de um genótipo produzir melhor que outro numa condição de estresse hídrico (BASSETT, 2013).

Genótipos tolerantes à seca têm, normalmente, maior estabilidade de produção, mas, geralmente, menor potencial produtivo, sendo indicados, portanto, para sistemas de produção de menor nível tecnológico (FRITSCHÉ-NETO; BOREM, 2011).

Por outro lado, a EUA é definida como a razão entre a absorção e utilização da água, ou seja, é a capacidade que um genótipo tem de absorver a água do solo e transformá-la em biomassa, frutos ou grãos (FRITSCHÉ-NETO; BOREM, 2011). Assim, o melhoramento para a EUA avalia a produção por unidade de água fornecida, de modo que quanto maior a água disponível, maior a produção (FERRÃO et al., 2016).

A tolerância à seca é complexa quanto à identificação nos materiais vegetais, e isso ocorre por ser um estudo com diferentes níveis de interação genótipos x ambiente (COOPER et al., 2006). O controle de locais e anos com condução de experimentos é sempre bastante variável, e assim, o programa de melhoramento, ano após ano, vai demonstrar um perfil diferente dos genótipos quanto às suas respostas de produção. Além disso, as respostas das plantas à seca também são influenciadas pelo tempo, intensidade, duração e frequência do estresse, bem como pela diversidade da interação planta-solo-atmosfera (SAINT PIERRE et al., 2012).

Para obter confiabilidade e precisão nos resultados de um programa de melhoramento para seleção de genótipos tolerantes à seca é preciso conhecer o potencial genético das cultivares e utilizar da repetibilidade de ensaios, em locais e anos. Ter esses fatores em concordância tende a ser útil para melhorar a eficiência das avaliações e selecionar genótipos em ambientes propensos à seca (ABRAHA et al., 2015).

Apesar de seu potencial agronômico, a quinoa ainda é uma cultura subutilizada (MASSAWE et al., 2016), com relativamente poucos programas de melhoramento ativo (ZURITA-SILVA et al., 2014). Os esforços para melhorar a colheita de grão e importantes características agronômicas são necessários para expandir a produção de quinoa em todo o mundo (JARVIS et al., 2017).

Pois, é uma cultura que possui requisitos de água intrinsecamente baixos e, portanto, exibe uma forte capacidade natural de lidar com a seca. Existem diferenças genotípicas na tolerância à seca entre as cultivares de quinoa, e a maioria dos mecanismos conhecidos de tolerância à seca são encontrados nesta espécie (JACOBSEN et al. 2003).

2.10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAHA, T.; NYENDE, A. B.; MWANGI, S. G.; KASILI, R.; ARAIA, W. Identification of sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) landraces tolerant to post flowering drought stress using drought tolerance indices. **Journal of Plant Breeding and Crop Science**, v. 7, n. 7, p. 211-218, 2015.

ABREU, I. N.; MAZZAFERA, P. Effect of water and temperature stress on the content of active constituents of *Hypericum brasiliense* Choisy. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 43, n. 3, p. 241-248, 2005.

ADÂMOLI, J.; MACÊDO, J.; AZEVEDO, L. G.; NETTO, J. M. Caracterização da região dos Cerrados. In: Solos do Cerrado: tecnologias e estratégias de manejo. 1986, São Paulo. **Anais...São Paulo: Nobel**, 1986. p. 33-74.

AGUILAR, P. C.; E JACOBSEN, S.-E. Cultivation of quinoa on the Peruvian altiplano. **Food Reviews International**, v. 19, n. 1-2, p. 31-41, 2003.

ALI, Q.; MUHAMMAD, A.; FAROOQ, A. Seed composition and seed oil antioxidant activity of maize under water stress. **Jornal da American Oil Chemists 'Society**, v. 87, n. 10, p. 1179-1187, 2010.

ALI, M. H.; TALUKDER, M. S. U. Increasing water productivity in crop production. **A Synthesis, Agricultural Water Management**, v.95, n.11, p. 1201–1213, 2008.

ALI, M.H.; HOQUE, M.R.; HASSAN, A.A.; KHAIR, A. Effects of deficit irrigation on yield, water productivity and economic returns of wheat. **Agricultural Water Management**, v.92, p.151-161, 2007.

ALMEIDA, S. G.; SÁ, W. A. C. Amarantho (*Amaranthus* spp) e quinoa (*Chenopodium quinoa*) alimentos alternativos para doentes celíacos. **Ensaio e Ciência: Ciências Biológicas, Agrárias e da Saúde**, v. 13, n. 1, p. 77-92, 2009.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; DE MORAES, G.; LEONARDO, J.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

AMARAL, J. F. T.; MARTINEZ, H. E. P.; LAVIOLA, B. G; FERNANDES FILHO, E. I.; CRUZ, C. D. Eficiência de utilização de nutrientes por cultivares de cafeeiro. **Ciência Rural**, v.41, n.1, p.621-629, 2011.

ANINBON, C.; JOGLOY, S.; VORASOOT, N.; PATANOTHAI, A.; NUCHADOMRONG, S.; SENAWONG, T. Effect of end of season water deficit on phenolic compounds in peanut genotypes with different levels of resistance to drought. **Food Chemistry**, v. 196, n. 1, p. 123–129, 2016.

ANNUNZIATA, A.; VECCHIO, R. Factors affecting italian consumer attitudes toward functional foods. **Journal of Agrobiotechnology Management & Economics**, v.14, n.1, p. 20- 32, 2011.

ARAÚJO, J. M. A. **Química de alimentos: teoria e prática**. Viçosa:UFV, 2015. 668 p.

ARAYA, A.; STROOSNIJDER, L.; GIRMAY, G.; KEESSTRA, S.D. Crop coefficient, yield response to water stress and water productivity of teff (*Eragrostis tef* (Zucc.)). **Agricultural Water Management**, v.98, n.5, p.775-783, 2011.

ASHRAF, M.; AKRAM, N. A.; ALQURAINY, F.; FOOLAD, M. R. Drought tolerance: roles of organic osmolytes, growth regulators, and mineral nutrients. **Advances in Agronomy**, v.11, p.249-296, 2011.

ASHRAF, M. Inducing drought tolerance in plants: recent advances. **Biotechnology Advances**, v. 28, n. 1, p. 169-183, 2010.

AYAZ, F. A.; KADIOGLU, A.; TURGUT, R. Water stress effects on the content of low molecular weight carbohydrates and phenolic acids in *Ctenanthesetosa* (Rosc.) Eichler. **Canadian Journal of Plant Science**, v. 80, n. 2, p. 373-378, 1999.

BHARGAVA, A.; SHUKLA, S.; OHRI, D. *Chenopodium quinoa* – an Indian perspective. **Industrial Crops and Products**, v. 23, n. 1, p. 73-87, 2006.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 7. ed. Viçosa: Editora UFV, 2005. 611 p.

BAPTISTA, J. M.; ALMEIDA, M. D. C.; VIEIRA, P., SILVA, A. C. M., RIBEIRO, R., FERNANDO, R. M.; PEREIRA, L. S. Programa nacional para o uso eficiente da água. **Lisboa: Instituto Superior de Agronomia**, p. 212, 2001.

BASSETT, C. L. Water use and drought response in cultivated and wild apples. In: VAHDATI, K.; LESLIE, C. **Abiotic Stress-Plant Responses and Applications in Agriculture**, p. 249-275, 2013.

BERNIER, J.; ATLIN, G. N.; SERRAJ, R.; KUMAR, A.; SPANER, D. Breeding upland rice for drought resistance. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 88, n. 6, p. 927–939, 2008.

BRITO, L. T. D. L.; CAVALCANTI, N. D. B.; SILVA, A. D. S.; PEREIRA, L. A. Produtividade da água de chuva em culturas de subsistência no Semiárido Pernambucano. **Engenharia Agrícola**, v. 32, n.1, p. 102-109, 2012

BUCHANAN, B. B.; GRUISSEM, W.; JONES, R. L. **Biochemistry & Molecular Biology of Plants**. 1. ed. Rockville: American Society of Plant Physiologists, 2000. 1367 p.

BHARGAVA, A.; SHUKLA, S.; OHRI, D. *Chenopodium quinoa*: An Indian perspective. **Industrial Crops and Products**, v. 23, n. 3, p. 73–87, 2005.

BRADY, K.; HO, C. T.; ROSEN, R. T.; SANG, S.; KARWE, M. V. Effects of processing on the nutraceutical profile of quinoa. **Food Chemistry**, v. 100, n. 4, p. 1209-1216, 2007.

CAMARGO, F. O. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2. ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008. 359-417p.

CARLESSO, R.; ZIMMERMANN, L. F. **Água no solo: parâmetros para dimensionamento de sistemas de irrigação**. Santa Maria: UFSM, 2000. 88p.

CATTIVELLI, L.; RIZZA, F.; BADECK, F. W.; MAZZUCOTELLI, E.; MASTRANGELO, A. M.; FRANÇA, E.; STANCA, A. M. Drought tolerance improvement in crop plants: an integrated view from breeding to genomics. **Field Crops Research**, v. 105, n. 1-2, p. 1-14, 2008.

CHAVARRIA, G.; BERGAMASCHI, H.; SILVA, L. C.; SANTOS, H. P.; MANDELLI, F.; GUERRA, C. C.; FLORES, C. A.; TONIETTO, J. Relações hídricas, rendimento e compostos fenólicos de uvas Cabernet Sauvignon em três tipos de solo. **Bragantia**, v. 70, n. 3, p.481-487, 2011.

CHAVES, M.; OLIVEIRA, M. M. Mechanisms underlying plant resilience to water deficits: prospects for water-saving agriculture. **Journal of Experimental Botany**. v. 55, n. 407, p. 2365-2384, 2004.

CHRIST, B.; SUSSENBACHER, I.; MOSER, S.; BICHSEL, N.; EGERT, A.; MULLER, T.; KRAUTLER, B.; HÖRTENSTEINER, S. Cytochrome P450 CYP89A9 is involved in the

formation of major chlorophyll catabolites during leaf senescence in Arabidopsis. **The Plant Cell**, v. 25, p. 1868–1880, 2013.

CHRIST, B.; SCHELBERT, S.; AUBRY, S.; SUSSENBACHER, I.; MULLER, T.; KRAUTLER, B.; HÖRTENSTEINER, S. MES16, a member of the methyltransferase protein family, specifically demethylates fluorescent chlorophyll catabolites during chlorophyll breakdown in Arabidopsis. **Plant Physiology**, v. 158, n. 2, p 628–641, 2012.

CHRISTOFIDIS, D. Água na produção de alimentos: o papel da academia e da indústria no alcance do desenvolvimento sustentável, **Revista Ciências Exatas**, v. 12, n. 1, p. 37- 46, 2006.

COOPER M., VAN EEUWIJK F., CHAPMAN S. C., PODLICH D. W., LOEFFLER C.. Genotype-by-environment interactions under water-limited conditions. In JM Ribaut, **Drought Adaptation in Cereals**, p. 51-96, 2006.

DANELLI, D.; COSTA, P. G.; MELO, M. L.; PAGNO, H. C.; GEWEHR, F. M.; FLÔRES, H. S.; JONG, V. E. Avaliação biológica da funcionalidade de pão de forma com adição de quinoa (*Chenopodium quinoa*). **Brazilian Journal Food Technology**, v. 21, n. 27, p. 55-67, 2012.

DE ABREU, I. N.; MAZZAFERA, P. Effect of water and temperature stress on the content of active constituents of *Hypericum brasiliense* Choisy. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 43, n. 241–248, 2005.

DÍAZ-LÓPEZ, L.; GIMENO, V.; ISIMÓN, I.; MARTÍNEZ, V.; RODRÍGUEZ-ORTEGA, W.M.; GARCÍA-SÁNCHEZ, F. *Jatropha curcas* seedlings show a water conservation strategy under drought conditions based on decreasing leaf growth and stomatal conductance, **Agricultural Water Management**, v.105, n.9, p. 48– 56, 2012.

DI PAOLO, E.; RINALDI, M. Yield response of corn to irrigation and nitrogen fertilization in a Mediterranean environment. **Field Crops Research**, v. 105, p. 202-210, 2008.

DOGAN, H.; KARWE, M. Physicochemical properties of quinoa extrudates. **Food Science and Technology International**, v. 9, n. 2, p. 101-114, 2003.

FALEIRO, F. G.; FARIAS NETO, A. L. **Savanas: desafios e estratégias para o equilíbrio entre sociedade, agronegócio e recursos naturais**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2008.

FAO, Fao statistical year book 2013 world food and agriculture. **Food and Agriculture Organization of the United Nations**, Rome, p. 307, 2013.

FAO, The state of food insecurity in the world 2014. **Food and Agriculture Organization of the United Nations**, Home, Disponível em <<http://www.fao.org/publications/sofi/en/>> Acesso em: 30 jul. 2017.

FERRÃO, R. G; MOREIRA, S. O.; FERRÃO, M. A. G.; RIVA, E. M. Genética e melhoramento: desenvolvimento e recomendação de cultivares com tolerância à seca para o Espírito Santo. **Incaper em Revista**, v. 6 e 7, n. 4, p. 51-71, 2016.

FERERES, E.; SORIANO, M. A.; Deficit irrigation for reducing agricultural water use. **Journal of Experimental Botany**, v.58, n.2, p.147–159, 2007.

FISCHER, S.; WILCKENS, R.; JARA, J.; ARANDA, M. Estresse hídrico controlado para melhorar a qualidade funcional e nutricional em sementes de quinoa. **Boletim Latino-Americano e do Caribe de Plantas Medicinais e Aromáticas**. v.12, n. 5, 457-468, 2013.

FRITSCHÉ-NETO, R.; BORÉM, A. **Melhoramento de plantas para condições de estresses abióticos**. Viçosa: Editora UFV, 2011.

GAO, S.; GAO, J.; ZHU1, X.; SONG, Y.; LI, Z.; REN, G.; ZHOU, X.; KUAI, B. ABF2, ABF3, and ABF4 promote ABA-mediated chlorophyll degradation and leaf senescence by transcriptional activation of chlorophyll catabolic genes and senescence-associated genes In *Arabidopsis*. **Molecular Plant**, v. 9, n. 9, 1272–1285, 2016.

GARCIA, S. H.; ROZZETTO, D. R. D. S.; COIMBRA, J. L. M.; GUIDOLIN, A. G; Simulação de estresse hídrico em feijão pela diminuição do potencial osmótico. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 11, n. 1, p. 35-41, 2014.

GARCIA DEL MORAL, L. F.; RHARRABTI, Y.; VILLEGAS, D.; ROYO, C. Evaluation of grain yield and its components in durum wheat under Mediterranean conditions: an ontogenic approach. **Agronomy Journal**, v. 95, n. 2, p. 266–274, 2003.

GARCIA, M.; RAESB, D.; SVEN-ERIK JACOBSENC, S-E. Evapotranspiration analysis and irrigation requirements of quinoa (*Chenopodium quinoa*) in the Bolivian highlands. **Agricultural Water Management**, v.60, n. 2, p. 119–134, 2003.

GEERTS, S.; GARCIA, M. Quinoa. **Food And Agriculture Organization Of The United Nations Rome**, p. 230-233, 2012.

GEERTS, S.; RAES, D.; Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas, **Agricultural Water Management**, v.96, n.9, p.1275– 1284, 2009.

GEERTS, S.; RAES, D.; GARCIA, M.; VACHER, J.; MAMANI, R.; MENDOZA, J.; TABOADA, C. Introducing deficit irrigation to stabilize yields of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). **European Journal of Agronomy**, v. 28, n. 3, p. 427-436, 2008.

GEWEHR, M. F.; DANELLI, D.; MELO, L. M.; FLÔRES, S. H.; JONG, E.V. Análises químicas em flocos de quinoa: caracterização para a utilização em produtos alimentícios. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 15, n. 4, p. 280-287, 2012.

GHASEMZADEH, A.; JAAFAR, H. Z.; RAHMAT, A. Elevated carbon dioxide increases contents of flavonoids and phenolic compounds, and antioxidant activities in Malaysian young ginger (*Zingiber officinale* Roscoe.) varieties. **Molecules**, v.15, n. 11, p. 7907–7922, 2010.

HERNANDEZ, I.; LEONOR, A.; SERGI, M. Drought-induced changes in flavonoids and other low molecular weight antioxidants in *Cistus chusii* grown under Mediterranean field conditions. **Tree Physiology**, v. 24, n. 11, 1303–1311, 2004.

HÖRTENSTEINER, S.; KRÄUTLER, B. Chlorophyll breakdown in higher plants. **Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Bioenergetics**, v. 1807, n. 8, p. 977-988, 2011.

HUND, A.; RUTA, N.; LIEDGENS, M. Rooting depth and water efficiency of tropical maize inbred lines, differing in drought tolerance. **Plant Soil**, v. 318, n. 1-2, p. 311-325, 2009.

HURA, T.; HURA, K.; GRZESIAK, S. Contents of total phenolics and ferulic acid, and PAL activity during water potential changes in leaves of maize single-cross hybrids of different drought tolerance. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 194, n. 2, 104–112, 2008.

IANMAN-BAMBER, N. G; SMITH, D. M. Water relations in sugarcane and response to water deficits. **Field Crops Research, Amsterdam**, v. 92, n. 2-3, p. 185-202, 2005.

IGBADUN, H.E.; MAHOO, H.F.; TARIMO, A.K.P.R.; SALIM, B.A.S. Crop water productivity of an irrigated maize crop in Mkoji sub-catchment of the Great Ruaha River Basin, Tanzania. **Agricultural Water Management**, v. 85, n. 1-2, p.141-150, 2006.

INESS, B. R.; INESS, J. K.; IBTISSEM, H. S.; SOUMAYA, B.; FERID, L.; BRAHIM, M. Crop water productivity of an irrigated maize crop in Mkoji sub-catchment of the Great Ruaha River Basin, Tanzania **Industrial Crops and Products**, v.36, n. 1-2, p. 238–245, 2012.

IPCC (2011) Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate change Reconsidered: 2011 Interim Report of the Nongovernmental International Panel on Climate Change** (NIPCC). Disponível em: <http://www.nipccreport.org/reports/2011/2011report.html>. Acesso em 22 de setembro de 2017.

JAAFAR, H. Z. E.; IBRAHIM, M. H.; KARIMI, E. Phenolics and flavonoids compounds, phenylalanine ammonia lyase and antioxidant activity responses to elevated CO₂ in *Labisiapumila* (Myrsinaceae). **Molecules**, v.17, n. 6, 6331–6347, 2012.

JACOBSEN, S. E. The world wide potential of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). **Food Reviews International** **19**, v.1-2, n. 1-2 p.167–177, 2003.

JACOBSEN, S.-E.; MUJICA, A.; JENSEN, C. R. The resistance of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) to adverse abiotic factors. **Food Reviews International**, v. 19, n. 1-2, p. 99-109, 2003.

JARVIS, D. E.; HO, Y. S.; LIGHTFOOT, D. J.; SCHMÖCKEL, S. M.; LI, B.; BORM, T. J.; KHARBATIA, N. M. The genome of *Chenopodium quinoa*. **Nature**, v. 542, n. 7641, p. 307, 2017.

JENSEN, C.; JACOBSEN, S. E.; ANDERSEN, M.; NÚÑEZ, N.; ANDERSEN, S.; RASMUSSEN, L.; MOGENSEN, V. Leaf gas exchange and water relation characteristics of field quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) during soil drying. **European Journal of Agronomy**, v. 13 n. 1, p. 11–25, 2000.

KAUR, G.; ASTHIR, B. Proline: a key player in plant abiotic stress tolerance. **Biologia Plantarum**, v. 59, n. 4, p. 609-619, 2015.

KANG, S.; ZHANG, L.; LIANG, Y.; HU, X.; CAI, H.; GU, B. Effects of limited irrigation on yield and water use efficiency of winter wheat in the Loess Plateau of China. **Agricultural Water Management**, v.55, n.3, p.203-216, 2002.

KERSTIENS, G. Water transport in plant cuticles: an update. **Journal of Experimental Botany**, v. 57, n. 11, p. 2493-2499, 2006.

KIRDA, C. Deficit irrigation scheduling based on plant growth stages showing water stress tolerance. **Food and Agricultural Organization of the United Nations, Deficit Irrigation Practices, Water Reports**, v. 22, p. 102, 2002.

- KO, J.; PICCINNI, G. Corn yield responses under crop evapotranspiration-based irrigation management. **Agricultural Water Management**, v.96, p.799-808, 2009.
- KRAUTLER, B. Phyllobilins—the abundant bilin-type tetrapyrrolic catabolites of the green plant pigment chlorophyll. **Chemical Society Reviews**, v. 43, n. 17, p. 6227–6238, 2014.
- KROL, A.; AMAROWICZ, R.; WEIDNER, S. Changes in the composition of phenolic compounds and antioxidant properties of grapevine roots and leaves (*Vitis vinifera* L.) under continuous of long-term drought stress. **Acta Physiologia e Plantarum**, v. 36, n. 6, p. 1491-1499, 2014.
- LARRAURI, J. A.; RUPÉREZ, P.; SAURA-CALIXTO, F. Effect of drying temperature on the stability of polyphenols and antioxidant activity of red grape pomace peels. **Journal Agriculture Food Chem.** v.45, n. 4, p.1390-1393, 1997.
- LAWLOR, D. W.; CORNIC, G. Photosynthetic carbon assimilation and associated metabolism in relation to water deficit in higher plants. **Plant Cell Environment**, v. 25, n. 2, p. 275-294, 2002.
- LEES, D. H.; FRANCIS, F. J. Standardization of pigment analyses in cranberries. **Hort Science**, v.7, n.1, p.83-84, 1972.
- LEITE, R. M. V. B. C.; BRIGHENTI, A. M.; CASTRO, C. **Girassol no Brasil**. Londrina: Embrapa Soja, 2005. 641 p.
- LIMA, J. E. F. W.; SILVA, E. M. Gestão de recursos e manejo da irrigação no Cerrado. In: FALEIRO, F. G.; SOUSA, E. D. Pesquisa, desenvolvimento e inovação para o Cerrado. 2007, Planaltina, DF. **Anais...Planaltina: Embrapa Cerrados**, 2007. p. 33-44.
- MACHADO, A. F. L.; FERREIRA, L. R.; SANTOS, L. D. T.; FERREIRA, F. A.; VIANA, R. G.; MACHADO, M. S.; FREITAS, F. C. L. Photosynthetic efficiency and water use in eucalyptus plants sprayed with glyphosate. **Planta Daninha**, v. 28, n. 2, p. 319-327, 2010.
- MAPA, MINISTERIO DA AGRICULTURA, PECUARIA E ABASTECIMENTO. Projeções do Agronegócio Brasil 2010/2011 a 2020/2021. Brasília-DF, 2011.
- PINTÓ-MARIJUAN, M.; MUNNÉ-BOSCH, S.. Ecophysiology of invasive plants: osmotic adjustment and antioxidants. **Trends in Plant Science**, v. 18, n. 12, p. 660-666, 2013.

- MAROUELLI, W. A.; SILVA, W. L. C.; SILVA, H. R. **Irrigação por aspersão em hortaliças: qualidade da água, aspectos do sistema e método prático de manejo.** Brasília: EMBRAPA Hortaliças, 2001. 111 p.
- MARTINS, J. D. CARLESSO, R.; PETRY, M. T.; RODRIGUES, G. C. Viabilidade econômica da irrigação deficitária em milho irrigado por gotejamento. **Irriga**, v. 1, n. 1, p. 150-165, 2016.
- MARTIN, J. D.; CARLESSO, R.; AIRES, N. P.; GATTO, J. C.; DUBOU, V.; FRIES, H. M.; SCHEIBLER, R. B. Irrigação deficitária para aumentar a produtividade da água na produção de silagem de milho, **Revista Irriga**, v. 1, n. 1, p. 192-205, 2012.
- MARTÍNEZ, E. A., VEAS, E., JORQUERA, C., SAN MARTÍN, R., E JARA, P. Re-introduction of Quinoa into arid Chile: cultivation of two lowland races under extremely low irrigation. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v.195, n. 1, p. 1-10, 2009.
- MATOS, F. S.; OLIVERIA, L. R.; FREITAS, R. G.; EVARISTO, A.B.; MISSIO, R. F.; CANO, M. A. O. Physiological characterization of leaf senescence of *Jatropha curcas* L. populations. **Biomass and Bioenergy**, v.45, p.57-64, 2012.
- MEGURO, M.; ITO, H.; TAKABAYASHI, A.; TANAKA, R.; TANAKA, A. Identification of the 7-hydroxymethyl chlorophyll a reductase of the chlorophyll cycle in Arabidopsis. **The Plant Cell**, v. 23, p. 3442–3453, 2011.
- MESSINGER, S. M.; BUCKLEY, T. N.; MOTT, K. A. Evidence for involvement of photosynthetic processes in the stomatal response to CO₂. **Plant Physiology**, v. 140, n. 2, p. 771-778, 2006.
- MIRANDA, M.; VEGA-GALVEZ, A.; LOPEZ, J.; PARADA, G.; SANDERS, M.; ARANDA, M.; URIBE, E.; SCAL, K. D. Impact of air-drying temperature on nutritional properties, total phenolic content and antioxidant capacity of quinoa seeds (*Chenopodium quinoa* Willd.). **Industrial Crops and Products**, v.32, n. 3, p. 258–263, 2010.
- MONTEIRO, J. E. B. A. **Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola.** Brasília. 1. ed. DF: INMET, 2009. 530p.
- MORENO, L. P. F. Respuesta de las plantas al estrés por déficit hídrico. **Una revisión. Agronomía Colombiana**, Bogotá, v. 27, n. 2, p. 179-191, 2009.
- MUJICA-SANCHEZ, IZQUIERDO, J.; JACOBSEN, S. Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.): ancestral cultivo andino, alimento del presente y del futuro. **Santiago: FAO**, 2001.

