

CLEITON JOSÉ ALVES

CITOCININA NA CULTURA DO ARROZ DE TERRAS ALTAS

Botucatu

2019

CLEITON JOSÉ ALVES

CITOCININA NA CULTURA DO ARROZ DE TERRAS ALTAS

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp Campus de Botucatu, para obtenção do título de Doutor em Agronomia (Agricultura).

Orientador: Carlos Alexandre Costa
Crusciol

Botucatu

2019

A474c Alves, Cleiton José
 Citocinina na cultura do arroz de terras altas /
 Cleiton José Alves. -- Botucatu, 2019
 106 p. : il., tabs.

 Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista
 (Unesp), Faculdade de Ciências Agrônômicas,
 Botucatu
 Orientador: Carlos Alexandre Costa Crusciol

 1. Agronomia. 2. Arroz de terras altas. 3. Fisiologia
 vegetal. 4. Nutrição de plantas. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp.
Biblioteca da Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu. Dados
fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

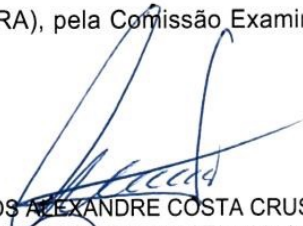
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

Título: **“CITOCININA NA CULTURA DO ARROZ DE TERRAS ALTAS”**

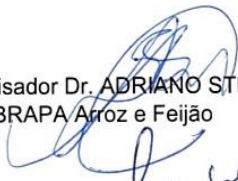
AUTOR: CLEITON JOSÉ ALVES

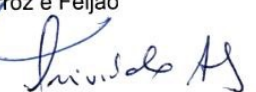
ORIENTADOR: CARLOS ALEXANDRE COSTA CRUSCIOL

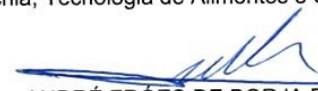
Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em AGRONOMIA (AGRICULTURA), pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. CARLOS ALEXANDRE COSTA CRUSCIOL
Produção e Melhoramento Vegetal / Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu


Prof. Dr. JOÃO DOMINGOS RODRIGUES
Botânica / Instituto de Biociências de Botucatu - UNESP


Pesquisador Dr. ADRIANO STEPHAN NASCENTE
/ EMBRAPA Arroz e Feijão


Prof. Dr. ORIVALDO ARF
Fitotecnia, Tecnologia de Alimentos e Sócio Economia / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. ANDRÉ FRÓES DE BORJA REIS
Produção Vegetal / Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz

Botucatu, 12 de agosto de 2019.

À minha família,
dedico.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a DEUS.

Aos meus pais, José e Orotilde, pela educação que me deram e por ter mostrado o caminho que um homem honrado deve seguir.

Aos meus irmãos, Kele e Wellington, por todo suporte e amizade que sempre me deram.

Ao Professor Dr. Carlos Alexandre Costa Crusciol, uma pessoa de conduta exemplar que proveu todo o alicerce para eu alcançar esse título. Tenho certeza que mais do que um orientador, foi um Amigo.

Aos amigos da República, Cristiano Pariz, Jorge Martinelli, Saulo Simões, Luiz Moretti, Murilo de Souza e Heitor Reis, pessoas que me receberam muito bem em Botucatu e sempre estiveram presentes, compartilhando dos bons e maus momentos.

Aos estagiários Lucas Oshiro (Kuniling) e Bruno Scalice (Zeca Urubu), pela disponibilidade em ajudar, não foram poucas as atividades ao longo de quatro anos.

Aos amigos, Gabriela Siqueira, Letusa Momesso, Sueko Tanaka, Ariani Garcia, Nídia Costa, Daniele Scudeletti, Leila Bernart, Marcelo Volf, Murilo de Campos, João Bossolani, Vitor Rodrigues, Rafael Vilela, Claudio Martins, Jayme Ferrari, Antônio Carneis, Luiz Jordão, Danilo Almeida, Kassiano Rocha e Leontino Oliveira, todos contribuíram de alguma forma na minha caminhada.

Ao corpo de docentes e servidores da Faculdade de Ciências Agronômicas (FCA) – Unesp, Campus de Botucatu, pela contribuição na minha aprendizagem e atividades ao longo desses anos.

À Faculdade de Engenharia – Unesp, Campus de Ilha Solteira, por tudo que vivi e aprendi durante a graduação e mestrado.

À Universidade da Carolina do Norte em Chapel Hill, por fornecer a estrutura onde realizei parte da minha tese.

Ao Professor Dr. Joseph John Kieber, por ter me aceitado com aluno temporário em seu laboratório, fornecer recursos e contribuir cientificamente para com minha pesquisa.