NETTO, A. O. A.; RODRIGUES, J. D.; PINHO, S. Z. Análise de crescimento na cultura da batata submetida a diferentes lâminas de irrigação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.35, n. 5, p. 901-907, 2000.

NOGUE'S, S.; ALLEN, D. J.; MORISON, J. I. L.; BAKER, N. R. Ultraviolet-B radiation effects on water relations, leaf development and photosynthesis in droughted pea plants. **Plant Physiology**, v. 117, n. 1. p. 173–181, 1998.

OBANDA, M.; OWUOR, P.O. Flavanol composition and caffeine content of green leaf as quality potential indicators of Kenyan black teas. **Journal of the Science of Food and Agriculture**. v.74, n. 2, p. 209-215, 1997.

OLIVEIRA, E. C.; CARVALHO, J. A.; REZENDE, F. C.; FREITAS, W. A. Viabilidade técnica e econômica da produção de ervilha (*Pisum sativum* L.) cultivada sob diferentes lâminas de irrigação. **Engenharia Agrícola**, v.31, n. 2, p.324-33, 2011.

OLIVEIRA VR; LEITE DL; SANTOS CAF; COSTA ND; MELO PCT. 2003. Sistemas de produção de cebola (*Allium cepa* L). **Planta Daninha**, 21, n.3, p.387-396, 2003.

OLIVEIRA, M. A. J. D.; BOVI, M. L. A.; MACHADO, E. C.; GOMES, M. M. D. A.; HABERMANN, G.; RODRIGUES, J. D. Fotossíntese, condutância estomática, e transpiração em pupunheira sob deficiência hídrica. **Scientia Agricola**, v.59, n. 1, p.59-63, 2002.

OUKARROUM, A. MADIDI, E. L. S.; SCHANSKER, G.; STRASSER, R. J. . Probing the responses of barley cultivars (*Hordeum vulgare* L.) by chlorophyll a fluorescence OLKJIP under drought stress and re-watering. **Environmental and Experimental Botany**, Elmsford, v.60, n.3, p.438-446, 2007.

PÁSKO, P.; BARTON, H.; ZAGRODZKI, P.; GORINSTEIN, S.; FOLTA, M.; ZACHWIEJA, Z. Anthocyanins, total polyphenols and antioxidante activity in amaranth and quinoa seeds and sprouts during their growth. **Food Chemistry**, v. 115, n. 3, p. 994-998, 2009.

PERCIVAL, G. C.; SHERIFFS, C. N. Identification of drought-tolerant woody perennials using chlorophyll fluorescence. **Journal of Arboriculture**, v. 28, n. 5, p. 215–223, 2002.

PEREIRA, L.S.; CORDERY, I.; IACOVOS, I. Improved indicators of water use performance and productivity for sustainable water conservation and saving. **Agricultural Water Management**, v.108, n. 1, p.39-51, 2012.

PETERSON, A. J. **Salinity tolerance and nitrogen use efficiency of quinoa for, (May). Quinoa: improvement and sustainable production.** 4 ed. Washington, 2013. 204p.

PIMENTEL, C. **A relação da planta com a água.** Rio de Janeiro: EDUR, 2004, 191 p. 2015.

PODSEDEK, A. Natural antioxidants and antioxidant capacity of Brassica vegetables: A review. **LWT-Food Science.Technology**, v. 40, n. 1, p. 1-11, 2007.

RAMAKRISHNA, A.; RAVISHANKAR, G. A. Influence of abiotic stress signals on secondary metabolites in plants. **Plant Signaling & Behavior**, v. 6, n. 11, p. 1720-1731, 2011.

REICHARDT, K.; TIMM L. C.; **Solo, planta e atmosfera: Conceitos, processos e aplicações.** 2.ed. Barueri : Manole, 2004. 478p.

RÊGO, V. M. **Desenvolvimento e produção de quinoa sob irrigação e adubação potássica.** 2015. 94 f. Dissertação (Mestrado em Mestre em Engenharia Agrícola) - Instituto de Ciências Agrárias e Tecnológicas, UFMG, Rondonópolis, 2015.

REN, G.; ZHOU, Q.; WU, S.; ZHANG, Y.; ZHANG, L.; HUANG, J.; SUN, Z.; KUAI, B. Reverse genetic identification of CRN1 and its distinctive role in chlorophyll degradation in Arabidopsis. **Journal of Integrative Plant Biology**, v. 52, n. 5, p 496–504, 2010.

RESCK, D. V. S.; FERREIRA, E. A. B.; FIGUEIREDO, C. D.; ZINN, Y. L. Dinâmica da matéria orgânica no Cerrado. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais.** 2008, p.359-417.

RISI, C.; GALWEY, N. W. Os grãos de *Chenopodium* dos Andes: culturas Inca para a agricultura moderna. **Advanced. Applied Biology**, v.10 , n.1, p.145–216, 1984.

RUIZ, K. B.; BIONDI, S., OSES, R.; ACUÑA-RODRÍGUEZ, I. S.; ANTOGNONI, F.; MARTINEZ-MOSQUEIRA, E. A.; BAZILE, D. Quinoa biodiversity and sustainability for food security under climate change. A review. **Agronomy for sustainable development**, v. 34, n. 2, p. 349-359, 2014.

SAINT PIERRE C. S.; CROSSA J.L.; BONNETT D.; YAMAGUCHI-SHINOZAKI K.; REYNOLDS M. P. Phenotyping transgenic wheat for drought resistance. **Journal of Experimental Botany**. v. 63, n. 5, p.1799-1808, 2012.

SÁNCHEZ-RODRÍGUEZ, E.; MORENO, D. A.; FERRERES, F.; RUBIO-WILHELMI, M. M.; RUIZ, J. M. Differential responses of five cherry tomato varieties to water stress: changes on phenolic metabolites and related enzymes. **Phytochemistry**, v. 72, n. 8, p.723–729, 2011.

SANO, E. E.; ROSA, R.; BRITO, J. L. S.; FERREIRA, L. G.; BEZERRA, H. D. S. Mapeamento da Cobertura vegetal natural e antropica do bioma Cerrado por meio de imagens Landsat. In: XIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2009, Natal. **Anais...** Natal, 2009, p. 1199-1206.

SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P.; RIBEIRO, J. F. **Cerrado: ecologia e flora**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, v. 2, p. 1279, 2008.

SCHAFFERT, R. E.; ALBUQUERQUE, P. E. P.; DUARTE, J. O.; GARCIA, J. C.; GOMIDE, R. L.; GUIMARAES, C. T.; MAGALHAES, P. C.; MAGALHAES, J. V.; QUEIROZ, V. A. V. Phenotyping sorghum for adaptativ on to drought. In: Drought phenotyping in crops: from theory to practice, 2011, México. 2011, p. 287-299.

SCHELBERT, S.; AUBRY, S.; BURLA, B.; AGNE, B.; KESSLER, F.; KRUPINSKA, K.; HÖRTENSTEINER, S. Pheophytin pheophorbide hydrolase (pheophytinase) is involved in chlorophyll breakdown during leaf senescence in Arabidopsis. **The Plant Cell**, v. 21, n. 3, p. 767– 785, 2009.

SELMAR, D.; KLEINWÄCHTER, M. Influencing the product quality by deliberately applying drought stress during the cultivation of medicinal plants. **Industrial Crop Production**, v. 42, n. 1, p.558–566, 2013.

SHAO, Hong-bo et al. Higher plant antioxidants and redox signaling under environmental stresses. **Comptes Rendus Biologies**, v. 331, n. 6, p. 433-441, 2008.

SHIMAZAKI, K. I.; DOI, M.; ASMANN, S. M.; KINOSHITA, T. Light regulation of stomatal movement. **Annual Review of Plant Biology**, v. 58, n. 1, p. 219-247, 2007.

SILVA, A. O.; SILVA, E. F. F; KLAR, A. E. Eficiência de uso da água em cultivares de beterraba submetidas a diferentes tensões da água no solo. **Water Resources and Irrigation Management**, v. 2, n. 1, p. 27-36, 2013.

SILVA, A. R. A.; BEZERRA, F. M. L.; SOUSA, C. C. M.; PEREIRA FILHO, J. V.; FREITAS, C. A. S. Desempenho de cultivares de girassol sob diferentes lâminas de irrigação no Vale do Curu, CE. *Revista Ciência Agronômica*, v.42, n. 1, p.57-64, 2011.

SILVA, D. B.; SILVA, J. A.; JUNQUEIRA, N. T. V.; ANDRADE, L. R. M. **Frutas do cerrado**. Brasília: Embrapa Informações Tecnológica, 2001. 179p.

SILVA, F. A. M. da; EVANGELISTA, B. A.; OLIVEIRA, A. D. de; MULLER A. G.; **Climatologia da estação principal da Embrapa Cerrados: 1974 a 2013.** Brasília: Embrapa, 2016.

SILVA, L. D. A.; BRITO, M. E.; DA S, S.; FRANCISCO, V.; MOREIRA, R. C.; SOARES FILHO, W. D. S.; FERNANDES, P. D. Mecanismos fisiológicos em híbridos de citros sob estresse salino em cultivo hidropônico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, (Suplemento), p. S1–S7, 2014.

SILVA, M. L. C. S.; COSTA, R. S; SANTANA, A. S.; KOBLITZ, M. G. B. Compostos fenólicos, carotenóides e atividade antioxidante em produtos vegetais. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 31, n. 3, p. 669-682, 2010.

SOUSA, D. M. G.; REIN, T. A.; GOEDERT, W. J.; LOBATO, E.; NUNES, R. S. Fósforo. In: PROCHNOW, L. I.; CASARIN, V.; STIPP, S. R., EDS. Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes: Nutrientes. 2010, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: IPNI, 2010. v. 2. p. 67-132

SPEHAR, C. R.; SILVA ROCHA, J. E.; BARROS SANTOS, R. L. Desempenho agrônomico e recomendações para cultivo de quinoa (BRS Syetetuba) no Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 41, n. 1, p. 145-147, 2011.

SPEHAR, C. R. Adaptação da quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) para incrementar a diversidade agrícola e alimentar no Brasil. **Cadernos de Ciencia & Tecnologia**, v. 23, n.1, p.41-62, 2006.

SPEHAR, C. R.; SANTOS, R. L. B. Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) BRS Piabiru: alternativa para diversificar os sistemas de produção de grãos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 6, p. 889-893, 2002.

STREIT, N. M.; CANTERLE, L. P.; CANTO, M. W.; HECKTHEUER, L. H. H. The Chlorophylls. **Ciência Rural**, v.35, n.3, p.748-755, 2005.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 4.ed. Porto Alegre: Artes Médicas, 2010. 739 p.

TANG, Y.; LI, X.; ZHANG, B.; CHEN, P.X.; LIU, R.; TSAO, R. Characterisation of phenolics, betanins and antioxidant activities in seeds of three *Chenopodium quinoa* Willd. genotypes. **Food Chemistry**, v. 166, n. 1, p. 380-388. 2015.

TODAKA, D.; NAKASHIMA, K.; SHINOZAKI, K.; YAMAGUCHI-SHINOZAKI, K. Toward understanding transcriptional regulatory networks in abiotic stress responses and tolerance in rice. **Rice**, v. 5, n. 1, p. 6, 2012.

TORELLO, W. A.; RICE, L. A. Effects of Na Cl stress on proline and cation accumulation in salt sensitive and tolerant turfgrasses. **Plant and Soil**, v.93, n. 2, p.241-247, 1986.

TOPAK, R.; SÜHERI, S.; ACAR, B. Comparison of energy of irrigation regimes in sugar beet production in a semi-arid region. **Energy**, v.35, n. 12, p.5464-5471, 2010.

VACHER, J. J. Responses of two main Andean crops, quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) and papa amarga (*Solanum juzepczukii* Buk.) to drought on the Bolivian Altiplano: significance of local adaptation. **Agriculture Ecosystems & Environment** v.68, n. 1-2, p.99–108, 1998.

VEGA-GÁLVEZ, A. V.; MIRANDA, M.; VERGARA, J.; URIBE, E.; PUENTE, L.; MARTÍNEZ, E. A. Nutrition facts and functional potential of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.), an ancient Andean grain: a review. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 90, n. 15, p. 2541-2547, 2010.

XOCONOSTLE-CAZARES, B.; RAMIREZ-ORTEGA, F. A.; FLORES-ELENES, L.; RUIZ-MEDRANO, R. Drought tolerance in crop plants. **Am Jounal Plant Physiology**, v. 5, n. 5, p. 1-16, 2010.

ZAHIR, A.; ABBASI, B. H.; ADIL, M.; ANJUM, S.; ZIA, M.; UL-HAQ, I. Synergistic effects of drought stress and photoperiods on phenology and secondary metabolism of *Silybum marianum*. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, v.174, n.2, 693–707, 2014.

ZHANG, B. FENG, G.; READ, J. J.; KONG, X.; OUYANG, Y.; ADELI, A.; JENKINS, J. N. Simulating soybean productivity under rainfed conditions for major soil types using APEX model in East Central Mississippi. **Agricultural Water Management**, v. 177, p. 379-391, 2016.

ZURITA-SILVA, A. FUENTES, F.; ZAMORA, P.; JACOBSEN, S. E.; SCHWEMBER, A. R. Reproductive Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.): Potential and perspectives. **Molecular Creation**, v. 34, n. 1, p. 13-30, 2014.

WAHLI, C. Quínuá: hacias u cultivo comercial. Quito: Latirencó S. A, 1990. p. 206.

WINKEL-SHIRLEY, B. Biosynthesis of flavonoids and effects of stress. **Current Opinion in Plant Biology**, v. 5, n.3, 218–223, 2002.

YILDIZ-AKTAS, L.; DAGNON, S.; GUREL, A.; GESHEVA, E.; EDREVA, A. Drought Tolerance in Cotton: Involvement of Non-enzymatic ROS-Scavenging Compounds. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v.195, n.15, p.247-2009.

CAPÍTULO I

CARACTERÍSTICAS AGRONÔMICAS E QUALIDADE DE GRÃOS DE GENÓTIPOS ELITES DE QUINOA SUBMETIDOS A REGIMES HÍDRICOS VARIÁVEIS

RESUMO

Como os recursos hídricos vêm se tornando cada vez mais escassos, o desenvolvimento de genótipos e a inclusão de novas culturas tolerantes a seca (TS) para o cultivo em safrinha e eficientes no uso de água (EUA) para o cultivo no inverno, passa a ser prioridade. Deste modo, a quinoa é uma excelente candidata à diversificação do sistema agrícola do Cerrado para cultivo no período da safrinha e entressafra devido ao seu bom desenvolvimento em condições de limitações ambientais e apresenta estratégias de adaptação ao déficit hídrico. Diante disso, este trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho agrônômico e a qualidade funcional dos grãos de quinoa submetidos a regimes hídricos variáveis. O experimento foi conduzido em uma área experimental da Embrapa Cerrados - Planaltina DF. O delineamento experimental foi em blocos casualizados, com 4 repetições, em parcelas subdivididas, sendo a parcela principal os genótipos de quinoa e a sub-parcela os níveis de água. As parcelas foram compostas por 18 genótipos de quinoa e a cultivar BRS Piabiru precoce; as sub-parcelas foram compostas por quatro regimes hídricos (150, 247, 389 e 480 mm) nos quais foram avaliados a altura, os polifenóis, os flavonóides e as antocianinas. A avaliação da produtividade e EUA dos grãos de quinoa foi realizada em sete regimes hídricos (128, 160, 218, 309, 376, 433 e 483 mm). Para a aplicação dos diferentes níveis de água foi utilizado o sistema denominado *line source sprinkler system* modificado, utilizando-se uma barra irrigadora tracionada por um carretel autopropelido em que cada aspersor tenha uma vazão, gerando uma irrigação em gradientes de forma decrescente do centro para as extremidades do experimento. Os 18 genótipos e a cultivar foram avaliados quanto às respostas agrônômica, morfológica e funcional. A análise estatística foi realizada pela análise de variância. Para a comparação das médias foi utilizado o teste de Scott-knott, ao nível de probabilidade de 5%. Os genótipos CPAC 3, CPAC 6, CPAC 12, CPAC 13 e CPAC 17 mostraram alto potencial produtivo e EUA. Os RHs 483, 433 e 376 mm, como eram de se esperar, promoveram maior produtividade. O CPAC 11 apresentou a menor produtividade e baixa EUA em regimes superiores. Na avaliação dos RHs observa-se de um modo geral que a maior EUA ocorre entre 218 e 319 mm dependendo do material. O CPAC 11 apresentou a menor altura de plantas, diferindo-se dos demais. Os RHs influenciaram a altura de plantas até o RH de 389 mm. O regime hídrico com estresse moderado (376 mm) de modo geral pode ser indicado como o mais adequado para o cultivo de quinoa sob irrigação no Cerrado. E os genótipos que se destacaram tanto em produtividade quanto em EUA foram o CPAC 6 e o CPAC 13. O CPAC 11 foi o genótipo que apresentou menor altura de plantas. O CPAC 9 apresentou o maior acúmulo de flavonóides e antocianinas em todos os RHs estudados.

Palavras-chave: *Chenopodium quinoa* Willd., Tolerância à seca, Responsividade à irrigação.

AGRONOMIC CHARACTERISTICS AND GRAIN QUALITY OF QUINOA ELITE GENOTYPES SUBMITTED TO VARIABLE WATER REGIMES

ABSTRACT

As water resources are becoming increasingly scarce, the development of genotypes and the inclusion of new drought-tolerant (TS) crops for safflower and water-efficient (WUE) crops for winter be a priority. Therefore, quinoa is an excellent candidate for the diversification of the Cerrado agricultural system for cultivation in the out-of-season crop and off-season due to its good development under conditions of environmental limitations and presents strategies to adapt to the water deficit. Therefore, this work aims to evaluate the agronomic performance and the functional quality of the quinoa grains submitted to variable water regimes. The experiment was conducted in an experimental area of Embrapa Cerrados - Planaltina DF. The experimental design was in randomized blocks, with 4 replications, in subdivided plots, the main plot being the quinoa genotypes and the subplot water levels. The plots were composed of 18 quinoa genotypes and the BRS Piabiru precocious cultivar; the subplots were composed of four water regimes (150, 247, 389 and 480 mm) in which height, polyphenols, flavonoids and anthocyanins were evaluated. The evaluation of the productivity and WUE of the quinoa grains was carried out in seven water regimes (128, 160, 218, 309, 376, 433 and 483 mm). For the application of the different water levels, the modified *line source sprinkler system* was used, using an irrigation bar drawn by a self-propelled spool in which each sprinkler has a flow, generating irrigation in decreasing gradients from the center to the ends of the experiment. The genotypes and the cultivar were evaluated for agronomic, morphological and functional responses. Statistical analysis was performed by analysis of variance. Scott-Knott test was used to compare the averages, at the probability level of 5%. The genotypes CPAC 3, CPAC 6, CPAC 12, CPAC 13 and CPAC 17 showed high productive potential and WUE. The RH 483, 433 and 376 mm, as expected, promoted higher productivity. CPAC 11 showed the lowest productivity and lower WUE in higher regimes. In the evaluation of RHs it is generally observed that the largest WUE occurs between 218 and 319 mm depending on the material. CPAC 11 presented the lowest plant height, differing from the others. RHs influenced plant height up to 389 mm RH. The water regime with moderate stress (376 mm) can be indicated as the most suitable for the cultivation of quinoa under irrigation in the Cerrado. And the genotypes that stood out in both productivity and in the USA were CPAC 6 and CPAC 13. CPAC 11 was the genotype that presented lower plant height. CPAC 9 presented the highest accumulation of flavonoids and anthocyanins in all studied RHs.

Key words: *Chenopodium quinoa* Willd., Drought tolerance, Responsiveness to irrigation.

3.1 INTRODUÇÃO

Há vários fatores ambientais que afetam o desenvolvimento e a produtividade das culturas, dentre eles, a restrição hídrica é a mais importante limitação à produtividade agrícola (MATOS, et al., 2017) e, aproximadamente, 35% da superfície terrestre é considerada árida ou semi-árida, sem precipitação ou suprimento hídrico abaixo do necessário para a maioria das espécies cultivadas (DIAZ-LÓPEZ et al., 2012). Por outro lado, há regiões, como no Cerrado, que não são consideradas áridas, mas tem um período chuvoso com veranicos e deve-se selecionar plantas tolerantes à seca para o cultivo nessas áreas. Neste mesmo bioma, as culturas podem ser cultivadas sob irrigação no inverno em que praticamente não há precipitação pluviométrica o que exige a seleção de plantas com maior eficiência do uso de água.

Nessa situação, a obtenção de genótipos mais adaptados às condições edafoclimáticas estressantes, com capacidade de resistir a períodos com deficiência hídrica sem grandes prejuízos à produção, torna-se de fundamental importância para os programas de melhoramento genético de plantas, uma vez que esse processo auxilia na escolha de critérios de seleção de genótipos com maior tolerância à seca e/ou maior eficiência do uso da água (FERRÃO et al., 2016).

A quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) é um pseudocereal muito utilizado como suplemento alimentar, pois contém maiores teores de proteína total, metionina e lisina que cereais tradicionais, como arroz, milho, cevada e trigo; além disso, possui em sua composição lipídica ácidos graxos semelhantes àqueles do óleo de soja (SPEHAR, 2007) e elevada capacidade antioxidante devido, principalmente, ao seu teor de compostos fenólicos e flavonóides, assim como vitaminas E e C (MIRANDA et al., 2010). Ademais, atende, também, à crescente demanda por alimentos equilibrados e funcionais, relacionada à busca de

alternativas dietéticas, como a ausência de glúten. Com estas propriedades, a quinoa tem sido demandada mundialmente, o que tem levado à expansão de seu cultivo, inclusive como alternativa aos cultivos comerciais (SPEAHR et al., 2011).

A quinoa tem sido cultivada há milênios com bom desenvolvimento em condições de limitações ambientais e apresenta estratégias de adaptação ao déficit hídrico, tanto fisiológicas quanto morfológicas (SILVA et al., 2014) e vem sendo cultivada em diferentes zonas agroclimáticas por possuir mecanismos de adaptação aos mais variados ambientes, em consequência da elevada variabilidade genética da espécie. Todos estes aspectos positivos fazem com que a quinoa seja uma excelente cultura para a diversificação do sistema agrícola do Cerrado para cultivo em safrinha e inverno sob irrigação.

No Brasil, desde 1990 são realizadas pesquisas pela Embrapa Cerrados para adaptação desse grão ao cultivo no país com o intuito de diversificar o sistema de produção no Cerrado, que ainda hoje se baseia em poucas espécies. De maneira que, após várias seleções, surgiu a primeira variedade BRS Piabiru (SPEHAR e SANTOS, 2002), para cultivo granífero no Brasil adaptada às condições do Cerrado, com excelentes rendimentos agronômicos. Essa variedade foi originada da linhagem EC 3, selecionada a partir de uma população procedente de Quito, Equador (SPEHAR e SANTOS, 2002).

Os plantios de quinoa na safra não são recomendados, devido à maior disponibilidade hídrica neste período, pois a ocorrência de chuvas na colheita pode resultar em germinação das sementes na panícula, pelo fato delas perderem ou ganharem umidade com rapidez (SPEHAR et al., 2007). Para a produção de grãos, a melhor época de plantio é na safrinha, entre os meses de fevereiro e maio (SPEHAR et al., 2013), visando o cultivo de plantas em sequeiro, o que neste caso requer genótipos mais tolerantes à seca, uma vez que a disponibilidade de água neste período é limitada. Ou no inverno sob cultivo irrigado, entre maio e setembro, exigindo para esse período genótipos mais eficientes no uso da água.

Atualmente, várias pesquisas vêm sendo feitas pela Embrapa Cerrados para incrementar o cultivo da quinoa na região do Cerrado para o período de safrinha e para cultivo irrigado, no inverno. Diante disso, este estudo tem como objetivo avaliar o desempenho agrônômico e a qualidade funcional dos grãos de genótipos de quinoa oriundos da variabilidade existente dentro da cultivar, BRS Piabiru, submetidos a regimes hídricos variáveis, para que a partir destes possam ser lançadas cultivares precoces, homogêneas com características morfológicas bem definidas e com maior tolerância à seca para o cultivo em safrinha e mais eficientes no uso da água para o cultivo irrigado na entressafra.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1 Caracterização da área experimental

O experimento foi conduzido entre maio e setembro de 2017 na área experimental da Embrapa Cerrados - Planaltina DF, cujas coordenadas geográficas são: 15°35'30" (Latitude Sul) 47°42'30" (Longitude Oeste). Na Figura 2 é apresentada uma visão geral da área experimental.

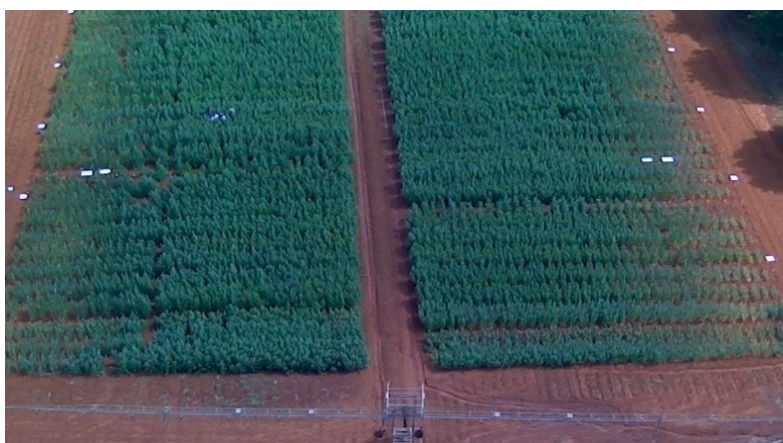


Figura 2: Visão geral da área experimental com irrigações em gradiente, por meio de imagem com drone.

O clima da região é classificado como Aw, segundo classificação de Köppen (Alvares et al. (2013) com duas estações bem definidas (seca e chuvosa). A temperatura média anual é de 21°C e a precipitação pluviométrica média de 1.500 mm. O verão é quente e úmido, com a ocorrência de períodos de estiagem durante a estação chuvosa (veranicos). No inverno ocorre déficit hídrico, baixa temperatura e baixa umidade. O experimento foi conduzido no inverno sob diferentes regimes hídricos devido a não ocorrência de chuvas nesse período, o que possibilitou o controle efetivo das lâminas de água aplicadas. Os dados de temperaturas médias mensais e precipitação pluviométrica acumulada durante o período do experimento foram coletados na estação meteorológica da Embrapa Cerrados, localizada ao lado da área experimental (Figura 3).

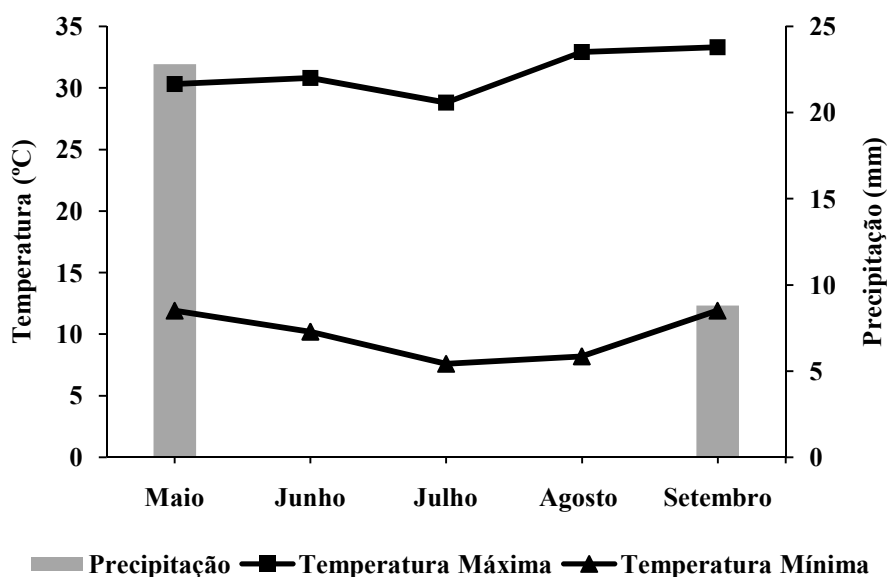


Figura 3. Precipitação pluviométrica e temperaturas máximas e mínimas ocorridas na área experimental nos meses de maio a setembro de 2017.

O solo da área experimental é classificado como LATOSSOLO VERMELHO distrófico típico, fase Cerrado tropical subcaducifólio, relevo suave-ondulado, de textura argilosa (SANTOS et al., 2013) e apresenta as seguintes características na camada de 0-20 e 20-40cm: pH (em água) = 5,71 e 5,55; Ca ($\text{cmo}_c \text{dm}^{-3}$) = 2,71 e 2,15; Mg ($\text{cmo}_c \text{dm}^{-3}$) =

0,85 e 1,39; K (mg dm^{-3}) = 56 e 180; H + Al ($\text{cmo}_c \text{dm}^{-3}$) = 5,27 e 5,40; P (mg dm^{-3}) = 22,87 e 6,0; Matéria orgânica (%) = 2,47 e 1,93, respectivamente. Nos últimos 03 anos a área experimental foi cultivada somente com quinoa no inverno e pousio no período chuvoso.

3.2.2 Delineamento experimental e condução do experimento

O experimento foi constituído por 18 genótipos elites de quinoa (CPAC 1, CPAC 2, CPAC 3, CPAC 4, CPAC 5, CPAC 6, CPAC 8, CPAC 9, CPAC 10, CPAC 11, CPAC 12, CPAC 13, CPAC 14, CPAC 16, CPAC 17, CPAC 18, CPAC 19 e CPAC 20) e a variedade BRS Piabiru, com o total de 19 materiais. Os genótipos são oriundos da variedade BRS Piabiru, a partir de 980 materiais, conforme descrito por Ribeiro Junior et al. (2013), que possui alta variabilidade genética. Para a seleção dos 18 genótipos, foram feitos testes preliminares com os 980 materiais cultivados anteriormente na cidade de Cristalina-GO, com potencial para ciclo precoce e estes materiais foram semeados nos períodos de safrinha e inverno nos anos de 2011, 2012, 2013 e 2014. Foram avaliadas características morfológicas para se obter os descritores morfológicos dos genótipos selecionados (Tabela 1) e, a partir do ano de 2015, foram selecionados 18 acessos de ciclo igual ou inferior a 110 dias, com sementes de tamanho superior a 2 mm de diâmetro (Grãos Tipo 1).

O delineamento experimental foi em blocos casualizados, com parcelas subdivididas, com quatro repetições; a parcela principal foi composta pelos genótipos de quinoa e a sub-parcela pelos regimes hídricos (RH). As parcelas foram compostas por 18 genótipos de quinoa e a BRS Piabiru, e as sub-parcelas foram compostas por 4 regimes hídricos 150, 247, 389 e 480 mm nos quais foram avaliados as variáveis altura de plantas, polifenóis, flavonóides e antocianinas. A produtividade foi avaliada em sete regimes 128, 160, 218, 309,

376, 433 e 483 mm, devido às plantas terem sido colhidas em uma área útil de 2,5 m², resultando em sete subparcelas, que corresponderam aos setes regimes anteriores.

O preparo da área foi realizado em sistema de plantio convencional, com uma gradagem e grade niveladora. A adubação de base foi feita nos sulcos na dose de 400 kg/ha da fórmula 04-30-16 (NPK). A semeadura nas parcelas foi realizada manualmente na última semana de maio de 2017, com densidade de semeadura de aproximadamente 0,7 gramas de sementes por metro linear. A elevada taxa de semeadura utilizada foi feita para se evitar a desuniformidade do stand final devido a possíveis falhas na germinação. Foi feito o desbaste aos 25 dias após a emergência (DAE), para se obter um stand final de 20 plantas/m.

A adubação nitrogenada de cobertura foi feita a lanço aos 30 dias após a emergência das plântulas, na dose de 100 kg.ha⁻¹ N, na forma de ureia. Para evitar a competição das eventuais plantas invasoras, foram realizadas capinas manuais.

Os regimes de água foram obtidos utilizando o sistema denominado *line source sprinkler system* (HANKS et al., 1976), modificado, utilizando uma barra irrigadora de 40 m de largura, modelo 36/42 (Irriga Brasil, Pinhais, PR, Brasil), tracionada por um carretel auto propelido em que cada aspensor tenha uma vazão, gerando uma irrigação em gradientes de forma decrescente do centro para as extremidades do experimento, conforme descrito por Jayme-Oliveira et al. (2017).

A primeira irrigação foi feita um dia após a semeadura e até os 30 DAE todos os tratamentos receberam regime hídrico uniforme em média a cada 3 dias. Foram realizadas 12 irrigações, totalizando uma lâmina de 126 mm. A partir dos 30 DAE, foi feita a aplicação, com turno de rega de 5 dias, de lâminas com taxa variável de (24, 121, 263 e 354 mm) e (2, 34, 92, 183, 250, 307 e 357mm) que foram somadas à lâmina uniforme de 126 mm, totalizando, (150, 247, 389 e 480 mm) e (128, 160, 218, 309, 376, 433 e 483 mm)

representando os regimes hídricos. Nessa fase, foram realizadas 10 irrigações. A medição do volume de água aplicado em cada irrigação foi controlada por uma fileira de coletores instalados a cada metro linear paralelo a linha de irrigação.

As irrigações foram realizadas conforme descrito no programa de monitoramento de irrigação no Cerrado (EMBRAPA, 2011), utilizando-se como referência a cultura do trigo, os indicadores agrometeorológicos da região, o tipo de solo e a data de germinação plena.

3.2.3 Variáveis analisadas

O potencial agronômico e de qualidade dos grãos dos genótipos e da Piabiru foram avaliados por meio da produtividade dos grãos, altura de plantas, polifenóis, flavonóides e antocianinas totais.

A avaliação da produtividade dos grãos de quinoa foi realizada em sete regimes hídricos (128, 160, 218, 309, 376, 433 e 483 mm). As panículas foram colhidas de forma manual, e posteriormente trilhadas em uma ceifeira debulhadora de parcelas da marca Wintersteiger. Em cada parcela, foi colhida uma área útil de 2,5 m². A massa total de grãos foi pesada e retirada uma subamostra de peso médio para determinação do teor de água dos grãos, utilizando o equipamento Gehaka G800i. A umidade dos grãos foi corrigida para 13% e os resultados foram expressos em t.ha⁻¹. A eficiência de uso da água aplicada (EUA) foi determinada pela razão entre a produtividade e a quantidade de água aplicada durante todo o período de cultivo. Os resultados foram expressos em kg ha⁻¹mm⁻¹.

Foi avaliada a altura de plantas dos genótipos em quatro regimes hídricos (150, 249, 389 e 480 mm) aos 60 dias após a emergência, no florescimento pleno da cultura. A altura de

plantas foi mensurada da base até o ápice de sua inflorescência por meio de uma trena métrica de 3m, e foram avaliadas cinco plantas por subparcela.

O acúmulo de polifenóis extraíveis totais foi determinado por meio do reagente de Folin-Ciocalteu, utilizando uma curva padrão de ácido gálico como referência, conforme metodologia descrita por Larrauri et al. (1997). Os teores de antocianinas foram determinados conforme Lees e Francis (1972) e flavonóides totais segundo Obanda e Owuor (1997). Essas variáveis foram avaliadas nos quatro regimes hídricos (150, 249, 389 e 480 mm). Os resultados foram expressos em mg/100g de grãos de quinoa.

3.2.4 Análise estatística

A análise estatística foi realizada pela análise de variância (ANOVA). O modelo estatístico foi ajustado utilizando-se o procmixed do SAS, por meio do método de máxima verossimilhança restrita (reml). As fontes de variação foram os genótipos (parcelas), os regimes hídricos (subparcelas) e suas interações. A comparação das médias foi feita pelo teste de Scott-Knott, ao nível de probabilidade de 5%. Para as interações não significativas, foi feito o ajuste de equações de regressão para o fator regime hídrico. As análises estatísticas foram realizadas com o software estatístico SAS versão 9 (SAS, 2008) e os gráficos foram feitos utilizando-se o software SigmaPlot, versão 10 (SYSTAT SOFTWARE, 2006).

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Todas as variáveis estudadas apresentaram resíduos normais de acordo com o teste de Shapiro-Wilk a 5% de significância. O resumo das análises das variâncias das respostas

agronômicas e funcionais, produtividade, altura de plantas, polifenóis, flavonóides e antocianinas em função dos genótipos e regimes hídricos estão apresentadas na Tabela 2.

Houve interação altamente significativa $p (< 0,01)$ entre os genótipos de quinoa e os regimes hídricos para a produtividade, EUA, polifenóis, flavonóides e antocianinas totais (Tabela 2). Não foi verificada interação entre os fatores para variável altura de plantas.

Tabela 2 - Resumo da análise de variância com valores de F e coeficiente de variação para produtividade (Prod), eficiência do uso da água (EUA), altura, polifenóis (Poli), flavonóides (Flav) e antocianinas (Ant) em genótipos de quinoa em função dos regimes hídricos.

FV	Prod	EUA	Altura	Poli	Fla	Ant
Genótipos (G)	9,60**	17,62**	12,06**	47,10**	48,99**	104,17**
Regime Hídrico (RH)	1302,2**	273,32**	85,06**	6,31**	43,54**	33,72**
G*RH	3,47**	5,71**	0,98 ^{ns}	3,38**	13,28**	11,15**
CV	12,94	11,12	10,48	13,67	11,66	11,95

FV= Fonte de variação; CV= Coeficiente de variação; ns – não significativo ($p>0,05$); * – significativo ($p<0,05$); ** – significativo ($p<0,01$);

3.3.1 Produtividade

No presente trabalho, de maneira, geral os genótipos responderam de forma diferenciada aos regimes hídricos e apresentaram respostas e estratégias de adaptação diferentes às mesmas condições, demonstrando que o alto potencial produtivo, a elevada EUA e a responsividade à irrigação dependem do genótipo estudado.

Os valores de produtividade obtidos nesse trabalho foram bastante superiores a outros relatados na literatura (MARTÍNEZ et al., 2009, MUJICA et al., 2001, DELGADO et al., 2009). Essa diferença de produtividade pode estar relacionada com as condições climáticas, a disponibilidade hídrica proporcionada pelos diferentes regimes hídricos e os genótipos estudados.

Os RHs 483, 433 e 376 mm, como era de se esperar, promoveram maior produtividade, com 8,07, 8,16 e 7,88 t ha⁻¹, respectivamente, (Tabela 3) na média geral dos regimes. Assim, as menores produtividades foram obtidas nos RHs 160 e 128, em que a deficiência hídrica resultou em uma redução significativa de 73 e 88%, respectivamente, da produtividade comparada ao RH 483 mm. A menor produtividade desses genótipos quando submetidos ao déficit hídrico severo pode estar relacionada com a redução da expansão celular, o que reflete na diminuição da área foliar e, conseqüentemente, dos fotossintatos disponíveis para translocação em direção aos grãos (CONFALONE et al., 1998). Além do mais, o déficit hídrico pode afetar a utilização de carboidratos, por alterar basicamente, a eficiência com que os fotoassimilados são convertidos para o desenvolvimento de novas partes na planta (JORDAN, 1983).

Geerts et al. (2008) afirmaram que com metade da água de irrigação necessária, 1,2 a 2,0 t. ha⁻¹ de produção de sementes de quinoa podem ser obtidos quando a irrigação deficitária for usado no estágio vegetativo. Por outro lado, quando a estratégia de irrigação deficitária foi usada para todos os estágios fenológicos, resultou em uma redução de 75% no rendimento de sementes da cultivar de quinoa 'Belen 2000'.

Porém, os resultados obtidos por esses autores são diferentes aos obtidos no presente trabalho, uma vez que com redução de 55% da disponibilidade hídrica em todo o ciclo da cultura, a perda de produtividade média dos genótipos foi de 42%. Além disso, para os genótipos CPAC 3, CPAC 6, CPAC 9 e CPAC 12 essa redução de produtividade foi de 24, 30, 27 e 33% respectivamente, demonstrando maior tolerância à seca e maior eficiência no uso da água aplicada desses genótipos, uma vez que obtiveram produtividade de grãos superiores utilizando metade da água necessária para suprir a exigência hídrica da cultura. Vacher (1998) aponta que a quinoa sob estresse hídrico é capaz de melhorar a relação entre a

taxa fotossintética e a transpiração, mesmo com baixos potenciais de água nas folhas. Por outro lado, Yousfi et al. (2009) relataram que ao limitar a transpiração e o fechamento estomático, também podem melhorar a eficiência do uso da água da planta e, portanto, indiretamente influenciar a produtividade sob estresse hídrico, o que pode justificar a alta produtividade e a manutenção do potencial produtivo desses genótipos sob deficiência hídrica moderada.

Tabela 3. Produtividade (t. ha⁻¹) de 18 genótipos de quinoa e da BRS Piabiru precoce sob sete regimes hídricos (128, 160, 218, 309, 376, 433 e 483 mm).

Genótipos	Regimes hídricos (mm)							Média genótipos
	483	433	376	309	218	160	128	
CPAC1	7,82 aA	8,25 aA	8,34 bA	6,92cB	4,06bC	1,56bD	0,72aD	5,24c
CPAC 2	8,32aA	7,23 aA	7,89bA	6,20cB	3,94cC	1,83bD	1,44aD	5,22c
CPAC 3	8,02 aA	8,92aA	7,81bA	6,92bB	6,25aB	1,94bC	1,54aC	5,99a
CPAC 4	8,40 aA	8,11 aA	8,23bA	7,29bA	5,21aB	1,95bC	0,72aD	5,69b
CPAC 5	8,17 aA	8,14 aA	7,90bA	6,44cB	5,22aC	1,94bD	0,76aE	5,50b
CPAC 6	8,13 aA	8,50aA	8,84aA	7,98aA	5,68aB	2,46aC	0,88aD	6,06a
CPAC 8	7,49 aB	8,65 aA	7,07cB	6,14cC	4,50aC	1,58bD	0,52aE	5,12c
CPAC 9	7,94 aA	8,21 aA	7,01bA	6,89cB	5,75aB	2,11bC	0,73aD	5,58b
CPAC 10	7,86 aA	8,56 aA	8,36bA	6,84bB	5,12aC	2,61aD	0,67aE	5,72b
CPAC 11	5,36 bB	5,66 bA	6,80cA	6,58cA	5,40aB	2,38aC	1,28aE	4,89d
CPAC 12	8,73 aA	8,57 aA	7,83bA	7,09bB	5,82aC	2,58aD	1,11aE	5,96a
CPAC 13	8,74aB	8,85 aB	9,73aA	8,31aB	4,17bC	2,60aD	1,48aE	6,27a
CPAC 14	9,21aA	6,09 bB	6,51cB	5,72cB	3,88bC	1,61bD	1,26aD	4,90d
BRS Piabiru	8,77aA	7,58 aA	8,14bA	6,53cB	5,40aC	1,84bD	1,48aD	5,68b
CPAC 16	8,40aA	8,51 aA	7,46cB	6,84bB	4,74aC	2,33aD	1,16aE	5,64b
CPAC 17	8,41aA	8,92aA	8,44bA	6,77bB	4,80aC	3,64aD	0,58aE	5,94a
CPAC 18	7,95 aB	8,95aA	9,16aA	5,76cC	4,75aD	2,21bE	1,19aF	5,63b
CPAC 19	7,33 aA	7,72aA	6,42 cA	6,92bA	2,53cB	1,79bB	0,94aC	4,81d
CPAC 20	7,97aA	8,56aA	7,08cA	7,78aA	3,93bB	2,09bC	0,57aD	5,48b
Média RH	8,07A	8,16A	7,89A	6,72B	4,79C	2,16D	0,99E	

*Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna ou maiúscula na linha, não diferem entre si pelo Teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

Independente do regime hídrico (média de todos os níveis de irrigação), os genótipos CPAC 13, CPAC 6, CPAC 3, CPAC 12 e CPAC 17 foram os que apresentaram produtividade estatisticamente superior à variedade BRS Piabiru, de ciclo precoce, com média entre todos os regimes hídricos de 6,27, 6,06, 5,99, 5,96 e 5,94 t ha⁻¹, respectivamente (Tabela 3). Similarmente os genótipos de menores potenciais (CPAC 19, CPAC 11, CPAC 14), produziram em torno de 4,8 tha na média de todos os regimes hídricos (Tabela 3).

No maior regime (483 mm), os materiais não diferiram entre si, com exceção do CPAC 11 que apresentou a menor produtividade e baixa EUA (Tabelas 3 e 4), entretanto, este genótipo tem maior precocidade e porte baixo (Figura 4), e tem de ser testado com populações alternativas acima das populações atualmente recomendadas para o cultivo de quinoa a fim de aumentar o seu potencial produtivo.

Nos regimes intermediários (RH 376 e 309 mm) observa-se uma maior produtividade para os genótipos CPAC 6 e 13 nos dois regimes, e para o CPAC 18 e 20 no RH 376 e 309 mm, respectivamente (Tabela 3). No regime de 218 mm os genótipos CPAC 1 e CPAC 19 apresentaram a menor produtividade, diferenciando-se dos CPAC 2, CPAC 13, CPAC 18 e da Piabiru que apresentaram produtividade inferiores aos demais genótipos que tiveram os maiores desempenho produtivo neste regime. No regime de estresse severo (160 mm) os CPAC 6, CPAC 10, CPAC 11, CPAC 12, CPAC 13, CPAC 16 e CPAC 17 tiveram maior produtividade. Diante disso, podemos observar que o CPAC 6 e CPAC 13 apresentam alto desempenho produtivo tanto em maior quanto em menor disponibilidade hídrica (Tabela 3).

Estes materiais superiores poderiam ser recomendados em ambas as épocas de plantio, isto é, sequeiro e irrigado, principalmente o genótipo CPAC 6, que reduziu a produtividade somente no RH de 218 mm (Tabela 3). No qual, apresentou a maior EUA com uma produtividade de $26,7 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ de grãos, sendo este valor 32% superior a EUA no RH 483 mm, demonstrando menor responsividade à irrigação, mas maiores EUA (Tabela 4) em regimes moderados o que possibilita o cultivo deste genótipo em período safrinha. O genótipo CPAC 13 é um material com bom potencial produtivo, apresentando produtividade similar à Piabiru, na maior disponibilidade hídrica, sendo superior em regimes hídricos moderados (376 e 309 mm), com $9,73$ e $8,31 \text{ t ha}^{-1}$ para o CPAC 13 e $8,14$ e $6,53 \text{ ton ha}^{-1}$ para a Piabiru e no RH sob estresse (128 mm) com uma produtividade em t. ha^{-1} de $2,60$ e $1,84$ para o CPAC 13 e Piabiru, respectivamente.

Esse melhor desempenho do CPAC 6 e CPAC 13 sob condições de menor umidade do solo possivelmente, está relacionado a forte associação entre a assimilação de fotossintatos e melhor remobilização de carboidratos por genótipos tolerantes à seca o que permiti que mantenham uma alta produtividade, independentemente do teor de umidade do solo (SINGH, 1995). Sendo assim, podemos concluir que a intensidade e as conseqüências da deficiência hídrica nas mudanças do metabolismo das plantas que afetam a produtividade, dependem do grau de estresse, dos genótipos e das influencias das condições ambientais (IQBAL et al., 2018).

3.3.2 Eficiência agronômica do uso da água

A eficiência do uso da água aplicada refere-se ao rendimento obtido por unidade de água aplicada (HOWELL, 2003), é um parâmetro fisiológico fundamental que indica a capacidade das culturas de conservar água em uma região com escassez de água, porque combina resistência à seca e alto potencial de rendimento (RICHARD, 2006 , ZHANG et al., 2007).

Na avaliação dos RHs observa-se de um modo geral que a maior EUA ocorre entre 218 e 319 mm dependendo do material (Tabela 4). Em conclusões, os RHs 128 e 160 mm têm menor EUA porque não podem expressar o potencial produtivo e os níveis acima de 433 mm à menor eficiência ocorre devido à incapacidade de absorver toda a água fornecida (Tabela 4).

Comparando-se o RH 483 mm com o 309 e 218 mm, as plantas submetidas à lâmina de 309 e 218 mm tiveram redução de 36 e 55 % no volume total de água aplicada e acréscimo de 23 e 21% na EUA, respectivamente (Tabela 4). Deste modo, os dois RHs com limitações hídricas moderadas (309 e 218 mm) podem ser indicados como os mais adequados para o

cultivo de quinoa sob sistema irrigado no Cerrado, já que existe uma compensação na relação entre produtividade e economia de água nestes RHs, em relação aos demais regimes hídricos.

Em RHs superiores, os genótipos apresentaram alta produtividade, no entanto, o ganho de matéria seca por unidade de água foi baixo. Esses resultados indicaram que não houve relação consistente entre a produtividade da planta e a EUA em RHs superiores (Tabela 3 e 4), demonstrando menor ganho de matéria seca por unidade de água aplicada. Esse comportamento pode ser interpretado como intolerância ao excesso de água, que resultou em redução da EUA em RH acima de 309 mm, podendo indicar um potencial produtivo destes genótipos sob déficit, pois mostraram sensibilidade ao aumento da disponibilidade hídrica (Tabela 4).

Do mesmo modo, a irrigação com déficit (25% da irrigação total) causou um aumento significativo na produtividade de água da quinoa, conforme relatado por Riccardi et al. (2014). Assim como, Zhang et al. (2006) descobriram em seu estudo que a irrigação deficitária planejada com uma redução de 14-22% da água de irrigação para o trigo de primavera não só aumentou o EUA, mas também o tamanho da semente. Esses resultados fornecem evidências de que nas condições do Cerrado, onde, ocorrem baixa precipitação e períodos de veranicos intensos, o cultivo de quinoa tanto em safrinha, quanto na entressafra, sob irrigação, utilizando menores lâminas de água, pode ser uma opção valiosa para se obter altos rendimentos da quinoa. Tal fato, associado a um manejo adequado de água pode resultar em uma maior produção por área, o que é desejável para áreas sob cultivo irrigado onde há um investimento no fornecimento de água.

Independente dos regimes hídricos, os genótipos CPAC 13, CPAC 6, CPAC 3, CPAC 12 e CPAC 17 apresentaram a maior EUA, com 19,9, 19,3, 19,3, 19,2 e 18,8 kg ha⁻¹ mm⁻¹, respectivamente (Tabela 4). Já os menos eficientes foram os CPAC 1, CPAC 14 e CPAC 19, com 15,7, 15,2 e 14,9 kg ha⁻¹ mm⁻¹, respectivamente (Tabela 4).

A EUA nos regimes superiores e moderados está de acordo com os resultados de produtividade, uma vez que nos RHs 483 e 433 mm a menor eficiência foi observada para o genótipo CPAC 11 e para o genótipo CPAC 11 e CPAC 14, respectivamente, devido ao menor potencial produtivo destes genótipos nestes regimes (Tabela 4).

Nos regimes intermediários (RH 376 e 309 mm) assim como os resultados de produtividade, observa-se uma maior EUA para os genótipos CPAC 6 e 13 nos dois regimes, e para o CPAC 18 e 20 no RH 376 e 309 mm, respectivamente (Tabela 4). No regime de 218 mm os genótipos CPAC 3, CPAC 6, CPAC 11, CPAC 12 e Piabiru apresentaram a maior EUA, e no RH 160 o CPAC 17 foi superior aos demais genótipos e a Piabiru.

Tabela 4. Eficiência agrônômica do uso de água aplicada ($\text{kg ha}^{-1}\text{mm}^{-1}$) de 18 genótipos de quinoa e da BRS Piabiru precoce sob sete regimes hídricos (128, 160, 218, 309, 376, 433 e 483 mm)

Genótipos	Regimes hídricos (mm)							Média genótipos
	483	433	376	309	218	160	128	
CPAC 1	16,2aB	19,1aB	22,2bA	19,7cB	18,6cB	8,7dC	5,6bC	15,7d
CPAC2	17,2aB	17,6aB	21,0bA	20,1cA	14,7dC	11,4dD	11,3aD	16,2c
CPAC3	17,0aC	20,6aB	20,8bB	22,4bB	28,7aA	13,5cD	12,0aD	19,3a
CPAC4	17,4aB	18,7aB	21,9bA	23,6aA	23,9bA	12,2cC	6,39bD	17,7b
CPAC5	16,9aB	18,8aB	21,0bA	20,8bA	23,9bA	12,1bC	5,9bD	17,1c
CPAC6	16,5aC	19,6aB	23,5aA	25,8aA	26,1aA	15,4bC	7,7bD	19,3a
CPAC8	15,5aC	20,0aA	18,8cB	21,6bA	23,3bA	9,9dD	4,0bE	16,1c
CPAC9	17,73aB	20,5aB	21,0bB	20,1cB	23,3bA	13,2cC	5,7bD	17,3b
CPAC10	16,3aC	19,8aA	22,2bA	22,1bA	20,6bA	16,3bB	5,2bD	17,5b
CPAC11	11,1bE	14,8bD	18,0cC	21,3bB	24,8aA	16,1bD	10,0aE	16,6c
CPAC12	18,1aC	19,8aC	20,8cC	22,9bB	26,7aA	16,2bD	9,64aE	19,2a
CPAC13	18,1aB	20,4aB	25,9aA	26,9aA	19,1cB	17,6bB	11,6aC	19,9a
CPAC14	19,1aA	14,1bB	17,3cA	18,5cA	17,8cA	10,1dC	9,8aC	15,2d
BRS Piabiru	18,2aC	17,5aC	21,6bB	21,1bB	24,8aA	13,47cD	11,6aD	18,3b
CPAC16	17,4aB	19,7aB	19,8cB	22,1bA	21,7bA	14,6cC	9,1aD	17,8b
CPAC17	17,4aB	20,6aA	22,4bA	21,9bA	22,0bA	22,8aA	4,5bC	18,8a
CPAC18	16,5aC	20,7aB	24,4aA	18,6cB	21,8bB	13,8cC	9,3aD	17,9b
CPAC19	15,2aB	17,8aB	17,1cB	22,4bA	11,6cC	11,2dC	7,3bD	14,6d
CPAC20	18,07aB	19,8aB	18,82cB	25,2aA	18,0cB	13,7cC	5,24bD	17,0c
Média RH	16,9D	18,9C	21,0B	22,0A	21,6A	13,8E	8,0F	

*Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna ou maiúscula na linha, não diferem entre si pelo Teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade

No regime de estresse severo (128 mm) os CPAC 2, CPAC 3, CPAC 11, CPAC 12, CPAC 13, CPAC 14, CPAC 16 e CPAC 18 e a Pibiru foram superiores aos demais genótipos. Assim, concordando com os dados de produtividade o CPAC 6 e 13 apresentaram alta EUA tanto em condições hídricas satisfatória quanto sob irrigação deficitária (Tabela 3).

O genótipo CPAC 17 apresentou alta eficiência do uso da água nos RHs 483, 433 e 160 mm, com destaque para o RH 160 mm, uma vez que foi o material que apresentou maior EUA neste regime, o que está de acordo com os dados de produtividade obtida por este genótipo neste mesmo RH. A EUA deste material variou de 21,9 kg ha⁻¹ mm⁻¹ de grãos de quinoa na lâmina de 309 mm a 17,7 kg ha⁻¹mm⁻¹ de grãos de quinoa com a aplicação de 483 mm (Tabela 4). Esta diferença representou acréscimo de 20,0 % na EUA com economia de 36 % no volume de água aplicado. Estes resultados mostram que a disponibilidade de água para a quinoa podem ser reduzidas sem uma redução significativa no rendimento, adotando-se a irrigação deficitária. Este aumento na eficiência de assimilação faz com que a quinoa nos tratamentos de deficit hídrico moderado atinja rendimentos semelhantes e valores de EUA maiores. Diante disso, é evidente que a quinoa apresenta mecanismos de tolerância à seca, que contribuem para a manutenção da produtividade de alguns materiais sob déficit hídrico moderado. Esses resultados sugerem que estes genótipos possam ser cultivados em sistemas irrigados e sequeiros. Mesmo que tenham o mesmo potencial produtivo que o Piabiru precoce, apresentam menor variabilidade entre plantas o que facilita o manejo do produtor e aumenta a qualidade comercial do grão

3.3.3 Altura de plantas

Houve efeitos isolados para altura de plantas avaliada na floração, e os genótipos com maiores valores foram: CPAC 1, CPAC 2, CPAC 5, CPAC 6, CPAC 8, CPAC 10, CPAC 12,

CPAC 13, CPAC 16 e Piabiru com 1,51, 1,44, 1,51, 1,53, 1,44, 1,45, 1,51, 1,42, 1,42 e 1,46 cm, respectivamente (Figura 4). Os demais genótipos tiveram altura inferior ao material controle (Piabiru) e a menor altura foi observada no CPAC 11, com 0,94 cm. A altura dos genótipos variaram de 0,99 a 1,53 m, resultados inferiores foram encontrados por Maliro et al., (2017) no qual a altura das plantas de quinoa variaram de 0,47 a 1,08m.

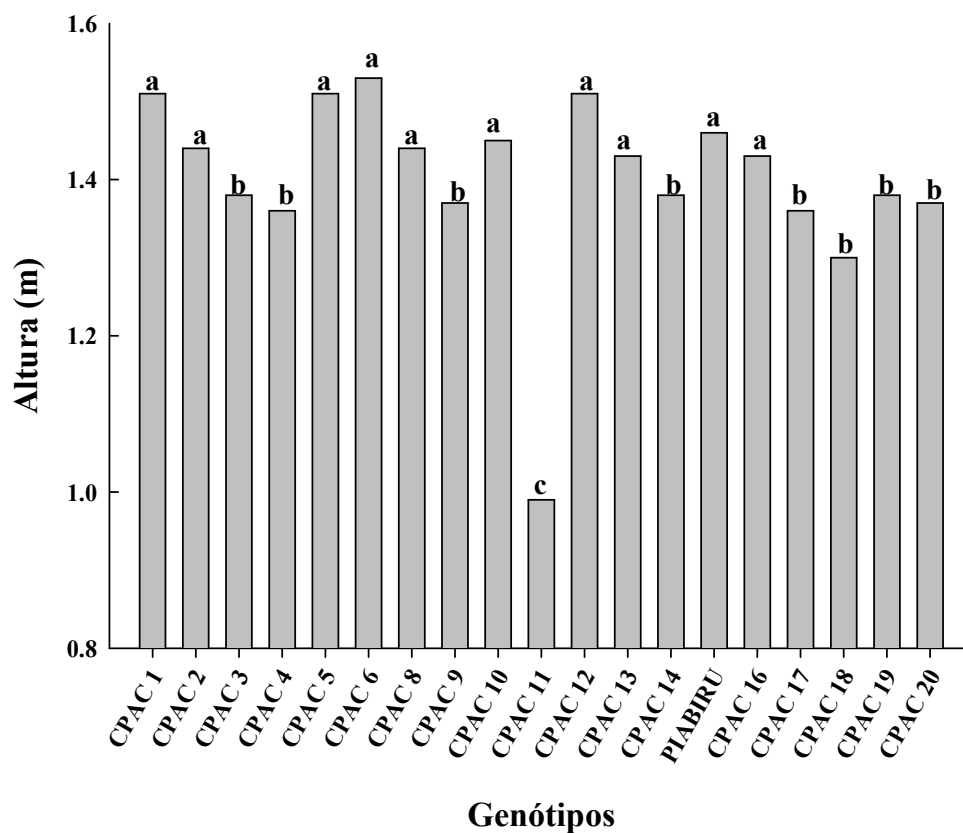


Figura 4. Altura média de 18 genótipos de quinoa e da BRS Piabiru, independente dos regimes hídricos.

A Figura 5 apresenta a equação de regressão da altura das plantas de quinoa em resposta aos regimes hídricos. Nos regimes com maior disponibilidade hídrica (389 e 480 mm) as plantas apresentaram alturas superiores (1,50 e 1,51 m), ao regime mediano (247 mm) e estressado (150 mm) que apresentarem plantas com menores alturas de 1,40 e 1,17 m,

respectivamente (Figura 5). Assim, o déficit hídrico severo reduziu a altura de plantas em 22%. Talebnejad et al., (2015) analisando as respostas ecofisiológicas à salinidade e às tensões hídricas da quinoa boliviana, também observaram que a redução do volume de irrigação resultou em diminuição significativa da altura de plantas em 0,55 e 0,80 m.

Do mesmo modo, a diminuição do crescimento das plantas sob estresse hídrico no presente estudo corresponde aos resultados obtidos por Yang et al. (2016) em que o déficit de 70% da irrigação de plantas de quinoa cultivadas em vasos reduziu significativamente a altura da planta e peso seco da parte aérea em relação as plantas controle.

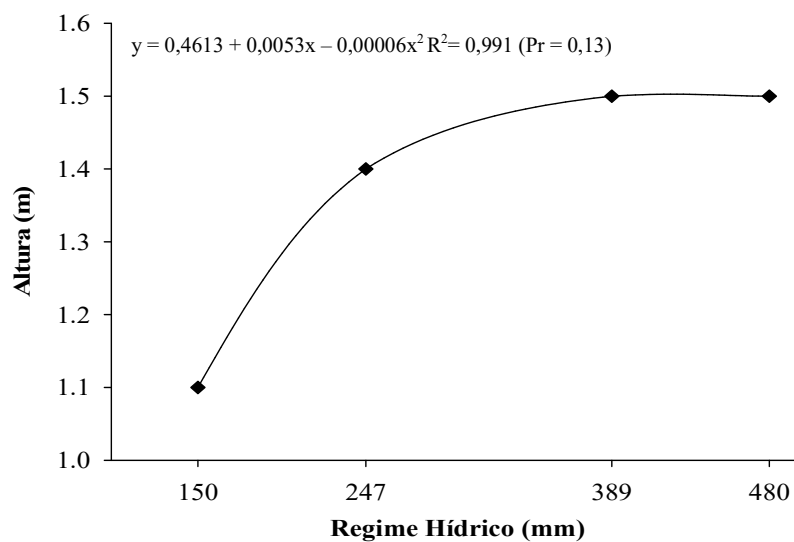


Figura 5. Altura média de plantas de quinoa em quatro regimes, independente dos genótipos.

De acordo Endres et al., (2010) a redução do porte vegetal e de sua área foliar em condições de estresse está diretamente relacionada ao declínio da massa seca quando comparadas com aquelas mantidas em condições adequadas de potenciais de água no solo. Pois, sob déficit hídrico ocorre o fechamento dos estômatos e conseqüente diminuição da fotossíntese, pois, a redução na taxa fotossintética é mais rápida que a redução da taxa respiratória, promovendo uma conseqüente diminuição na produção de massa seca (ENDRES

et al., 2010). Além do mais, o baixo potencial hídrico do solo limita a capacidade de absorção de água, e isso rapidamente suprime a taxa de expansão celular e divisão dos tecidos em crescimento (SHAO et al., 2008).

Diante disso, a variável altura da planta pode ser utilizada como critério para determinar a suscetibilidade de genótipos de quinoa à seca, pois quanto mais tardio o ciclo, maior é o porte da planta. O que se deseja são variedades de ciclo curto a médio, pela possibilidade de maior número de cultivos por ano em sistemas irrigados (SPEHAR; SOUZA, 1993), e possibilita o cultivo em safrinha após a colheita da soja precoce. O menor ciclo tem sido um fator de escape ao estresse hídrico, em condições de Cerrado, além de contribuir para definir a época de semeadura, para que a maturação dos grãos ocorra quando a umidade estiver reduzida evitando deste modo a deterioração das sementes (SPEHAR et al., 2007).

3.3.4 Polifenóis

O teor de compostos fenólicos na planta é outro fator afetado pelo estresse hídrico. A quantidade de metabólitos nas plantas pode ser afetada por diferentes fatores, como processos biológicos, ambientais, bioquímicos, fisiológicos, ecológicos e evolutivos (RAMAKRISHNA et al., 2011).

Houve interação significativa ($p < 0,01$) entre os genótipos de quinoa e os regimes hídricos e os resultados das médias de polifenóis, flavonóides e antocianinas totais obtidas em função do desdobramento da interação genótipos e regime hídrico são mostrados na Tabela 5, 6 e 7 respectivamente.

De uma forma geral os maiores teores de polifenóis foram obtidos nos regimes 480, 389 e 150 mm (Tabela 5). E não foi observado um efeito consistente do déficit hídrico no

acúmulo de polifenóis nos genótipos, no qual foi verificado efeito genotípico sobre o conteúdo de polifenóis nos grãos de quinoa sob condições normais de umidade e déficit hídrico.

Tabela 5. Teores de polifenóis totais (mg/100 g) nos grãos 18 genótipos de quinoa e da BRS Piabiru sob quatro regimes hídricos (150, 247, 389 e 480 mm).

Genótipos	Regimes Hídricos (mm)				Média genótipos
	480	389	247	150	
CPAC 1	80,0dA	78,70 dA	60,96eA	98,377dA	79,55h
CPAC 2	102,75dA	90,58 dA	78,32eA	99,42 dA	92,76g
CPAC 3	167,10bA	128,76cB	113,06dB	78,35dC	121,82f
CPAC 4	93,78dA	97,25dA	104,67dA	101,23dA	99,23g
CPAC 5	112,81cA	67,98 dB	105,78dA	109,30dA	98,97g
CPAC 6	116,65cB	132,64cB	147,99cA	167,86cA	141,28e
CPAC 8	189,44aA	193,58 aA	187,34bA	185,57bA	188,98b
CPAC 9	196,69aA	209,66aA	171,65bB	186,73bB	191,18b
CPAC 10	191,51aA	203,49aA	200,19aA	203,79aA	199,74b
CPAC 11	172,92bA	204,66aA	219,22aA	221,42aA	209,55a
CPAC 12	164,27bA	184,14bA	184,14bA	196,76bA	181,11c
CPAC 13	194,07aA	177,32bA	177,51bA	157,21cB	167,96d
CPAC 14	206,42aA	211,15aA	167,42bB	177,60bB	196,65b
BRS Piabiru	204,89aA	216,82aA	212,85aA	210,45aA	211,25a
CPAC 16	180,85bA	198,07aA	179,14bA	191,87bA	187,48b
CPAC 17	162,02.bA	173,35bA	145,74cB	147,69cB	162,45d
CPAC 18	126,02cB	156,67bA	125,40dB	143,76cA	137,96e
CPAC 19	130,32cA	143,96cA	126,58dA	148,25cA	137,28e
CPAC 20	133,33cA	148,87cA	123,22dA	150,00cA	138,86e
Média RH	155,11A	158,81A	148,01B	157,87A	

*Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna ou maiúscula na linha, não diferem entre si pelo Teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade

Do mesmo modo, Aninbon et al. (2016) investigaram o efeito da seca terminal sobre compostos fenólicos em genótipos de amendoim com diferentes níveis de resistência à seca verificaram que os genótipos de amendoim responderam diferentemente ao estresse hídrico para o conteúdo fenólico, pois de acordo o autor a variação nos compostos fenólicos em plantas de amendoim pode depender dos genótipos e período de seca. De acordo Martini et al., (2014), um estudo mais aprofundado enfocando tanto a biossíntese quanto os processos de oxidação de compostos fenólicos sob estresse hídrico fornecerá mais conhecimento sobre a

variação genotípica do conteúdo fenólico nos grãos, contribuindo assim para a seleção de genótipos com maior capacidade antioxidante e níveis de tolerância ao estresse.

Ao comparar a Piabiru com os diferentes genótipos verificou-se que o CPAC 10 foi significativamente igual a Piabiru, pois ambos apresentaram potencial de acúmulo de polifenóis em todos os regimes estudados. O CPAC 10 e CPAC 11 se destacaram em relação ao acúmulo de polifenóis em todos os regimes estudados, pois mesmo quando as plantas foram submetidas ao déficit hídrico nos regimes de 247 e 150 mm, estes juntamente com a Piabiru apresentaram grande potencial de acumular polifenóis nos grãos.

3.3.5 Flavonóides

A elevação dos teores de flavonóides sob condições severas de estresse hídrico é atribuída ao acúmulo de carboidratos solúveis nas células vegetais devido ao transporte reduzido de açúcar solúvel sob estresse hídrico (JAAFAR et al., 2012; IBRAHIM et al., 2011). Os polifenóis, como flavonóides, são biossintetizados com diferentes vias, incluindo o ácido chiquímico e o ácido malônico. A via do ácido chiquímico é responsável pela conversão de precursores de carboidratos simples em aminoácidos aromáticos (GHASEMZADEH et al., 2010).

Além disso, a quantidade de flavonóides e outros antioxidantes de baixo peso molecular em plantas de estresse hídrico podem estar parcialmente relacionados à variação morfológica das folhas e às alterações metabólicas que impedem o dano oxidativo (HERNANDEZ et al., 2004).

Quanto ao acúmulo de flavonóides nos diferentes genótipos dentro de cada lâmina pode se observar que o genótipo CPAC 9 foi mais eficiente em acumular flavonóides que a

Piabiru e os demais genótipos em todas os regimes estudados (Tabela 6), demonstrando que o genótipo acumula composto tanto em maior quanto em menor disponibilidade de água.

Tabela 6. Teores de flavonóides totais (mg/100 g) nos grãos 18 genótipos de quinoa e da BRS Piabiru sob quatro regimes hídricos (150, 247, 389 e 480 mm).

Genótipos	Regimes Hídricos (mm)				Média genótipos
	480	389	247	150	
CPAC 1	81,59cB	101,62dA	66,21dC	88,34dA	84,44d
CPAC 2	95,97bA	97,23dA	85,71dA	92,21dA	92,78d
CPAC 3	98,83bA	51,54eB	97,12cA	113,25cA	89,73d
CPAC 4	80,02cB	98,31dA	91,64cA	96,23dA	91,55d
CPAC 5	84,07cB	103,0dA	74,58dB	86,80dB	87,11d
CPAC 6	83,65cC	115,23cA	82,81dC	100,05dB	95,42d
CPAC 8	96,95bB	110,72dA	114,25bA	93,58dB	106,71c
CPAC 9	215,22aB	171,32aC	205,11aB	226,02aA	195,50a
CPAC 10	85,48cC	110,0dB	96,32cC	210,81bA	119,55b
CPAC 11	89,00cB	118,59cA	100,97cB	113,25cA	108,27c
CPAC 12	96,17bB	120,98cA	84,82dB	112,51cA	103,62c
CPAC 13	99,47bA	111,33dA	84,73dB	102,33dA	99,46d
CPAC 14	115,19bA	119,74cA	84,94dB	104,71cA	106,03c
BRS Piabiru	104,15bA	105,89dA	101,98cA	104,56cA	104,14c
CPAC 16	105,09bB	124,80cA	99,48cB	110,93cB	110,07c
CPAC 17	115,73bC	145,76bA	97,05cC	118,86cB	118,48b
CPAC 18	88,27cB	62,76cC	94,25cB	113,57cA	99,46d
CPAC 19	109,63bB	119,74cA	102,59cB	100,01dB	110,74c
CPAC 20	119,93bB	139,03bA	114,40bB	115,41cB	119,88b
Média RH	105,05B	111,17A	97,80C	115,72A	

*Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna ou maiúscula na linha, não diferem entre si pelo Teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade

O maior acúmulo de flavonóides nos genótipos de quinoa foi obtido nos RHs 389 e 150 mm, e uma redução no RH de 480 mm de 7,6 e 11% comparado ao RH 389 e 150 mm, respectivamente. Estes resultados nos mostram que o aumento da disponibilidade hídrica pode reduzir o acúmulo de flavonóides em grãos de quinoa e que os teores deste composto nos grãos podem ser influenciados pelo genótipo ou variedade. Repo-Carrasco-Valencia et al., (2010) estudando os níveis de flavonóides, ácidos fenólicos e betalains nos grãos andinos de quinoa, kaniwa (*Chenopodium pallidicaule* Aelen) e kiwicha encontraram teor de flavonóides em *Chenopodium* sp variando de 36,2 a 144,3 mg/100 g, valores próximos e superiores foram encontrados neste trabalho, em que os teores de flavonóides variaram de 62,76 a 226,02

mg/100 g, dependendo do genótipo e regime hídrico. Essas diferenças nas repostas entre genótipos pode estar relacionada aos diferentes mecanismos para distribuir flavonóides entre os compartimentos subcelulares (WINKEL-SHIRLEY et al., 2002).

3.3.6 Antocianinas

As antocianinas atuam como fotoprotetores e antioxidantes (CARLETTI et al., 2013), e foram identificados como componentes importantes dos grãos de quinoa devido aos benefícios à saúde (ALVAREZ-SUAREZ et al., 2014). Tecidos vegetais contendo antocianinas são geralmente bastante resistentes à seca. Por exemplo, uma cultivar roxa de pimenta resiste melhor ao estresse hídrico do que uma cultivar verde (RAMAKRISHNA et al., 2011).

Bascuñán-Godoy et al. (2016) observaram um aumento significativo no teor de antocianinas em folhas de genótipos de quinoa após estresse e em grãos colhidos de plantas estressadas. A quantidade total de antocianinas em plantas de ervilhas cultivadas sob estresse hídrico também foi elevada em comparação com os regimes normais de irrigação (SELMAR et al., 2013). Do mesmo modo, foi documentado em ensaios de restrição de água que a capacidade antioxidante das sementes de quinoa aumenta na medida em que as plantas são submetidas a níveis mais baixos de disponibilidade de água (FISCHER et al., 2013).

Os regimes hídricos não influenciaram o acúmulo de antocianinas nos genótipos. E ao avaliar os genótipos dentro de cada lâmina, percebe-se um comportamento semelhante ao observado no acúmulo de flavonóides, em que o genótipo 9 acumulou maior teor de antocianinas e foi superior à Piabiru e demais genótipos em todos os regimes estudados. Como observado neste estudo, em que o aumento ou redução do acúmulo de antocianinas em

função dos regimes hídricos variou conforme o genótipo, alguns estudos também demonstraram que o teor de antocianinas nem sempre aumentou sob estresse e dependem do genótipo da planta (SHOEVA et al. 2017).

Tabela 7. Teores de antocianinas totais (mg/100 g) nos grãos 18 genótipos de quinoa e da BRS Piabiru sob quatro regimes hídricos (150, 247, 389 e 480 mm).

Genótipos	Regimes Hídricos (mm)				Média genótipos
	480	389	247	150	
CPAC 1	0,80cA	0,76dA	0,76cA	0,80dA	0,78b
CPAC 2	0,63dA	0,68dA	0,62dA	0,40cB	0,58b
CPAC 3	0,63dD	1,0bB	0,83cC	1,16cA	0,90b
CPAC 4	0,59dB	0,65eB	0,59dB	0,76dA	0,68b
CPAC 5	0,74cA	0,59eB	0,54dB	0,70dA	0,64b
CPAC 6	0,60dB	0,73dA	0,65dB	0,84dA	0,70b
CPAC 8	0,58dB	1,07bA	0,55dB	0,57eB	0,69b
CPAC 9	1,72aC	1,89aB	1,44aD	2,05aA	1,77a
CPAC 10	1,16bA	0,73dB	0,76cB	0,91dB	0,91b
CPAC 11	0,61dA	0,48fA	0,54dA	0,61eA	0,56b
CPAC 12	0,55dB	0,68dA	0,50dB	0,65eB	0,59b
CPAC 13	0,66dB	0,63eB	0,50dC	0,73dA	0,66b
CPAC 14	0,83cB	0,82cB	0,68cC	0,94cC	0,85b
BRS Piabiru	0,89cB	1,08bA	0,61dD	0,74dC	0,78b
CPAC 16	0,72cA	0,65eA	0,81cA	0,80dA	0,74b
CPAC 17	1,03bB	0,86cC	0,79cC	1,18bA	1,01b
CPAC 18	0,68dA	0,61eA	0,72cA	0,60eA	0,65b
CPAC 19	0,64dA	0,63eA	0,71cA	0,66eA	0,66b
CPAC 20	1,13bA	0,99bA	1,06bA	1,05cA	1,55a
Média RH	0,81A	0,82 A	0,82A	0,85A	

*Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna ou maiúscula na linha, não diferem entre si pelo Teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade

Aninbon et al (2016) aplicaram exposição a seca de aproximadamente 25 dias no fim do ciclo de cultivo em genótipos de amendoim com diferentes índices de tolerância à seca e observaram um aumento no teor de compostos fenólicos em folhas e hastes de amendoim, no entanto, relataram que a seca promoveu uma redução no teor de compostos fenólicos dos grãos com película, o que está de acordo com este trabalho visto que alguns genótipos apresentaram menores teores de compostos fenólicos (polifenóis, flavonóides e antocianinas) quando submetidos à déficit hídrico.

Assim, a literatura documenta que o conteúdo fenólico vegetal diferirá em resposta a seca, e esta resposta difere entre espécies, partes de plantas e tolerância à seca de genótipos dentro de uma espécie (ANINBON et al. 2016). O que explica os resultados encontrados neste trabalho, uma vez que os genótipos apresentaram comportamentos diferentes quanto ao acúmulo de polifenóis, flavonóides e antocianinas, quando estes foram submetidos a diferentes regimes hídricos.

3.4 CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos, o regime hídrico com estresse moderado (376 mm) de modo geral pode ser indicado como o mais adequado para o cultivo de quinoa sob irrigação no Cerrado.

O CPAC 6 e CPAC13 foram os genótipos que apresentaram maior potencial produtivo e maior EUA tanto em regimes hídricos com maior disponibilidade hídrica, quanto em regimes com estresse moderado, podendo ser utilizado para o cultivo em safrinha e no inverno.

O CPAC 11 foi o genótipo que apresentou menor altura de plantas. O aumento da disponibilidade hídrica influenciou a altura de plantas até o RH de 389 mm

O CPAC 9 apresentou maiores acúmulos de flavonóides e antocianinas em todos os regimes estudados.

3.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; DE MORAES, G.; LEONARDO, J.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologis che Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- ANINBON, C.; JOGLOY S.; VORASOOT N.; PATANOTHAI A.; NUCHADOMRONG S. Effect of end of season water deficit on phenolic compounds in peanut genotypes with different levels of resistance to drought. **Food Chemistry**. v.196, n. 1, p. 123–129, 2016.
- ASFAW M. W.; BLAIR P.; STRUICK P. C. Multi-environment quantitative character locus analysis for photosynthesized acquisition, accumulation and remobilization in a common bean. **Genes Genomes Genet**. v. 2, n. 5, p. 579 – 595, 2012.
- BASCUÑÁN-GODOY, L.; REGUERA, M.; ABDEL- TAWAB, Y.M.; BLUMWALD, E. Water deficit stress-induced changes in carbon and nitrogen partitioning in *Chenopodium quinoa* Willd. **Planta**, v. 243, n. 3, p. 591-603, 2016.
- BEEBE S. E.; RAO I. M.; CAJIAO C.; GRAJALES, M. Selection for drought resistance in common bean also improves yield in phosphorus limited and favorable environments. **Crop Science**, v. 48, n. 2, p. 582-592, 2008.
- CASTELLARIN S. D. Transcriptional regulation of anthocyanin biosynthesis in ripening fruits of grapevine under seasonal water deficit. **Plant, Cell & Environment**, v. 30, n. 11, p. 1381-1399, 2007.
- CONFALONE, A., COSTA, L., PEREIRA, C. R. Crescimento e captura de luz em soja sob estresse hídrico, **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 6, n. 2, p. 165-169, 1998.
- CHOUKR-ALLAH, R.; RAO, N. K.; HIRICH, A.; SHAHID, M.; ALSHANKITI, A.; TODERICH, K.; BUTT, K. U. R.. Quinoa for marginal environments: toward future food and nutritional security in MENA and central asia regions. **Frontiers in plant science**, v. 7, p. 346, 2016.
- DELGADO, P. A. I; PALACIOS, C. J. H; BETANCOURT, G. C. Evaluación de 16 genotipos de quinua dulce (*Chenopodium quinoa* Willd.) en el municipio de Iles, Nariño (Colombia). 2009. **Agronomía Colombiana**, v. 27, n. 2, p. 159-167.
- DÍAZ-LÓPEZ L.; GIMENO V.; ISIMÓN I.; MARTÍNEZ V.; RODRÍGUEZ-ORTEGA W. M.; GARCÍA-SÁNCHEZ F. *Jatropha curcas* seedlings show a water conservation strategy

under drought conditions based on decreasing leaf growth and stomatal conductance. **Agricultural water management**, v. 105, p. 48-56, 2012.

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Apresentação, <http://www.cpac.embrapa.br/unidade/apresentação>: [cited on 2018 Sep 29].

FERRÃO, R. G.; MOREIRA S. O.; FERRÃO M. A. G.; RIVA E. M., ARANTES L. O.; COSTA A. F. S.; CARVALHO P. L. P. T.; GALVÊAS P. A. O. Genética e melhoramento: desenvolvimento e recomendação de cultivares com tolerância à seca para o Espírito Santo. **Incaper em Revista**. v. 6, n.1, p.51-71, 2016.

FERREIRA, C. C.; RIBEIRO JUNIOR, W. Q.; RAMOS, M.L.G., SPEHAR, C. R.; Efeito da densidade de semeadura e doses de nitrogênio sobre a produtividade e biometria de amaranto, no cerrado do planalto central. **Bioscience Journal**, v. 30, n.5, p. 534-546, 2014.

FISCHER S.; WILCKENS R.; JARA J.; ARANDA M. Controlled water stress to improve functional and nutritional quality in quinoa seed. **Boletín Latinoamericano y del Caribe de Plantas Medicinales y Aromáticas**. v. 12, n. 5, p.457 - 468, 2013.

GEERTS S.; RAES D.; GARCIA M.; VACHER J.; MAMANI R.; MENDOZA J.; HUANCA R.; MORALES B.; MIRANDA R.; CUSICANQUI J. Introducing deficit irrigation to stabilize yields of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). **European Journal of Agronomy**, v. 28, n. 3, p. 427-436, 2008.

GHASEMZADEH A.; JAAFAR H. Z.; RAHMAT A. Elevated carbon dioxide increases contents of flavonoids and phenolic compounds, and antioxidant activities in Malaysian young ginger (*Zingiber officinale* Roscoe.) varieties. **Molecules**, v. 15, n. 11, p. 7907-7922, 2010.

GREGOROVA, Z.; KOVACIK, J.; KLEJDUS, B.; MAGLOVSKI, M.; KUNA, R.; HAUPTVOGEL, P.; & MATUSIKOVA, I. Drought-induced responses of physiology, metabolites, and PR proteins in *Triticum aestivum*. **Journal of agricultural and food chemistry**, v. 63, n. 37, p. 8125-8133, 2015.

HANKS R. J.; RASMUSSEN V. P.; WILSON G. D. Line-source sprinkler for continuous variable irrigation crop production studies. **Soil Science Society of America Journal.**, v. 40, n. 3, p. 426-429, 1976

HERNANDEZ I.; LEONOR A.; SERGI M. Drought-induced changes in flavonoids and other low molecular weight antioxidants in *Cistus clusii* grown under Mediterranean field conditions. **Tree physiology**, v. 24, n. 11, p. 1303-1311, 2004.

HIRICH A.; CHOUKR-ALLAH R.; JACOBSEN S. E. Deficit irrigation and organic compost improve growth and yield of quinoa and pea. **Journal of agronomy and crop science**, v. 200, n. 5, p. 390-398, 2014.

IQBAL, H.; YANING, C.; WAQAS, M.; REHMAN, H.; SHAREEF, M. S.; IQBAL, S. The application of hydrogen peroxide improves the performance of quinoa by affecting physiological and biochemical mechanisms in conditions of water deficit. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 204, n. 6, p. 541-55.

JAAFAR, H. Z. E.; IBRAHIM M. H.; KARIMI E. Phenolics and flavonoids compounds, phenylalanine ammonia lyase and antioxidant activity responses to elevated CO₂ in *Labisia pumila* (Myrsinaceae). **Molecules**, v. 17, n. 6, p. 6331-6347, 2012.

JAYME-OLIVEIRA A.; RIBEIRO JUNIOR W. Q.; RAMOS M. L. G.; ZIVIANI A. C.; JAKELAITIS A. Amaranth, *C. quinoa*, and millet growth and development under different water regimes in the Brazilian Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 52, n. 8, p. 561-571, 2017.

JENSEN, C.; JACOBSEN, S. E.; ANDERSEN, M.; NÚÑEZ, N.; ANDERSEN, S.; RASMUSSEN, L.; MOGENSEN, V. Leaf gas exchange and water relation characteristics of field quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) during soil drying. **European Journal of Agronomy**, v. 13 n. 1, p. 11–25, 2000.

KUMAR, A. L. I. C.; PORTIS JÚNIOR, A. R. *Arabidopsis thaliana* expressing a thermostable chimeric Rubisco activase exhibits enhanced growth and higher rates of photosynthesis at moderately high temperatures. **Photosynthesis research**, v. 100, n. 3, p. 143-153, 2009.

LARRAURI J. A.; RUPÉREZ P.; SAURA-CALIXTO F. Effect of drying temperature on the stability of polyphenols and antioxidant activity of red grape pomace peels. **Journal of agricultural and food chemistry**, v. 45, n. 4, p. 1390-1393, 1997.

JORDAN, W. R. Whole plant response to water deficits: an overview. **Limitations to efficient water use in crop production**, p. 289-317, 1983.

LEES D. H.; FRANCIS F. J. Standardization of pigment analyses in cran berries. *Hort Science*. v.7, n. 1, p.83-84, 1972.

LIU, H.; BRUCE, D. R.; SISSONS, M.; ABLE, A. J.; ABLE, J. A. Genotype-dependent changes in the phenolic content of durum under water-deficit stress. **Cereal Chemistry**, v. 95, n. 1, p. 59-78, 2018.

LIU, F.; ANDERSEN, M. A.; JACOBSEN, S. E.; JENSEN, C. R. Stomatal control and water use efficiency of soybean (*Glycine max* L.) during progressive soil drying. **Environmental and Experimental Botany**, v. 54, n. 1, p. 33-40, 2005.

MALIRO M. F. A.; GUWELA V. F.; NYAIKA J.; MURPHY K. M. Preliminary studies of the performance of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) genotypes under irrigated and rainfed conditions of central Malawi. **Frontiers in plant science**. v. 8, n.1, p. 227, 2017.

MARTÍNEZ, E. A.; VEAS, E.; JORQUERA, C.; SAN MARTÍN, R.; E JARA, P. Re-introduction of Quinoa into arid Chile: Cultivation of two lowland races under extremely low irrigation. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v.195, n. 1, p. 1-10, 2009.

MATOS F. S.; OLIVERIA L. R.; FREITAS R. G.; EVARISTO A. B.; MISSIO R. F.; CANO M. A. O. Physiological characterization of leaf senescence of *Jatropha curcas* L. populations. **Biomass and bioenergy**, v. 45, n.1, p. 57-64, 2012.

MARTINI, D.; TADDEI, F.; NICOLETTI, I.; CICCORITTI, R.; CORRANDI, D.; D'EGIDIO, M. Effects of genotype and environment on phenolic acids content and total antioxidant capacity in durum wheat. **Cereal Chemistry**, v.91, n. 4, 310–317, 2014.

MIRANDA, M.; VEGA-GALVEZ, A.; LOPEZ, J.; PARADA, G.; SANDERS, M.; ARANDA, M.; URIBE, E.; SCAL, K. D. Impact of air-drying temperature on nutritional properties, total phenolic content and antioxidant capacity of quinoa seeds (*Chenopodium quinoa* Willd.). **Industrial Crops and Products**, v.32, n. 3, p. 258–263, 2010.

MUJICA-SANCHEZ, A.; JACOBSEN, S.; IZQUIERDO, J.; MARATHEE, J. Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.): ancestral cultivo andino, alimento del presente y del futuro. Santiago: FAO, 2001.

OBANDA M.; OWUOR P. O. Flavanol Composition and Caffeine Content of Green Leaf as Quality Potential Indicators of Kenyan Black Teas. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 74, n. 2, p. 209-215, 1997.

PLOENLAP P.; PATTANAGUL W. Effects of exogenous abscisic acid on foliar anthocyanin accumulation and drought tolerance in purple rice. **Biologia**, v. 70, n. 7, p. 915-921, 2015.

RAMAKRISHNA A.; RAVISHANKAR G. A. Influence of abiotic stress signals on secondary metabolites in plants. **Plant signaling & behavior**, v. 6, n. 11, p. 1720-1731, 2011.

RAZZAGHI, F.; AHMADI, S. H.; ADOLF, V. I.; JENSEN, C. R.; JACOBSEN, S. E.; ANDERSEN, M. N. Water relations and transpiration of quinoa (*Chenopodium quinoa*

Willd.) under salinity and soil drying. **Journal of agronomy and crop science**, v. 197, n. 5, p. 348-360, 2011.

REPO-CARRASCO-VALENCIA R.; HELLSTRÖM J. K.; PIHLAVA J. M.; MATTILA P. H. Flavonoids and other phenolic compounds in Andean indigenous grains: Quinoa (*Chenopodium quinoa*), kañiwa (*Chenopodium pallidicaule*) and kiwicha (*Amaranthus caudatus*). **Food Chemistry**, v. 120, n. 1, p. 128-133, 2010.

RICHARD, R. A. Physiological traits used in the breeding of new cultivars for waterscarce environments. **Agricultural water management**, v. 80, n. 1-3, p. 197-211, 2006.

SANTOS H. G.; JACOMINE K. T.; ANJOS L. H. C.; OLIVEIRA V. A.; LUMBRE J. F.; COELHO M. R.; ALMEIDA J. Á.; CUNHA T. J. F.; OLIVEIRA J. B. **Sistema brasileiro de classificação de solos**, 3ed. Brasília, DF: Embrapa, 2013.

SAS-Statistical Analyses System. Statistical Analysis System user's guide. Version 9. Cary: Statistical Analyses System Institute, 2008.

SELMAR D.; KLEINWÄCHTER M. Influencing the product quality by deliberately applying drought stress during the cultivation of medicinal plants. **Industrial Crops and Products**, v. 42, p. 558-566, 2013.

SINGH, Shree P. Selection for water-stress tolerance in interracial populations of common bean. **Crop Science**, v. 35, n. 1, p. 118-124, 1995.

SARKER, U.; OBA, S. Water stress increases nutritional and bioactive compounds, phenolic acids and antioxidant capacity of amaranth leaves vegetable. **BMC Plant Biology**, v. 18, n.1, p. 258, 2018.

SHOEVA, O. Y.; GORDEEVA, E. I.; ARBUZOVA, V. S.; KHLESTKINA, E. K. . Anthocyanins participate in protection of wheat seedlings from osmotic stress. **Cereal research communications**, v. 45, n. 1, p. 47-56, 2017.

SPEHAR, C. R.; ROCHA, J. E. S.; RIBEIRO JÚNIOR, W. Q.; SANTOS, R. L. B.; ASCHERI, J. L. R.; SOUSA, F. F. J.; Advances y desafíos de la producción de la quinua en Brasil.; Basile, D. (Ed.). Estado del arte de quinua en el mundo en 2013, FAO (Santiago de Chile) y CIRAD (MONTPELIER Francia). p. 681-706, 2013.

SPEHAR, C. R.; SILVA, R. J. E.; BARROS, S. R. L. Desempenho agrônômico e recomendações para cultivo de quinua (BRS Syetetuba) no cerrado. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 41, n. 1, p. 145-147 2011.

SPEHAR, C. R. Quinoa: alternativa para a diversificação agrícola e alimentar. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2007.

SPEHAR, C. R.; SANTOS, R. L. B. Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) BRS Piabiru: alternativa para diversificar os sistemas de produção de grãos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 6, p. 889-893, 2002.

SPEHAR, C. R.; SOUZA, P. I. de M. Adaptação da quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) ao cultivo nos cerrados do planalto central. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 28, n. 05, p. 635-639, 1993.

STIKIĆ, R.; JOVANOVIĆ, Z.; MARJANOVIĆ, M.; ĐORĐEVIĆ, S. The effect of drought on water regime and growth of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). **Ratarstvo i povrtarstvo**, v. 52, n. 2, p. 80-84, 2015.

SYSTAT SOFTWARE. Scientific Graphing Software: Sigma Plot, versão 10.0. San Rafael, Hearne Scientific Software, 2006.

TALEBNEJAD R.; SEPASKHAH A. R. Effect of deficit irrigation and different saline groundwater depths on yield and water productivity of quinoa. **Agricultural Water Management**, v. 159, p. 225-238, 2015.

VACHER, J. J. Responses of two main Andean crops, quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) and papa amarga (*Solanum juzepczukii* Buk.) to drought on the Bolivian Altiplano: significance of local adaptation. **Agriculture Ecosystems & Environment** v.68, n. 1-2, p.99–108, 1998.

YANG, A.; AKHTAR, S.; AMJAD, M.; IQBAL, S.; E JACOBSEN, S. E. Growth and physiological responses of quinoa to drought and temperature stress. **Journal of Agronomy e Crop Science**, v. 202 , p.445-453, 2016

YOUSFI, M. D.; SERRET, J. L.; ARAUSSHOOT. $\Delta^{15}\text{N}$ gives a better indication than ion concentration or $\Delta^{13}\text{C}$ of genotypic differences in the response of durum wheat to salinity. **Functional Plant Biology**, v. 36, n. 2, p. 144-155, 2009.

WINKEL-SHIRLEY, Brenda. Biosynthesis of flavonoids and effects of stress. **Current opinion in plant biology**, v. 5, n. 3, p. 218-223, 2002.

ZHANG, X. Y.; PEI, D.; CHEN, S.Y.; SUN, H.Y.; YANG, Y.H. Performance of double-cropped winter wheat-summer maize under minimum irrigation in the North China Plain. **Agronomy Journal**, v. 98, n. 6, p.1620–1626, 2006.

ZHANG M. C.; DUAN L. S.; TIAN X. L.; ELE Z. P.; LI J. M.; WANG B.; LI, Z. Uniconazole-induced tolerance of soybean to water deficit stress in relation to changes in photosynthesis, hormones and antioxidant system. **Journal of Plant Physiology**, v. 164, n. 6, p. 709-717, 2007.

ZILIC, S. Phenolic compounds of wheat. Their content, antioxidant capacity and bioaccessibility. **MOJ Food Processing & Technology**, v. 2, p. 1–5, 2016.

APÊNDICE

Tabela 1. Descritores morfológicos dos 18 genótipos de quinoa.

Genótipos	Presença de estrias	Cor da haste	Intensidade da cor estrias (claro/médio/escuro)	Presença de ramificação	Bordas das folhas	N de dentes/folha (1 poucos dentes/2- (3 a 12 dentes)/ 3- mais de 12 dentes)	Variabilidade	Acamamento	Cor da panícula	Inflorescência compacta/ramificada
1	Sim	Vermelho	Médio	Não	Sim	3	Sim	Não	Verde	Ramificada
2	Sim	Verde	Médio	Não	Sim	3	Sim	Não	Verde	Ramificada
3	Sim	Verm. e Verde	Claro	Não	Sim	2	Sim	Não	Verde	Ramificada
4	Sim	Verm. e Verde	Médio	Não	Sim	2	Não	Não	Verde	Ramificada
5	Sim	Verde	Médio	Não	Sim	2	Sim	Não	Verde	Ramificada
6	Sim	Verde	Médio	Não	Sim	2	Sim	Não	Verde	Ramificada
8	Sim	Verm.	Claro	Não	Sim	2	Sim	Não	Vermelho	Compacta
9	Sim	Vermelho e Verde	Claro	Não	Sim	2	Sim	Não	Amarelo	Ramificada
10	Sim	Verde	Médio	Não	Sim	2	Sim	Não	Verde	Ramificada
11	Sim	Verm. e Verde	Médio	Não	Sim	2	Não	Não	Vermelho	Compacta
12	Sim	Verm. e Verde	Médio	Não	Sim	2	Sim	Não	Roxo	Ramificada
13	Sim	Verm. e Verde	Claro	Não	Sim	2	Sim	Não	Vermelho	Ramificada
14	Sim	Verm. e Verde	Médio	Não	Sim	2	Sim	Não	Verde	Ramificada
16	Sim	Verm. e Verde	Médio	Não	Sim	2	Sim	Não	Verde	Ramificada
17	Sim	Verde	Médio	Não	Sim	2	Sim	Não	Verde	Ramificada
18	Sim	Verm. e Verde	Claro	Não	Sim	3	Sim	Não	Amarelo	Ramificada
19	Sim	Verde	Claro	Não	Sim	2	Sim	Não	Verde	Ramificada
20	Sim	Verm. e Verde	Médio	Não	Sim	3	Não	Não	Amarelo	Ramificada

CAPÍTULO II

ALTERAÇÕES FISIOLÓGICAS DE GENÓTIPOS ELITES DE QUINOA SUBMETIDOS A REGIMES HÍDRICOS VARIÁVEIS

RESUMO

A seca como grande estresse abiótico mundial exerce ameaça substancial à segurança alimentar global. Diante disso, a quinoa é considerada potencial para a segurança alimentar do século devido à qualidade altamente nutritiva dos grãos e seu alto potencial de rendimento sob condições adversas do solo e do clima. Desta forma, o objetivo deste estudo foi caracterizar respostas fisiológicas e rendimento de grãos em genótipos de quinoa submetidos a regimes hídricos variáveis. O experimento foi conduzido em uma área experimental da Embrapa Cerrados - Planaltina DF. O delineamento experimental foi em blocos casualizados, com 4 repetições, em parcelas subdivididas, sendo a parcela principal os genótipos de quinoa e a sub-parcela os níveis de água. As parcelas foram compostas por 3 genótipos de quinoa e a cultivar BRS Piabiru precoce; as sub-parcelas foram compostas por quatro regimes hídricos (150, 247, 389 e 480 mm). Para a aplicação dos diferentes níveis de água foi utilizado o sistema denominado *line source sprinkler system* modificado, utilizando-se uma barra irrigadora tracionada por um carretel auto propelido em que cada aspersor tenha uma vazão, gerando uma irrigação em gradientes de forma decrescente do centro para as extremidades do experimento. Os genótipos e a cultivar foram avaliados quanto às respostas fisiológicas e massa de mil grãos nos diferentes regimes hídricos. Foram avaliadas trocas gasosas (taxa fotossintética (A), carbono interno (C_i), condutância estomática (g_s) e transpiração (E), eficiência quântica efetiva do fotossistema II ($F'v/F'm$), índice de clorofilas, conteúdo relativo de água (CRA), prolina e massa de mil grãos (M1000). A análise estatística foi realizada pela análise de variância. Para a comparação das médias foi utilizado o teste de Tukey, ao nível de probabilidade de 5%. De uma forma geral pode-se perceber que o genótipo CPAC 19 e a Piabiru apresentaram maior g_s e A . Os resultados mostram que a relação $F'v/F'm$ foi pouco responsiva ao aumento da irrigação. Os maiores índices de clorofila a foram obtidos no CPAC 19 e na Piabiru. As plantas do RH 480 e 389 mm apresentaram alto CRA na folha, os demais RHs apresentaram plantas com início de murchamento. O maior acúmulo de prolina foi no CPAC 19 e no RH 150 mm. O regime hídrico de 389 mm foi o que resultou em melhores resultados para a quinoa. O genótipo 19 apresentou a maior condutância estomática, taxa fotossintética e conteúdo de prolina, no entanto, o CPAC 11 juntamente com a Piabiru foi os que apresentaram a maior massa de 1000 grãos.

Palavras-chave: Segurança Alimentar, Taxa fotossintética, Prolina, Déficit hídrico.

PHYSIOLOGICAL CHANGES OF QUINOA ELITE GENOTYPES SUBMITTED TO VARIABLE WATER REGIMES

ABSTRACT

Drought as a major global abiotic stress poses a substantial threat to global food security. Faced with this, quinoa is considered potential for century food security due to the highly nutritious quality of the grains and their high yield potential under adverse soil and climate conditions. In this way, the objective of this study was to characterize physiological responses and grain yield in quinoa genotypes submitted to variable water regimes. The experiment was conducted in an experimental area of Embrapa Cerrados - Planaltina DF. The experimental design was in randomized blocks, with 4 replications, in subdivided plots, the main plot being the quinoa genotypes and the subplot water levels. The plots were composed of 3 quinoa genotypes and the BRS Piabiru precocious cultivar; the subplots were composed of four water regimes (150, 247, 389 and 480 mm). For the application of the different water levels, the modified line source sprinkler system was used, using an irrigation bar drawn by a self-propelled spool in which each sprinkler has a flow, generating irrigation in decreasing gradients from the center to the ends of the experiment. The genotypes and the cultivar were evaluated for the physiological responses and mass of one thousand grains in the different water regimes. Gaseous exchanges (photosynthetic rate (A), internal carbon (C_i), stomatal conductance (g_s) and transpiration (E), effective quantum efficiency of photosystem II ($F'v / F'm$), chlorophyll index, relative water content (CRA), proline and mass of a thousand grains (M1000). The statistical analysis was performed by analysis of variance, using the Tukey test, at the probability level of 5%. In general, it can be seen that genotype CPAC 19 and Piabiru showed higher g_s and A . The results show that the $F'v / F'm$ ratio was little responsive to the increase of irrigation. The highest indexes of chlorophyll a were obtained in CPAC 19 and Piabiru. The plants of RH 480 and 389 mm presented high CRA in the leaf, the other RHs presented plants with beginning of wilting. The greatest accumulation of proline was in CPAC 19 and in RH 150 mm. The water regime of 389 mm was what resulted in better results for quinoa. Genotype 19 showed the highest stomatal conductance, photosynthetic rate and proline content; however, CPAC 11 together with Piabiru were the ones with the highest mass of 1000 grains.

Key Words: Food Safety, Photosynthetic Rate, Proline, Water Deficit.

4.1 INTRODUÇÃO

A quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) é uma cultura granífera tradicional da região dos Andes possui potencial para a segurança alimentar do século XXI (FAO, 2011), devido à alta qualidade nutritiva dos grãos, como alto teor protéico, excelente composição de aminoácidos, vitaminas e minerais. Além disso, possui alto potencial de rendimento sob condições adversas do solo e do clima, como a seca (RAZZAGHI et al., 2012; COCOZZA et al., 2012).

Diante disso, Jacobsen et al. (2013) sugerem que a segurança alimentar deve incentivar a diversidade estratégica de alternativas alimentares proteicas, e não somente dos cultivares geneticamente modificados, visando preservar a capacidade de resiliência da agricultura e a diversificação dos sistemas de produção.

Portanto, a quinoa pode ser considerada uma alternativa inovadora para inserção no sistema de produção do Cerrado no período da safrinha e na entressafra, pois é uma cultura de duplo propósito, ou seja, é utilizada na produção de grãos e na proteção do solo. Sua introdução no sistema produtivo do Cerrado é de grande relevância, sendo uma alternativa para a produção de grãos e como planta de cobertura para o Cerrado do Brasil Central (JAYME-OLIVEIRA et al., 2017).

Apesar de originária da Cordilheira dos Andes essa planta apresenta bom desenvolvimento sob estresses abióticos com estratégias morfofisiológicas ao déficit hídrico (SILVA et al., 2014), como menor necessidade intrínseca de água, capacidade de recuperar o seu nível original de fotossíntese após um período de seca, crescimento lento e menor área foliar durante a aclimação (SUN et al., 2014). Além de disso, possuem um sistema radicular profundo e denso, e a presença de vesículas foliares

contendo oxalato de cálcio, que podem contribuir para a redução da transpiração (JENSEN et al., 2000 ; SIENER et al., 2006).

Desta maneira, a compreensão dos mecanismos que garantem, sob deficiência hídrica, a manutenção da assimilação de carbono e a transpiração em níveis compatíveis com o crescimento e produção de biomassa são de suma importância para a produtividade em áreas sujeitas a deficiência hídrica periódica (KOTOWSKA et al., 2015). Nesse contexto, resultados sobre as relações hídricas têm sido relatados, ressaltando, sobretudo, sua estreita relação com assimilação de carbono e crescimento de plantas (KOTOWSKA et al., 2015).

Assim, as respostas fisiológicas, morfológicas e reprodutivas das plantas ao estresse hídrico são necessárias para explicar a atuação do déficit hídrico no crescimento e desenvolvimento das culturas, a fim de buscar soluções para reduzir e neutralizar os efeitos prejudiciais da seca na produção agrícola. Uma vez que, os conhecimentos obtidos por meio de estudos como este podem assessorar programas de melhoramento no rastreamento e seleção de genótipos potenciais para adaptação ao déficit hídrico.

Diante disso, o objetivo deste estudo foi avaliar as respostas fisiológicas de plantas de quinoa provenientes de genótipos oriundos da variabilidade existente dentro da cultivar lançada, BRS Piabiru, submetidos a regimes hídricos variáveis, para que a partir destes possam ser lançadas cultivares precoces, homogêneas com características morfológicas bem definidas e com maior tolerância à seca para o cultivo em safrinha e mais eficientes no uso da água para o cultivo irrigado na entressafra.

4.2 MATERIAL E MÉTODOS

4.2.1 Caracterização da área experimental

O experimento foi conduzido entre maio e setembro de 2017 na área experimental da Embrapa Cerrados - Planaltina DF, cujas coordenadas geográficas são: 15°35'30"S e 47°42'30" W, com altitude média de 1.014m. Na Figura 6, é apresentada uma visão geral da área experimental.



Figura 6: Visão geral da área experimental com irrigações em gradiente, por meio de imagem com drone.

O clima da região é classificado como Aw, segundo classificação de Köppen (ALVARES et al., 2013) com duas estações bem definidas (seca e chuvosa). A temperatura média anual é de 21°C e a precipitação média é de 1.500 mm. O verão é quente e úmido, com a ocorrência de períodos de estiagem durante a estação chuvosa (veranicos). No inverno ocorre déficit hídrico, baixa temperatura e baixa umidade.

O experimento foi conduzido no inverno sob diferentes regimes hídricos devido a não ocorrência de chuvas nesse período, o que possibilitou o controle efetivo das lâminas de água aplicadas. Os dados de temperaturas médias mensais e precipitação pluviométrica acumulada durante o período do experimento foram coletados na estação meteorológica da Embrapa Cerrados (Figura 7).

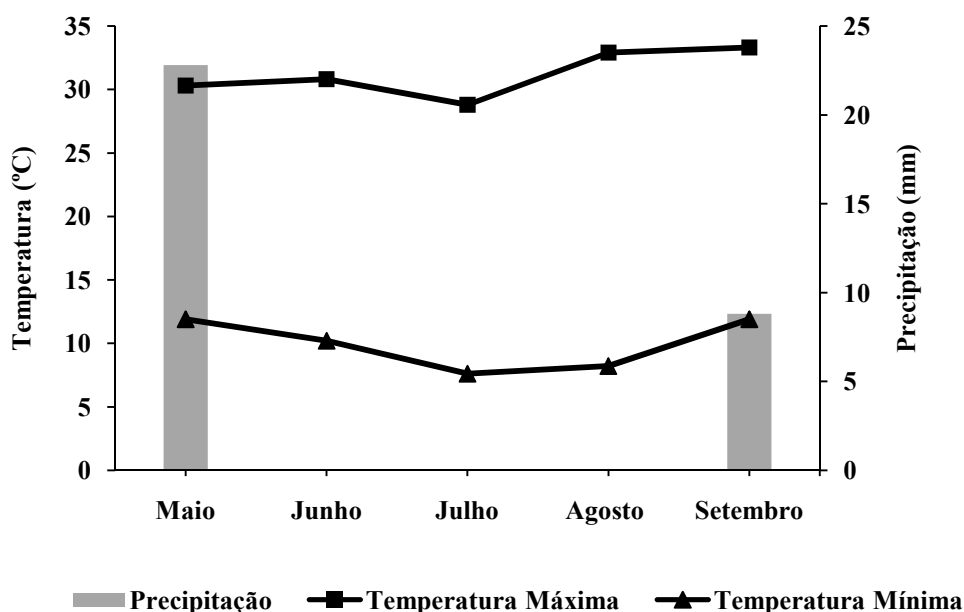


Figura 7. Precipitação pluviométrica e temperaturas máximas e mínimas ocorridas na área experimental nos meses de maio a setembro de 2017.

O solo da área experimental é classificado como Latossolo Vermelho distrófico típico, fase Cerrado tropical subcaducifólio, relevo suave-ondulado, de textura argilosa (SANTOS et al., 2013) e apresenta as seguintes características na camada de 0-20 e 20-40cm: pH (em água) = 5,71 e 5,55; Ca ($\text{cmo}_c \text{dm}^{-3}$) = 2,71 e 2,15; Mg ($\text{cmo}_c \text{dm}^{-3}$) = 0,85 e 1,39; K (mg dm^{-3}) = 56 e 180; H + Al ($\text{cmo}_c \text{dm}^{-3}$) = 5,27 e 5,40; P (mg dm^{-3}) = 22,87 e 6,0; Matéria orgânica (%) = 2,47 e 1,93, respectivamente. Nos últimos 03 anos a área experimental foi cultivada somente com quinoa no inverno e pousio no período chuvoso.

4.2.2 Delineamento experimental e condução do experimento

O experimento foi constituído por 3 genótipos elites de quinoa e a variedade BRS Piabiru. Os genótipos são oriundos da variedade BRS Piabiru que possui alta variabilidade genética, a partir de 980 materiais, conforme descrito por Ribeiro Junior et al. (2013). Para a seleção destes genótipos, foram feitos testes preliminares com 980 genótipos cultivados anteriormente na cidade de Cristalina-GO, com potencial para ciclo precoce e estes materiais foram semeados nos períodos de safrinha e inverno nos anos de 2011, 2012, 2013 e 2014. Foram avaliadas características para se obter os descritores morfológicos e a partir do ano de 2015 os acessos foram escolhidos baseados em ciclo igual ou inferior ao período de 110 dias e sementes de tamanho superior a 2 mm de diâmetro (Grãos Tipo 1). Além do mais, os 04 genótipos foram escolhidos, também, de acordo com suas características produtivas, baseadas em dados de experimentos anteriores.

O delineamento experimental foi em blocos casualizados, com parcelas subdivididas, com quatro repetições; a parcela principal foi composta por 4 genótipos de quinoa (CPAC 4, CPAC 11, CPAC 19 e a BRS Piabiru) e a sub-parcela pelos regimes hídricos (RH) de 150, 247, 389 e 480 mm, correspondente a 31, 51, 81 e 100% da evapotranspiração da cultura (Etc). O experimento foi constituído de 64 parcelas, com espaçamentos entre linhas, parcelas e blocos de 0,5 m, 0,9 m e 1,0 m, respectivamente.

O preparo da área foi realizado por meio de uma gradagem e grade niveladora, em sistema de plantio convencional. A adubação de base foi feita nos sulcos, na dose de 400 kg ha⁻¹ da fórmula 04-30-16 (NPK). A semeadura nas parcelas foi realizada manualmente na última semana de maio de 2017, com densidade de semeadura de aproximadamente 0,7 gramas de sementes por metro linear (4 g a cada 6 metros

lineares). A elevada taxa de semeadura utilizada foi feita para se evitar a desuniformidade do stand final devido a possíveis falhas na germinação. Foi feito o desbaste aos 25 dias após a emergência (DAE), para se obter um stand final de 20 plantas/m. A adubação nitrogenada de cobertura foi feita a lanço aos 30 dias após a emergência das plantas, na dose de $100 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$, na forma de ureia. Para evitar a competição das eventuais plantas invasoras, foram realizadas capinas manual.

Os regimes hídricos foram obtidos utilizando o sistema denominado *line source sprinkler system* (HANKS et al., 1976), modificado, com uma barra irrigadora de 40 m de largura, modelo 36/42 (Irriga Brasil, Pinhais, PR, Brasil), tracionada por um carretel auto propelido em que cada aspersor possui uma vazão, gerando uma irrigação em gradientes de forma decrescente do centro para as extremidades do experimento, conforme descrito por Jayme-Oliveira et al., (2017).

A primeira irrigação foi feita um dia após a semeadura e até os 30 DAE todos os tratamentos receberam irrigação uniforme a cada 3 dias, totalizando uma lâmina de 126 mm. A partir dos 30 DAE, foi feita a aplicação, com turno de rega de 5 dias, de lâminas com taxa variável de 24, 121, 263 e 354 mm, que foram somadas à lâmina uniforme de 126 mm, totalizando 150, 247, 389 e 480 mm, representando os regimes hídricos. Nessa fase, foram realizadas 10 irrigações. A medição do volume de água aplicado em cada irrigação foi controlada por uma fileira de coletores instalados a cada metro linear paralelos à linha de irrigação.

As irrigações foram realizadas conforme descrito no programa de monitoramento de irrigação no Cerrado (EMBRAPA, 2011), utilizando-se como referência a cultura do trigo, os indicadores agrometeorológicos da região, o tipo de solo e a data de germinação plena.

4.2.3 Variáveis analisadas

No florescimento pleno dos genótipos de quinoa, aos 60 dias após a emergência, foram avaliadas as respostas fisiológicas nos diferentes regimes hídricos. As avaliações fisiológicas: trocas gasosas (taxa fotossintética (A), carbono interno (C_i), condutância estomática (g_s) e transpiração (E)), Rendimento Quântico Efetivo do Fotossistema II ($F'v/F'm$), conteúdo relativo de água, índice de clorofilas e teor de prolina foram feitas nas folhas mais jovens completamente expandidas dos genótipos CPAC 4, CPAC 11, CPAC 19 e da Piabiru.

Foram realizadas curvas de taxa de assimilação líquida de carbono em resposta à densidade de fluxo de fótons fotossinteticamente ativos (Figura 8), com valores de 2000, 1750, 1500, 1250, 1000, 750, 500, 200, 100, 50, 20 e 0 μmol fótons $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$. As curvas foram realizadas no período da manhã (entre 8 e 12 horas) em quatro plantas, com o analisador de gases por infravermelho já descrito.

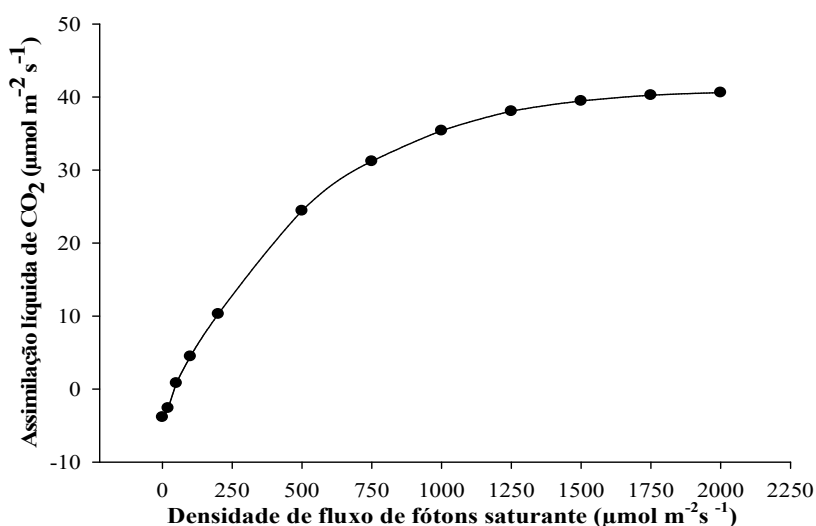


Figura 8. Curva de taxa de assimilação líquida de carbono em resposta à densidade de fluxo de fótons fotossinteticamente ativos para a quinoa.

As avaliações das trocas gasosas foram realizadas no período da manhã, entre 8:00 e 12:00 horas, para isso utilizou-se um sistema portátil de trocas gasosas de fluxo aberto (IRGA - LI-6400XT; LI-COR Inc., Lincoln, NE). As trocas gasosas foram determinadas com concentração de CO₂, temperatura e umidade relativa do ar ambiental e densidade de fluxo de fótons saturante (2000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) previamente determinado por meio da realização de curvas de resposta à luz. Em cada tratamento foram feitas 03 repetições, e em cada repetição fez-se 05 pontuais, totalizando 240 avaliações de trocas gasosas por bloco.

O Rendimento Quântico Efetivo do Fotossistema II é dado por, $F'v/F'm = (Fm' - F0') / Fm'$, segundo Genty et al. (1989). A determinação da fluorescência máxima (F'm) e Fluorescência Basal (F'0), foram avaliados com a folha adaptada à luz utilizando o sistema portátil de trocas gasosas de fluxo aberto (IRGA - LI-6400XT; LI-COR Inc., Lincoln, NE)

O CRA foi determinado segundo a metodologia de Barrs e Wheaterley (1962). O CRA corresponde à quantidade de água medida em um dado instante de um tecido, comparada com a máxima quantidade de água que ele poderá reter. Determinou-se o conteúdo relativo de água (CRA) a partir de discos foliares de 1 cm de diâmetro, obtidos de folhas coletadas no período da antemanhã, entre 03:00 e 05:00 horas. Foram utilizados 10 discos foliares nos quatro RHs para os quatro genótipos, totalizando 160 discos por bloco. Os discos foram imediatamente pesados após a coleta. Posteriormente, os discos foram imersos em placas de Petri com água destilada por 24 horas, em temperatura ambiente e no escuro, para atingir máxima embebição. Logo após este período, os discos foram pesados para a determinação da massa túrgida e colocados em estufa a 60°C para a determinação da massa seca. A partir da massa da matéria fresca

(MF), massa túrgida (MT) e massa seca (MS), foi calculado o conteúdo relativo de água dos discos, de acordo com a fórmula.

$$\text{CRA} = \{[(\text{MF} - \text{MS})/(\text{MT} - \text{MS})] \times 100\}\%,$$

O índice de clorofilas (*a*, *b*, *a+b* e *a/b*) foi avaliado no período da manhã, com o auxílio de um ClorofiLOG digital, modelo CFL 1030, da Falker. As medições foram realizadas nas folhas mais jovens totalmente expandidas com 10 repetições nos quatro RHs para os quatro genótipos, totalizando 160 medições bloco.

As amostras de folhas para avaliação dos teores de prolina foram coletadas no período da tarde, entre 13:30 e 15:00 horas. Foram coletadas as folhas mais jovens completamente expandidas nos quatro regimes hídricos, colocadas imediatamente em nitrogênio líquido e mantidas em freezer a -80°C até a realização da análise.

O teor de prolina foi determinado segundo metodologia de Bates (1973). O extrato bruto das amostras foi obtido através da maceração de 0,5 g de matéria fresca de folhas em 10 ml de ácido sulfosalicílico a 3%. Foram colocados 500 microlitros do extrato de cada amostra em tubo de ensaio contendo 2,75 ml de água destilada, adicionando-se 2 ml de ninhidrina ácida, 2 ml de ácido acético glacial e 100 microlitros de glicina. Em seguida, as amostras foram mantidas por 1 hora em banho-maria a 100°C (BATES et al., 1973). Após o resfriamento das amostras por imersão em banho de gelo, a densidade óptica foi avaliada a 515 nm, em espectrofotômetro Pharmacia Ultrospect III. A absorbância obtida foi comparada com a curva padrão de prolina e os resultados expressos em μmol de prolina/g de matéria fresca (MF). As análises de prolinas foram feitas em duplicatas, sendo realizadas duplicatas nos quatro RHs para os quatro genótipos, totalizando 32 análises de prolina por bloco.

A massa de mil grãos (M1000) foi realizada conforme o método descrito por Brasil (2009), em que se realiza a contagem manual de 100 grãos de cada subparcela que são pesados em balança semi-analítica e o resultado obtido é multiplicado por 10.

4.2.4 Análise estatística

A análise estatística foi realizada pela análise de variância (ANOVA). O modelo estatístico foi ajustado utilizando-se o procmixeddo SAS versão 9.0, por meio do método de máxima verossimilhança restrita (reml). As fontes de variação foram os genótipos (parcelas), os regimes hídricos (subparcelas) e suas interações. A comparação de médias foi feita pelo teste de Tukey, ao nível de probabilidade de 5%. Para as interações não significativas, foi feito o ajuste de equações de regressão para o fator regime hídrico. As análises estatísticas foram realizadas com o software estatístico SAS versão 9 (SAS, 2008) e os gráficos foram feitos utilizando-se o software Sigma Plot, versão 10 (SYSTAT SOFTWARE, 2006).

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Todas as variáveis estudadas apresentaram resíduos normais de acordo com o teste de Shapiro-Wilk a 5% de significância. O resumo das análises das variâncias das respostas fisiológicas de quinoa, concentração interna de carbono (C_i), transpiração (E), condutância estomática (g_s) e fotossíntese (A) e rendimento quântico efetivo do fotossistema II ($F'v/F'm$) em função dos genótipos e regimes hídricos está apresentado na Tabela 8.

Houve diferença altamente significativa para as variáveis analisadas dentro dos fatores genótipos e regime hídrico, exceto para C_i e $F'v/F'm$ que não apresentaram diferença estatística para genótipos (G). Houve interação significativa entre os genótipos de quinoa e os regimes hídricos (Tabela 8) para g_s , E , C_i e A .

Tabela 8. Resumo da análise de variância com valores de F e coeficiente de variação para concentração interna de Carbono (C_i), transpiração (E), condutância estomática (g_s), fotossíntese (A), rendimento quântico efetivo do fotossistema II ($F'v/F'm$) e conteúdo relativo de água (CRA) de genótipos de quinoa em função dos regimes hídricos.

FV	g_s	E	C_i	A	$F'v/F'm$
Genótipos (G)	19,15 ^{**}	17,62 ^{**}	0,61 ^{ns}	6,42 ^{**}	2,35 ^{ns}
Regime Hídrico (RH)	315,11 ^{**}	273,32 ^{**}	83,40 ^{**}	36,92 ^{**}	7,06 ^{**}
G*RH	10,66 ^{**}	5,71 ^{**}	1,73 [*]	2,49 [*]	0,65 ^{ns}
CV	12,62	11,12	12,41	25,90	10,62

FV= Fonte de Variação CV= Coeficiente de variação; ns – não significativo ($p>0,05$); * – significativo ($p<0,05$); ** – significativo ($p<0,01$); Clor=Clorofila; M1000=massa seca de mil grãos.

4.3.1 Trocas gasosas, $F'v/F'm$ e índice de clorofilas

4.3.1.1 Condutância estomática

A g_s é considerada um indicador bastante sensível ao déficit hídrico nas plantas, o que possibilita o uso dessa variável na avaliação de genótipos adaptados para o cultivo em ambientes com limitada disponibilidade hídrica. Além disso, o mecanismo de fechamento dos estômatos é considerado um dos maiores fatores de limitação da fotossíntese (FLEXAS et al., 2014). Quando os estômatos estão abertos, permitem a assimilação de CO_2 e ocorre à perda de H_2O e com seu fechamento, há redução da entrada de CO_2 para os sítios de carboxilação da rubisco no interior dos cloroplastos e conservam H_2O , reduzindo o risco de desidratação (TATAGIBA et al., 2015).

Em resposta a um estresse por déficit hídrico, os sistemas de transporte de íons e de água através das membranas controlam as mudanças de pressão do turgor nas células-guarda e estimulam o fechamento dos estômatos (OSAKABE et al., 2014). O estresse hídrico é severo quando os valores de condutância estomática estão abaixo $0,1 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (FLEXAS et al., 2004), indicando que, no presente trabalho, todos os genótipos estavam sob estresse severo no RH de 150 mm (Tabela 9).

Tabela 9. Condutância estomática (g_s – $\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) e taxa de transpiração (E – $\text{mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) de quatro genótipos de quinoa (CPAC 4, CPAC 9, CPAC 11 e Piabiru), sob quatro regimes hídricos (150, 247, 389, 480 mm).

	Genótipos	Regime hídrico (mm)				Média dos regimes
		150	247	389	480	
g_s	CPAC4	0,034cD	0,235bC	0,470bB	0,583bA	0,342B
	CPAC11	0,040cC	0,232bB	0,358cA	0,342cA	0,270C
	BRS Piabiru	0,058aD	0,218bC	0,516abB	0,629aA	0,352B
	CPAC19	0,050bC	0,329aB	0,552aA	0,594abA	0,403A
Média dos Regimes		0,045c	0,30b	0,510a	0,512a	
E	CPAC 4	1,45bcD	6,15aC	8,96aB	9,88aA	6,65A
	CPAC 11	1,20cD	4,87bC	6,43cA	5,67cB	4,93B
	BRS Piabiru	3,11aD	4,76bC	8,20aB	9,46aA	6,06A
	CPAC 19	1,71bD	5,83aC	7,27bB	8,38bA	6,70A
Média dos Regimes		1,56c	5,97b	8,3a	8,54a	

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna ou maiúscula na linha, dentro de cada característica, não diferem significativamente entre si pelo Teste de Tukey a 5% de significância.

A condutância estomática apresentou diferença significativa entre os regimes hídricos nos quatro genótipos de quinoa (Tabela 9), com os maiores valores de g_s , nos RHs superiores 389 e 480 mm, independente dos genótipos. Sob condição de seca, o conteúdo de água do solo e da planta afetam a abertura dos estômatos (TIME et al., 2018), o que está de acordo com os resultados deste trabalho, uma vez que, sob regime hídrico ótimo, os valores de g_s variaram de 0,342 a 0,629 $\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, e sob estresse severo, os valores de g_s foram reduzidos entre 0,034 a 0,058 $\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, dependendo do genótipo, podendo indicar um possível comprometimento do aparato fotossintético. A

redução da condutância estomática entre o RH 480 mm e 150 mm foi de 94, 88, 92 e 91 % para os genótipos CPAC 4, CPAC 11, e CPAC 19 e a BRS Piabiru, respectivamente (Tabela 9).

Do mesmo modo, Hussin et al. (2016) avaliando as relações hídricas das plantas de quinoa com disponibilidade de água limitada encontraram valores de condutância estomática de $0,213 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ nos tratamentos irrigados e $0,091 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ sob déficit hídrico. Já Gonzalez et al., (2011) obtiveram valores de g_s em 10 materiais de quinoa cultivadas em campo, sem irrigação, variando de 1,0 a $0,18 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}$, a depender do genótipo.

As diferentes condições hídricas influenciaram os genótipos e a BRS Piabiru apresentou melhor desempenho nos RHs extremos (150 e 480 mm) e o CPAC 19 nos RHs intermediários (247 e 389 mm). O CPAC 19 obteve maior condutância estomática que a Piabiru no RH 247 ($0,329 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), e apresentou a maior g_s levando em consideração a média de todos os regimes. Os genótipos CPAC 11 e CPAC 19 mostraram-se mais eficientes na manutenção da condutância estomática, pois ambos mantiveram a estabilidade dos estômatos significativamente, do RH 480 mm para 389 mm (Tabela 9).

Do mesmo modo, sob estresse moderado (RH 247 mm), o CPAC 11 e o CPAC 19 apresentaram menor redução da g_s , entre 32 e 45%, o que nos mostra um grande potencial desses genótipos na manutenção da g_s tanto em plantas em condição hídrica satisfatória, quanto em plantas estressadas. Por outro lado, a BRS piabiru e o CPAC 4, ocorreram reduções na g_s de 65 e 60%, respectivamente.

4.3.1.2 Transpiração

As variações das taxas transpiratórias seguiram a mesma tendência da condutância estomática, uma vez que à medida que foi intensificado o déficit hídrico os valores de E foram significativamente reduzidos. Para a maioria dos genótipos de quinoa, a partir do RH de 389 mm, houve diminuição da transpiração. No tratamento de irrigação plena (480 mm), a maior disponibilidade de água permitiu um melhor estado hídrico às plantas de forma a manterem maiores valores de E e os genótipos 4 e BRS Piabiru foram os que apresentaram maior taxa de transpiração (Tabela 9).

De acordo os valores de transpiração observados percebe-se que a taxa de transpiração pode ser alterada, dependendo do genótipo de quinoa. Gonzalez et al., (2011) trabalhando com 10 variedades de quinoa em região semi árida, também obtiveram variações genótípicas significativas na taxa de transpiração, com a E mínima de $3,10 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e máxima de $7,38 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. No presente trabalho, os valores de E foram $0,034$ a $9,8 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (Tabela 9).

O CPAC 11 foi o genótipo que mostrou menor E , e ao avaliar os genótipos dentro de cada regime hídrico obteve-se que no RHs superiores (389 e 480 mm) o CPAC 4 e a Piabiru apresentaram e quando decresce para o RH 247 mm o CPAC 4 e o 19 foram melhores. Do mesmo modo que observado para g_s , o CPAC 19 foi superior a Piabiru no RH 247(Tabela 9).

A taxa de transpiração dos genótipos foi afetada pela deficiência hídrica, devido ser regulada pela abertura e fechamento estomático. Assim, à medida que a disponibilidade de água no solo diminui os valores de E decrescem como resultado do fechamento dos estômatos (RONCHI et al., (2015). Desta maneira, quando a perda de água pela transpiração não pode ser compensada pela absorção um desequilíbrio hormonal é

produzido, aumentando a proporção de ácido abscísico (ABA) e reduzindo a concentração de potássio nas células-guarda, o que resulta em perda de turgor e fechamento parcial dos estômatos (TIME et al., 2018).

Sob estresse abiótico, especialmente o estresse hídrico, o ABA atua como uma molécula de sinalização para fechar estômatos e para conservar a água (IQBALET al., 2018). Yang et al. (2016) observaram que o aumento na concentração de ABA nas folhas diminuiu a condutância estomática, aumentou o potencial de água das folhas e a eficiência no uso da água em plantas de quinoa. Deste modo, o fechamento estomático e conseqüentemente a redução da transpiração observado em plantas de quinoa no presente estudo pode estar relacionado ao aumento do conteúdo de ABA sob condições limitadas de água.

Além do mais, a redução da perda de água por transpiração pode ocasionar um aumento na temperatura foliar de plantas sob restrição hídrica. A alta temperatura das folhas pode reduzir a taxa de assimilação de CO₂ por danos fotoinibitórios ao aparato fotossintético (LI et al., 2004), comprometendo o desenvolvimento da cultura. Sob boa condição hídrica, os estômatos se abrem permitindo uma maior transpiração, e isso propiciam que a temperatura foliar fique menor que a do ar circundante (SALIN et al., 2009). Tal fato justifica o aumento na taxa de transpiração e condutância estomática quando os genótipos foram irrigados com maiores quantidades de água.

4.3.1.3 Carbono interno

Da mesma maneira, comportamento semelhante foi observado para o C_i , em que o acúmulo de carbono nas cavidades subestomáticas foi mais elevado sob maior disponibilidade hídrica e menor sob estresse severo, o que está de acordo com a g_s e E ,

uma vez que a absorção de CO₂ está relacionada com a condutância estomática (Tabela 10). Esse comportamento é comum em condições de deficiência hídrica, onde o déficit hídrico afeta a turgidez celular e a abertura estomática resultando em diminuições nas taxas de transpiração e assimilação de CO₂ (WASEEM et al., 2011).

No entanto, quando se avalia cada genótipo dentro das lâminas, no menor regime hídrico, o genótipo CPAC 4 foi que mais acumulou C_i e nos regimes superiores os genótipos CPAC 11, CPAC 19 e a variedade Piabiru apresentaram acúmulo similar de C_i (Tabela 10). O CPAC 4 foi o menos eficiente no maior RH (480 mm), pois transpirou mais que os demais materiais e assimilou menos CO₂; sob menor disponibilidade hídrica (RH 150 mm) ele foi o mais eficiente, uma vez que acumulou mais C_i transpirando menos. Do mesmo modo, Gonzalez et al., (2011) avaliando 10 cultivares de quinoa em região árida observaram que os valores médios de C_i variaram de acordo a variedade de quinoa, e que o acúmulo de C_i maior foi de 295 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e o menor de 265 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ sob uma precipitação total de 160 mm durante o desenvolvimento da cultura.

4.3.1.4 Fotossíntese

A fotossíntese (A) média dos genótipos de quinoa nos regimes hídricos apresentou valores maiores nos RHs superiores e estresse moderado (247, 389 e 480mm). De uma forma geral, a fotossíntese dos genótipos diminuiu gradualmente com a redução da disponibilidade hídrica. Na comparação entre o maior (480 mm) e o menor (150 mm) RH, observa-se uma redução da taxa fotossintética de 83, 70, 74 e 75% para os genótipos 4, 11, 19 e a Piabiru, respectivamente. Resultados semelhantes foram obtidos por Zhang et al., (2016), em que a redução na disponibilidade de água, causou

diminuição da taxa fotossintética, condutância estomática e transpiração, pois esses processos estão intimamente ligados.

Na avaliação dos genótipos dentro de cada regime hídrico houve maior taxa fotossintética do genótipo CPAC 19 e da cultivar BRS Piabiru em todos os RHs (Tabela 10), com excessão no RH 247 para a Piabiru. O CPAC 11 apresentou maior potencial fotossintético no regime de 389 mm que corresponde a 81% da Etc. O que condiz com os resultados anteriores, visto que a taxa fotossintética apresentou comportamento semelhante ao observado na condutância estomática, transpiração e assimilação interna de CO₂, sendo reflexo do movimento de abertura e fechamento dos estômatos nas diferentes condições hídricas. Esses resultados sugerem que a redução das taxas fotossintéticas nos regimes mais estressado está relacionada com o fechamento parcial e conseqüente redução da assimilação de *C_i* (Tabela 10).

Tabela 10. Carbono interno (*C_i* - μmol m⁻² s⁻¹) e taxa fotossintética (*A* - μmol m⁻² s⁻¹) de quatro genótipos de quinoa (CPAC 4, CPAC 9, CPAC 11 e Piabiru), em quatro regimes hídricos (150, 247, 389, 480 mm).

	Genótipos	Regime hídrico (mm)				Média dos genótipos
		150	247	389	480	
<i>C_i</i>	CPAC 4	144,0aC	195,3aB	239,9bA	241,2bA	206,1A
	CPAC 11	112,6bC	198,6aB	253,6aA	259,2aA	199,4A
	BRS Piabiru	129,0abD	191,3aC	257,0aB	270,3aA	211,7A
	CPAC 19	82,5cC	198,4aB	255,9aA	256,9abA	200,3A
Média dos Regimes		110,6c	202,0b	250,6a	254,3a	
<i>A</i>	CPAC 4	4,9cD	19,0cC	22,0bB	28,1bA	18,6B
	CPAC 11	5,9bC	20,5bcB	22,9bA	20,0cB	17,2C
	BRS Piabiru	9,0aD	22,4bC	32,9aB	35,4aA	24,7AB
	CPAC 19	8,9aC	27,0aB	32,9aA	34,3aA	25,0A
Média dos Regimes		7,0c	23,8a	27,1a	27,5a	

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna ou maiúscula na linha, dentro de cada característica, não diferem significativamente entre si pelo Teste de Tukey a 5% de significância.

Hussin et al., (2016), encontrou valores da taxa fotossintética de quinoa semelhantes aos obtidos neste estudo, $20,47 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ em condições ideais de umidade do solo a $11,53 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ sob déficit hídrico, no entanto, nos genótipos estudados neste trabalho foram obtidas taxas fotossintéticas 58% maiores no RH de 480 mm. Esses resultados indicam que, apesar da quinoa ser considerada tolerante a estresse hídrico, os genótipos possuem diferentes respostas fotossintética sob condições irrigadas e sob deficit hídrico, sugerindo que deve-se fazer seleção de materiais mais tolerantes à seca e que mantêm altas atividade fotossintéticas.

A g_s é um mecanismo determinante para a assimilação de CO_2 , pois os genótipos de quinoa com g_s superiores (CPAC 19 e Piabiru) foram capazes de manter maior taxa de fotossíntese, o que pode estar associado com a maior assimilação interna de CO_2 , no momento em que as plantas estavam com os estômatos abertos, uma vez que, a redução da fotossíntese decorrente da deficiência hídrica está relacionada principalmente ao decréscimo da difusão de CO_2 da atmosfera até o sítio de carboxilação nas células das folhas (PINHEIRO; CHAVES, 2011).

As alterações fisiológicas desencadeadas em resposta as diferentes disponibilidade de água, possibilitam caracterizar o comportamento de diferentes genótipos sob deficit hídrico. O presente estudo possibilitou observar que no genótipo 4 os efeitos do déficit hídrico foram mais acentuados que nos demais genótipos, uma vez que apresentou a fotossíntese sob estresse hídrico. De uma forma geral, o genótipo 19 e a Piabiru apresentaram maior condutância estomática e taxa fotossintética em todos os regimes estudados. Diante disso, a intensidade e as conseqüências da deficiência hídrica nas alterações do metabolismo das plantas dependem do grau de estresse, da variedade da cultura e das influencias das condições ambientais (IQBAL et al., 2018).

4.3.1.4 Rendimento Quântico Efetivo do Fotossistema II

De acordo com Santos et al. (2010), as medidas de trocas gasosas são significativas para determinar as taxas fotossintéticas porém podem não ser eficientes para avaliar os efeitos deletérios nos cloroplastos. Segundo esses autores, a avaliação da fluorescência da clorofila *a* revela o nível de excitação da energia que dirige a fotossíntese e fornece subsídios para estimar a inibição ou o dano no processo de transferência de elétrons do Fotossistema II (PSII).

Desta maneira, foi avaliada a eficiência do PSII por meio do Rendimento Quântico Efetivo do Fotossistema II ($F'v/F'm$) (Figura 9). O $F'v/F'm$ representa a eficiência de captura da excitação pelos centros de reação abertos do PSII (GENTY et al., 1989).

Para a relação $F'v/F'm$ não foi obtida interação entre os genótipos e as lâminas de água aplicadas. Os fatores variaram de modo independente e não foi observada diferença significativa entre os genótipos (Tabela 9).

O efeito dos regimes hídricos na relação $F'v/F'm$ das plantas de quinoa foi submetido a ajuste de equação de regressão. A análise de regressão mostrou efeito significativo ($p < 0,05$), observando-se ajuste quadrático com o acréscimo da disponibilidade hídrica no solo, com valor máximo (0,52) de $F'v/F'm$ no maior RH (480 mm) e o mínimo (0,43) no RH 150 mm. (Figura 9), indicando que a eficiência do PSII foi significativamente reduzida quando as plantas foram submetidas ao RH 150 mm.

Os resultados obtidos mostram que as plantas tiveram a eficiência fotoquímica afetada negativamente pela condição de déficit hídrico no RH 150 e 247 mm e podem indicar que ocorreram danos no aparato fotossintético dessas plantas, o que justifica a baixa taxa fotossintética (Tabela 10) dos genótipos de quinoa neste RH.

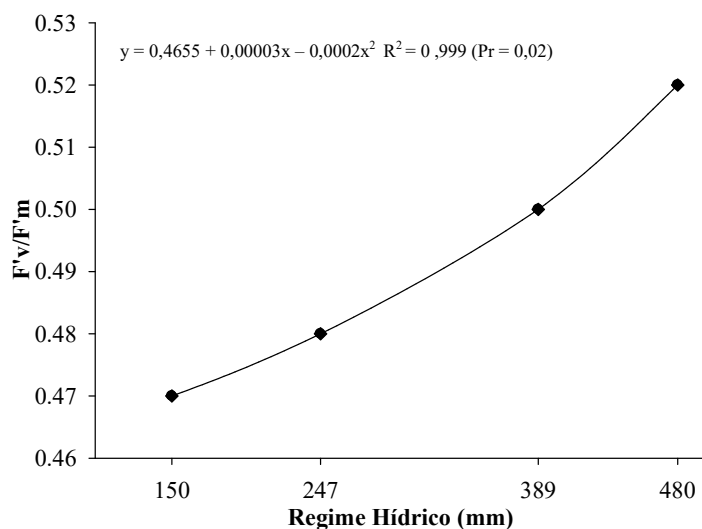


Figura 9. Efeitos dos regimes hídricos (150, 247, 389 e 480 mm) no rendimento quântico efetivo do fotossistema II (F'_{v}/F'_{m}) em genótipos de quinoa.

Uma vez que o déficit hídrico afeta a turgidez celular e a abertura estomática, resultando em diminuições nas taxas de transpiração e assimilação de CO_2 , inibindo o metabolismo foliar (WASEEM et al., 2011). Sob taxa reduzida de assimilação de CO_2 , o equilíbrio entre atividade fotoquímica no PSII e a exigência eletrônica para a fotossíntese é afetada, gerando uma excitação excessiva no sistema fotossintético e danos fotoinibitórios dos centros de reação do PSII (RCs) (ALBERT et al., 2011).

No entanto, os resultados mostram que a relação F'_{v}/F'_{m} foi pouco responsiva ao aumento da irrigação, o que sugere uma maior eficiência do fotossistema II de plantas de quinoa sob irrigação deficitária, com resposta mais expressiva nos RHs 150 e 247 mm (Figura 9). Tal comportamento pode estar relacionado ao grau de sensibilidade ou resistência à seca da planta e pode indicar sua estratégia para lidar com o déficit hídrico (STIKIĆ et al., 2015).

4.3.1.4 Índice de Clorofilas

O índice de clorofila nos genótipos não foi significativamente afetado pelos regimes hídricos (Tabela 11). Do mesmo modo González et al., (2009) avaliando as respostas fisiológicas de quinoa às tensões de seca e alagamento não encontrou diferença significativa para o conteúdo de clorofila nos diferentes tratamentos. Por outro lado, existem controvérsias na literatura acerca do comportamento dessa variável em função da deficiência hídrica. Alguns autores descrevem diminuição dos teores de clorofila, outros reportam incrementos, o que pode ser interpretado como uma resposta adaptativa aos agentes estressantes (MENDES et al., 2011).

Tabela 11 - Resumo da análise de variância com valores de F e coeficiente de variação para clorofila *a*, *b* *a/b* e *a+b*, prolina e massa de mil grãos de genótipos de quinoa em função dos regimes hídricos.

FV	Clora	Clorb	a+b	a/b	CRA	Prolina	M1000
Genótipos (G)	3,54*	19,52**	11,39**	15,90**	2,48 ^{ns}	19,83**	31,38**
Regime Hídrico (RH)	2,01 ^{ns}	0,69 ^{ns}	0,71 ^{ns}	1,013 ^{ns}	43,11**	4,21**	22,71**
G*RH	0,29 ^{ns}	0,40 ^{ns}	1,61 ^{ns}	0,54 ^{ns}	1,73 ^{ns}	2,59*	0,95 ^{ns}
CV (%)	3,18	15,27	6,30	13,34	8,66	20,59	5,13

FV= Fonte de Variação; CV= Coeficiente de variação; ns – não significativo ($p>0,05$); * – significativo ($p<0,05$); ** – significativo ($p<0,01$); Clor=Clorofila; M1000=massa seca de mil grãos.

Foram observadas diferenças significativas no índice de clorofila entre os genótipos estudados o que está de acordo com os dados obtidos por Gonzalez et al., (2011) que também observaram diferenças no conteúdo de clorofila entre diferentes variedades de quinoa. Os maiores índices de clorofila *a* foram obtidos no genótipo19 e na Piabiru (Tabela 12). Segundo Sheshshayee et al. (2006) um alto teor de clorofila é uma característica desejável porque indica um baixo grau de fotoinibição.

Portanto, é esperado que cultivares que mantenham maiores conteúdos desses pigmentos sob deficiência hídrica, têm melhor capacidade de tolerar essa condição, devido à estreita relação entre clorofilas, potencial fotossintético e produtividade

(O'NEILL et al., 2006). Tal fato explica os resultados desse estudo, uma vez que o genótipo CPAC 19 apresentou maior potencial fotossintético e maiores índices de clorofila $a + b$ (Tabela 12).

Tabela 12. Clorofila a , b , a/b e $a+b$ realizados em quatro genótipos de quinoa, independente dos regimes hídricos (150, 247, 389 e 480 mm).

Genótipo	Clorofila a	Clorofila b	Clorofila a/b	Clorofila $a+b$
CPAC4	44,1b	14,4a	3,13a	59,1bc
CPAC11	43,7c	16,5a	3,28a	57,4c
BRS Piabiru	45,0ab	16,5a	2,90a	61,4b
CPAC19	45,4a	18,9a	2,27b	66,0a

*Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna, dentro de cada característica, não diferem significativamente entre si pelo Teste de Tukey a 5% de significância.

O índice de clorofila b não se diferenciou entre os genótipos. A clorofila a apresentou a mesma tendência dos dados obtidos para clorofila $a+b$. No entanto, a razão clorofila a/b apresentou efeito contrário, ou seja, os genótipos que obtiveram os menores valores de clorofila $a+b$ e clorofila a nos quatro genótipos, apresentaram maior razão clorofila a/b (Tabela 12).

4.3.3 Conteúdo relativo de água

A sensibilidade do CRA em plantas de quinoa sob déficit hídrico mostra a importância dessa variável para a avaliação de tolerância desta cultura à seca, pois, o CRA é um indicador das condições hídricas da planta, principalmente durante períodos de seca.

Para CRA não foi obtida interação entre os genótipos e as lâminas de água aplicadas. Os fatores variaram de modo independente e não foi observada diferença significativa entre os genótipos (Tabela 11).

A análise de regressão linear mostrou efeito significativo ($p < 0,05$) para CRA em função dos regimes hídricos e permitiu estimar o CRA máximo de 81,1% no RH 480 mm e o mínimo de 58,1 % sob déficit hídrico (RH 150 mm) com uma redução de 23% do conteúdo relativo de água das folhas (Figura 10). Neste trabalho, observou-se que o RH 389 mm contribuiu para uma redução mínima do conteúdo relativo de água nas folhas de quinoa, já o RH 247 mm reduziu significativamente o CRA. Portanto, é possível inferir que os genótipos tenham utilizado algum tipo de estratégia para evitar a perda de água e manter a turgidez com uma redução de aplicação de água de até 19 %, já com 49 % as plantas não toleraram e ocorreu a desidratação das folhas.

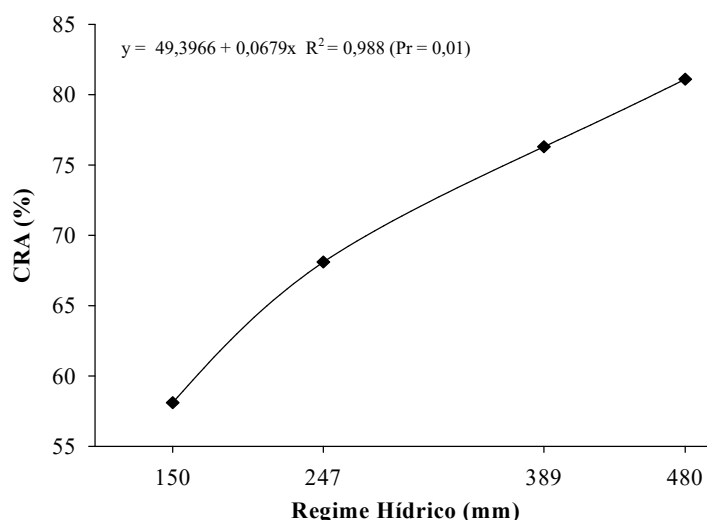


Figura 10. Efeitos dos regimes hídricos (150, 247, 389 e 480 mm) no conteúdo relativo de água (CRA) em genótipos de quinoa.

De acordo Barrs e Weatherley (1962), valores de CRA em torno de 98 % indicam folhas turgidas e entre 30 a 40 % revelam planta com escassez de água. Porém, para a maioria das espécies o CRA em torno de 60 a 70 % já sinaliza folhas com murchamento inicial (BARRS; WEATHERLEY, 1962). Desta maneira, apenas as plantas do RH 480

e 389 mm apresentaram alto CRA na folha, os demais RHs apresentaram plantas com início de murchamento (Figura 10).

4.3.2 Prolina

Sob estresse hídrico, a absorção de água pelas plantas é reduzida, o que resulta em alterações no potencial osmótico da planta. No entanto, o aumento de solutos ou osmoprotetores compatíveis (prolina, glicina, betaína e açúcar) ajusta o desequilíbrio osmótico quando as plantas são expostas à seca (NOUNJAN et al., 2018). O acúmulo de solutos compatíveis não é nocivo ao metabolismo celular e, por aumentar a pressão osmótica no interior das células, mantêm a absorção de água e a sua pressão de turgor, mantendo os processos fisiológicos das plantas, ainda que em níveis menores (MARIJUAN; BOSCH, 2013).

Tabela 13. Conteúdo médio de prolina ($\mu \text{ mol g}^{-1} \text{ MF}$) de quatro genótipos de quinoa (4, 9, 11 e 15), em quatro regimes hídricos (150, 247, 389, 480 mm).

Genótipos	Regime hídrico (mm)				Média dos Genótipos
	150	247	389	480	
CPAC 4	0,09bA	0,07aAB	0,06aB	0,07abAB	0,07B
CPAC 11	0,13aA	0,07aB	0,06aC	0,05bC	0,08AB
Piabiru	0,11abA	0,08aAB	0,07aB	0,07abB	0,08AB
CPAC 19	0,11abA	0,09aA	0,09aA	0,09aA	0,09 A
Média dos Regimes	0,11a	0,08b	0,07b	0,07b	

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna ou maiúscula na linha, dentro de cada característica, não diferem significativamente entre si pelo Teste de Tukey a 5% de significância.

Houve interação significativa entre os genótipos de quinoa e os regimes hídricos para o teor de prolina nas folhas. Em geral, todos os genótipos apresentaram maior acúmulo de prolina no menor regime hídrico (150 mm (Tabela 13)).

O CPAC 11 e Piabiru reduziram os teores de prolina sob maior disponibilidade hídrica, essa redução observada em plantas cultivadas em solo com condições ideais de

umidade é em decorrência, dos teores de prolina sob estresse hídrico aumentarem em até 100 vezes em comparação a plantas irrigadas (VERBRUGGEM; HERMANS, 2008). O acúmulo de prolina é uma característica importante para a seleção de plantas tolerantes à seca (REJEB et al., 2014), pois contribui para atenuar os efeitos da seca no desenvolvimento das culturas.

4.3.3 Massa seca de mil grãos

Foi avaliada a massa seca de 1000 grãos (M1000) de quinoa e não houve interação significativa entre os fatores genótipo e regime hídrico (Tabela 11). Os efeitos dos regimes hídricos na massa de 1000 grãos de quinoa foram avaliados por meio da análise de regressão e estão representados na Figura 11. A M1000 apresentou comportamento polinomial quadrático nos diferentes regimes hídricos, com um aumento crescente da M1000 até o RH 389 mm e a partir deste houve redução da massa dos grãos com o aumento da disponibilidade hídrica.

Os diferentes RHs aplicados provocaram alterações na massa seca de 1000 grãos de quinoa, uma vez que foi verificado maior incremento dessa variável nas plantas com uma disponibilidade hídrica de 81% da ETC (Figura 11). Sob estresse hídrico, com um suprimento de água de 150 mm, houve diminuição de 14% da M1000 de quinoa. Resultados semelhantes foram obtidos por Geerts et al., (2008), uma vez que em plantas de quinoa irrigadas a massa de 1000 grãos foi significativamente maior (5,5 g) em comparação com o tratamento de sequeiro (4,2 g) (Figura 11).

A menor massa de sementes em plantas sob estresse hídrico pode estar relacionada à redução da assimilação de CO₂ devido ao fechamento estomático, o que resultou em uma menor taxa fotossintética e conseqüentemente reduziu a produção de

fotoassimilados. Portanto, a diminuição da capacidade fotossintética durante o período de desenvolvimento da cultura resulta em declínio na massa de grãos de quinoa.

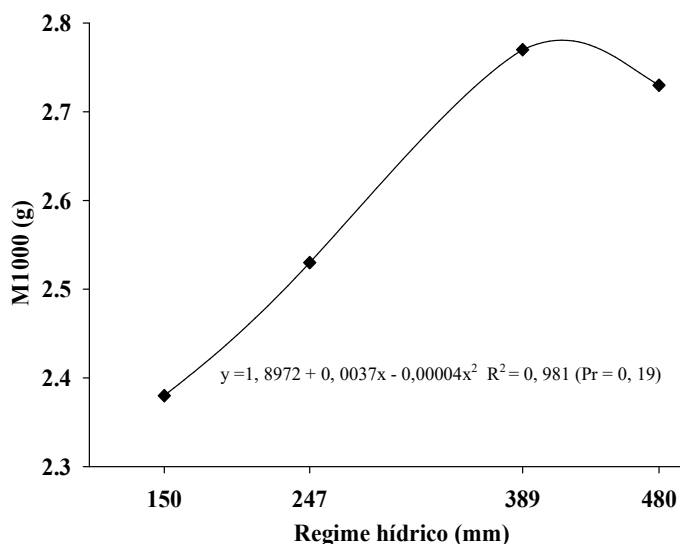


Figura 11. Efeitos dos regimes hídricos 150, 247, 389 e 480 mm na massa de 1000 grãos (M1000) em genótipos de quinoa.

A M1000 foi responsiva à irrigação até o RH 389 mm e o aumento do RH não promoveu resposta crescente da M1000, indicando que o estresse tanto por déficit quanto por excesso de água podem resultar em perda na M1000 (Figura 11).

A massa de 1000 grãos dos quatro genótipos de quinoa está apresentada na Figura 12. O genótipo CPAC 11 e a Piabiru apresentaram resultados superiores. O genótipo 4 apresentou resultados inferiores ao CPAC 11 e a Piabiru e superior ao CPAC 19, que apresentou a menor M1000.

Neste estudo foi obtido M1000 de 2,35 a 2,84, dependendo do genótipo (Figura 12). No entanto, resultados superiores foram obtidos por Delgado et al. (2009) que registraram uma massa de 1000 grãos de quinoa entre 2,5 e 3,4 g, comparando 16

genótipos de quinoa em um experimento de campo. Nos estudos de González et., al (2011), a massa de mil grãos de quinoa variam de 1,61 a 3,55 g.

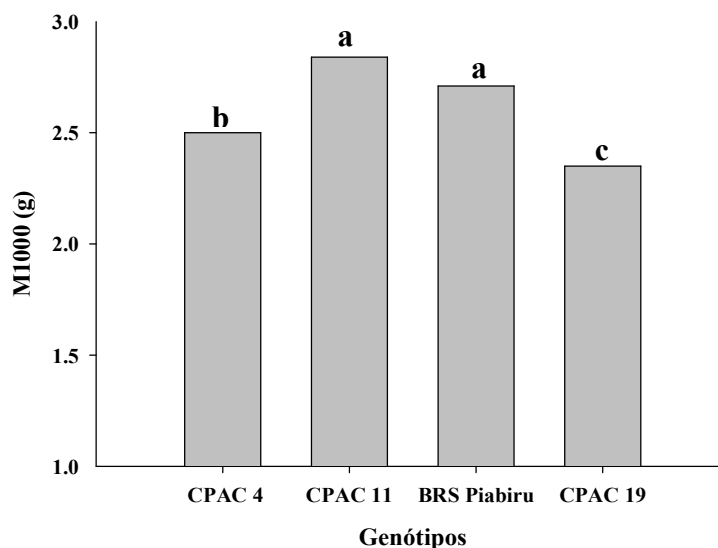


Figura 12. Massa seca de 1000 grãos (M1000) em quatro genótipos (CPAC 4, CPAC 11, CPAC 19 e Piabiru).

Esses dados indicam que em concordância com a taxa fotossintética e condutância estomática a Piabiru foi um dos mais produtivos, enquanto que o CPAC 11 apresentou a menor A e g_s e apresentou à maior M1000. Já o genótipo CPAC 19 que apresentou a maior taxa de fotossíntese, foi o que apresentou à menor M1000. Deste modo, o CPAC 11 apresentou o maior valor de rendimento de sementes por unidade de fotossíntese (Figura 12).

Diante disso, o conhecimento dos mecanismos que regulam, controlam e melhoram as respostas adaptativas e de tolerância ao estresse em diferentes genótipos de quinoa é fundamental para desenvolver estratégias para manter ou aumentar a produtividade das plantas em ambientes com limitações hídricas e selecionar aqueles genótipos mais adaptados fisiologicamente ao deficit hídrico.

Os mecanismos de prevenção contra a seca se referem à capacidade da planta de reter níveis relativamente altos de hidratação sob estresse hídrico, e envolvem dois componentes: maximizar a absorção de água e minimizar a perda de água (STIKIĆ et al., 2015). A maximização da absorção de água pode ser alcançada aumentando o crescimento, a espessura, a profundidade e a massa das raízes. A perda de água pode ser minimizada pelo fechamento dos estômatos, reduzindo a área do dossel, o crescimento e o desprendimento das folhas mais velhas (JOVANOVIĆ e STIKIĆ, 2012).

De acordo os dados obtidos neste trabalho os genótipos de quinoa apresentaram mecanismos de prevenção à seca, uma vez que sob estresse a planta fecha seus estômatos e reduz a perda de água por transpiração, além de aumentar a concentração de soluto osmoprotetor, que auxilia no ajuste do desequilíbrio osmótico e na manutenção da absorção de água, o que contribui para a manutenção da pressão de turgor.

4.4 CONCLUSÕES

Os resultados do presente trabalho indicam que a reação das plantas de quinoa ao déficit hídrico é baseada nos mecanismos de prevenção e evitação da seca: fechamento estomático, redução da transpiração e absorção contínua de água por meio do ajuste osmótico.

O regime hídrico de 389 mm foi o que resultou em melhores resultados para a quinoa.

O CPAC 19 apresentou a maior condutância estomática, taxa fotossintética e conteúdo de prolina, no entanto, o CPAC 11 juntamente com a Piabiru foi os que apresentaram a maior massa de 1000 grãos.

4.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBERT, K. R; MIKKELSEN, A; MICHELSEN, H; RO-POULSEN E L. van der Linden. Interactive effects of drought, elevated CO₂ and warming on photosynthetic capacity and photosystem performance in temperate heath plants. **Journal of Plant Physiology**, v.168, n. 13, p. 1550-156, 2011.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; DE MORAES, G.; LEONARDO, J.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013

BARRS, H. D.; P. E. WEATHERLEY. A re-examination of the relative turgidity technique for estimating water deficits in leaves. **Australian journal of Biological Science**, v. 15, n. 13, p.4 13-428, 1962.

BATES, L. S.; WALDREN, R. P.; TEARE, I. D. Rapid determination of free proline for water-stress studies. **Plant Soil**, v. 39, n. 1, p. 205-207, 1973.

BRASIL - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Regras para análise de sementes**. Secretaria de Defesa Agropecuária. 1. ed. Brasília: Mapa/ACS, 2009. 399 p.

CHAVES, MM, JP MAROCO E JS PEREIRA. Understanding plant responses to drought—from genes to the whole plant. **Functional plant biology**, v. 30, n. 3, p. 239-264, 2003.

COCOZZA, C.; PULVENTO, A.; LAVINI, M.; RICCARDI, R.; D'ANDRIA; R. TOGNETTI. Effects of increasing salinity stress and decreasing water availability on ecophysiological traits of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) grown in a Mediterranean-type agroecosystem. **Journal Agronomy Crop Science**. v. 199, n. 4, p. 229-240, 2012.

DELGADO, P. A. I; PALACIOS, C. J. H; BETANCOURT, G.C. Evaluación de 16 genotipos de quinua dulce (*Chenopodium quinoa* Willd.) en el municipio de Iles, Nariño (Colombia). 2009. **Agronomía Colombiana**, v. 27, n. 2, p. 159-167.

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Apresentação. (2009). Disponível em: <<http://www.cpac.embrapa.br/unidade/apresentacao/>>. Acesso em: nov. de 2017.

FAO, The state of food insecurity in the world 2014. **Food and Agriculture Organization of the United Nations**, Home, Disponível em <<http://www.fao.org/publications/sofi/en/>> Acesso em: 30 jul. 2017.

FLEXAS, J.; DIAZ-ESPEJO, A.; GAGO, J.; GALLÉ, A.; GALMÉS, J.; GULÍAS, J.; MEDRANO, H. *Photosynthetic* limitations in Mediterranean plants: a review. **Environmental and Experimental Botany**, v. 103, n. 1, p. 12-23, 2014

GAJU, O.; ALLARD, V.; MARTRE, P.; SNAPE, W.; HEUMEZ, E., LEGOUIS, J. Identification of characteristics to improve the efficiency of the use of nitrogen in wheat genotypes. **Field Crops Research**, v.123, n.3, p.139-152, 2011.

GEERTS, D.; RAES, M.; GARCIA, O.; CONDORI, J.; MAMANI, R.; MIRANDA, J. CUSICANQUI, C.; TABOADA, J.; VACHER E. T.; Could deficit irrigation be a sustainable practice for quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) in the Southern Bolivian Altiplano. **Agricultural Water Management**, v. 95, n. 8, p. 909-917, 2008.

GENTY, B.; BRIANTAIS, J. M.; BAKER, N. R. The relationship between the quantum yield of photosynthetic electron transport and quenching of chlorophyll fluorescence. **Biochimica et Biophysica Acta**, v. 990, n. 1, p. 87-92, 1989.

GONZÁLEZ, J. A.; GALLARDO, M.; HILAL, M.; ROSA, M.; PRADO, F. E. Physiological responses of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) to drought and water logging stresses: dry matter partitioning. **Botanical Studies**, v. 50, n. 1, p. 35-42, 2009.

GONZÁLEZ, J. A.; BRUNO, M.; VALOY, M.; PRADO, F. E. Genotypic variation of gas exchange parameters and leaf stable carbon and nitrogen isotopes in ten quinoa cultivars grown under drought. **Journal of agronomy and crop science**, v. 197, n. 2, p. 81-93, 2011.

HANKS, R. J.; RASMUSSEN, V. P.; WILSON, G. D. Line-source sprinkler for continuous variable irrigation crop production studies. **Soil Science Society of America Journal**, v. 40, n.3, p. 426-429, 1976.

HÖRTENSTEINER, S.; KRÄUTLER, B. Chlorophyll breakdown in higher plants. **Biochimica et Biophysica Acta - Bioenergetics**, v. 1807, n. 8, p. 977-988, 2011.

HUSSIN, S.; KHALIFA, W.; GEISLER, N.; KOYRO, H. W . Influence of the root endophyte *Piriformospora indica* on the plant water relations, gas exchange and growth of chenopodium quinoa at limited water availability. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 203, n. 5, p. 373-384, 2017.

IQBAL, H.; YANING., C; WAQAS, M.; REHMAN, H.; SHAREEF, M. S.; IQBAL, S. The application of hydrogen peroxide improves the performance of quinoa by affecting physiological and biochemical mechanisms in conditions of water deficit. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 204, n. 6, p. 541-55.

JAYME-OLIVEIRA A.; RIBEIRO JUNIOR W. Q.; RAMOS M. L. G.; ZIVIANI A. C.; JAKELAITIS A. Amaranth, *C. quinoa*, and millet growth and development under different water regimes in the Brazilian Cerrado. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v.52, n.8, 561-571, 2017.

LI, C.; LIU, S.; BERNINGER, F. Picea seedlings show apparent acclimation to drought with increasing altitude in the eastern Himalaya. **Trees-Struct. Funct**, v. 18, n. 3, 277–283, 2004.

LIU, J. E.; SHI, D. C. Photosynthesis, chlorophyll fluorescence, accumulation of inorganic ions and organic sunflower acids in response to saline and mixed saline-alkaline stress. **Photosynthetica**, v. 4, n. 1, p.127-134, 2010.

JENSEN, C.; JACOBSEN, S. E.; ANDERSEN, M.; NÚÑEZ, N.; ANDERSEN, S.; RASMUSSEN, L.; MOGENSEN, V. Leaf gas exchange and water relation characteristics of field quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) during soil drying. **European Journal of Agronomy**, v. 13, n.1, 11–25, 2010.

JOVANOVIC, Z.; STIKIC, R. Strategies for improving water productivity and quality of agricultural crops in an era of climate change. In: *Irrigation Systems and Practices in Challenging Environments*. InTech, 2012.

MARIJUAN, M. P.; BOSCH, S. M. Ecophysiology of invasive plants: osmotic adjustment and antioxidants. **Trends in Plant Science**, v.18, n. 12, p.660-666, 2013.

MEHTA, P.; ALLAKHVERDIEV E A.; JAJOO. Characterization of photosystem II heterogeneity in response to high salt stress in wheat leaves (*Triticum aestivum*) **Photosynth Res**, v.105, n. 3, 249-255, 2010.

MENDES, B. S. S.; WILLADINO, L.; CUNHA, P. C.; OLIVEIRA FILHO, R. A. de; CAMARA, T. R. Mecanismos fisiológicos e bioquímicos do abacaxi ornamental sob estresse salino. **Revista Caatinga**, v. 24, n. 3, p. 71-77, 2011.

NOUNJAN, N.; PAKKANAN, C.; CHAROENSAWAN, V.; SIANGLIW, J. L.; TOOJINDA, T.; CHADCHAWAN, S.; THEERAKULPISUT, P. The high performance of photosynthesis and osmotic adjustment are associated with salt tolerance in rice leading drought tolerance QTL: physiological analysis and co-expression networks. **Borders in Plant Science**, v. 9, 2018.

O'NEILL, P. M.; SHANAHAN, J. F.; SCHEPERS, J. S. Use of chlorophyll fluorescence assessments to differentiate corn hybrid response to variable water conditions. **Crop Science**, v. 46, n. 2, p. 681-687, 2006.

OSAKABE, Y.; OSAKABE, K.; SHINOZAKI, K.; TRAN, L. S. P. Response of plants to water stress. **Frontiers in plant science**, v. 5, n. 1, p. 86, 2014.

PINHEIRO, C.; CHAVES, M. Photosynthesis and drought: can we make metabolic connections from available data. **Journal of Experimental Botany**, v.62, n.3, p.869-882, 2011.

RAZZAGHI, F.; PLAUBORG, F.; JACOBSEN, S-E.; JENSEN, C.R.; ANDERSEN, M.N. Effect of nitrogen and water availability of three soil types on yield, radiation use efficiency and evapotranspiration in field-grown quinoa. **Agriculture Water Manage.** v. 109, n.3, p. 20-29, 2012.

RONCHI, C. P.; ARAÚJO, F. C. D.; ALMEIDA, W. L. D.; SILVA, M. A. A. D.; MAGALHÃES, C. E. D. O.; OLIVEIRA, L. B. D.; DRUMOND, L. C. D. Respostas ecofisiológicas de cafeeiros submetidos ao déficit hídrico para concentração da florada no Cerrado de Minas Gerais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 50, n.1, p. 24-32, 2015.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A. ; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; CUNHA, T. J.

- F.; OLIVEIRA, J. B. Sistema brasileiro de classificação de solos. 3.ed. Brasília: Embrapa, 2013. 353p.
- SANTOS, L. W.; COELHO, M. F. B.; AZEVEDO, R. A. B. Qualidade de mudas de pau-ferro produzidas em diferentes substratos e condições de luz. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 33, n. 74, p. 151-158, 2013.
- SANTOS, R. F.; CARLESSO, R. Déficit hídrico e os processos morfológicos e fisiológicos das plantas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 2, n. 3, p. 287-294, 1998.
- SAS-Statistical Analyses System. Statistical Analysis System user's guide. Version 9. Cary: Statistical Analyses System Institute, 2008.
- SHESHSHAYEE, M. S., H.; BINDUMADHAVA, N. R.; RACHAPUTI, T. G.; PRASAD, M.; UDAYAKUMAR, G. C.; WRIGHT, A. N. Nigam Leaf chlorophyll concentration relates to transpiration efficiency in peanut. **Annals of Applied Biology**, v. 148, n. 1, p. 7-15, 2006.
- SIENER, R., HONOW, R., SEIDLER, A., VOSS, S., AND HESSE, A. Oxalate contents of species of the Polygonaceae, Amaranthaceae and Chenopodiaceae families. **Food Chemistry**, v. 98, n. 2, p. 220-224, 2006.
- SILVA, L. D. A.; BRITO, M. E.; DA S, S.; FRANCISCO, V.; MOREIRA, R. C.; SOARES FILHO, W. D. S.; FERNANDES, P. D. Mecanismos fisiológicos em híbridos de citros sob estresse salino em cultivo hidropônico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, (Suplemento), n. 1, p. S1-S7, 2014.
- SUN, Y.; LIU, F.; BENDEVIS, M.; SHABALA, S.; JACOBSEN, S. E. Sensitivity of two quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) varieties to progressive drought stress. **Journal Agronomy Crop Science**. v. 200, n.1, p. 12-23, 2014.
- STIKIĆ, R.; JOVANOVIĆ, Z.; MARJANOVIĆ, M.; ĐORĐEVIĆ, S. The effect of drought on water regime and growth of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). **Ratarstvo i povrtarstvo**, v. 52, n. 2, p. 80-84, 2015.
- SYSTAT SOFTWARE. Scientific Graphing Software: Sigma Plot, versão 10.0. San Rafael, Hearne Scientific Software, 2006.

TATAGIBA, S. D.; PEZZOPANE, J. E. M.; REIS, E. F. Fotossíntese em *Eucalyptus* sob diferentes condições edafoclimáticas. **Engenharia na Agricultura**, v. 23, n. 4, p. 336-345, 2015.

TIME, A.; GARRIDO, M.; ACEVEDO, E. Water relations and growth response to water stress of *Prosopis tamarugo* Phil. A review. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 18, n. 2, p. 329-343, 2018.

VERBRUGGEN, N.; HERMANS, C. Proline accumulation in plants: a review. *Amino Acids*, v.35, n.4, p.753-759, 2008.

WASEEM, M., A.; ALI, M.; TAHIR, M.; NADEEM, M.; AYUB, A.; TANVEER, R.; AHMAD M.; HUSSAIN. Mechanisms of drought tolerance in the plant and its management through different methods. **Continental Journal Agricultural Science**, v. 5, n. 1, p. 10 - 25, 2011

YANG, A.; AKHTAR, S. S.; AMJAD, M.; IQBAL, S.; JACOBSEN, S. E. Growth and physiological responses of quinoa to drought and temperature stress. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 202, n. 6, p. 445-453, 2016.

YOUSFI, M.D. SERRET, J.L. ARAUSSHOOT. $\Delta^{15}\text{N}$ gives a better indication than ion concentration or $\Delta^{13}\text{C}$ of genotypic differences in the response of durum wheat to salinity. **Functional Plant Biology**, v. 36, n. 2, p. 144-155, 2009.