Aos amigos do Kieber's Lab, Kwame, Kevin, Daniel, Asia, Charlie, Christian e Jamie, pela amizade e respeito ao longo dos 12 meses que convivemos.

A todos os brasileiros que conheci na Carolina do Norte, Paulo Teixeira, Joana Araújo, Lucas Mariani, Jéssica Miranda, Ana Nogueira, Amanda Matrai e principalmente aos amigos do Brazilian Storm. Vocês foram mais que amigos.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo apoio financeiro, concedido por meio de bolsa de doutorado (Processo nº 2015/26660-2) e de bolsa estágio de pesquisa no exterior (Processo nº 2017/01743-8).

Meu muito obrigado.

“Que homem é o homem que não faz do mundo um lugar melhor?”

Trecho do filme Cruzada (Kingdom of Heaven)

RESUMO

A aplicação da citocinina thidiazuron (TDZ) é uma técnica que promove aumentos na produtividade de arroz (*Oryza sativa* L.), no entanto, é necessário entender o funcionamento dessa substância em plantas de arroz. Objetivou-se com esse trabalho verificar a influência do TDZ nos aspectos fisiológicos, morfológicos, nutricionais e produtivos de um cultivar de arroz de terras altas. Foi realizado experimento com delineamento em blocos casualizados, aplicando doses de thidiazuron (0, 0,8, 1,6 e 2,4 g ha⁻¹) no perfilhamento do cultivar Ana 8001, favorecido com irrigação por aspersão, durante duas safras (2015/2016 e 2016/2017). Foi avaliado o teor foliar das citocininas 6-benzilaminopurina (BAP) e trans-zeatina ribosídeo (TZR), absorção de N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Cu, Zn e Mn, crescimento da planta, componentes da produção e produtividade de grãos. Realizou-se também experimento em casa de vegetação com o objetivo de verificar a influência de citocininas na altura, componentes da produção, produtividade de grãos e expressão genica de cultivares mutantes de arroz, alterados na rota de sinalização celular desse hormônio. A aplicação de citocinina aumentou os teores foliares de 6-benzilaminopurina e trans-zeatina ribosídeo na primeira safra. O aumento no número de espiguetas por panícula e fertilidade das espiguetas, em função das doses de TDZ, resultaram em incrementos na produtividade na ordem de 24% e 13% na safra 2015/2016 e 2016/2017, respectivamente. Em 2016/2017, os teores de K na folha aumentaram 2,0, 6,8, 3,1 e 0,9 g kg⁻¹ com a aplicação das doses de TDZ na diferenciação foliar, florescimento, grão leitoso e ponto de colheita, respectivamente. A concentração de K na panícula aumentou 1,91 g kg⁻¹ no ponto de colheita. Apesar das diferenças climáticas entre as duas safras, foi possível observar que com a aplicação de TDZ houve maior acúmulo de matéria seca nas folhas e colmo da planta, sendo posteriormente translocada para as estruturas reprodutivas. Nos cultivares mutantes de arroz OsPHP, OsRR tipo B e OsCKX, houve diferenças nos pigmentos fotossintéticos, altura de plantas, componentes da produção e produtividade de grãos em resposta a aplicação de citocinina. A expressão genica mostra que, mesmo com rupturas no OsHK, a planta aumenta a expressão de OsRR4, gene que governa as características relacionadas à citocinina na planta. O uso de citocinina na cultura do arroz promove maior absorção

de nutrientes, crescimento e desenvolvimento da planta, resultando em maior produtividade de grãos.

Palavras-chave: Fisiologia vegetal. Regulador vegetal. Análise de crescimento. Absorção de nutrientes. Expressão gênica.

ABSTRACT

Application of the cytokinin thidiazuron (TDZ) is a technique which promotes increases in grain yield of rice (*Oryza sativa* L.), however, it is necessary to understand the action of this substance in rice plants. The objective of this work was to verify the influence of TDZ on the physiological, morphological, nutritional and productive aspects of an upland rice cultivar. A randomized block design experiment was carried out, applying doses of thidiazuron (0, 0.8, 1.6 and 2.4 g ha⁻¹) on tillering stage of the cultivar ANa 8001, favored by sprinkler irrigation, during two crop seasons (2015/2016 and 2016/2017). It was evaluated the leaf content of cytokines 6-benzylaminopurine (BAP) and trans-zeatin riboside (TZR), the uptake of N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Cu, Zn and Mn, plant growing and grain yield. An experiment was also carried out to verify the influence of cytokinins on morphological aspects and genetic expression of mutant rice cultivars, altered in the cellular pathway signaling of this hormone. The application of cytokinin increased leaf contents of 6-benzylaminopurine and trans-zeatin riboside in the first crop season. The increase in the number of spikelets per panicle and spikelet fertility as a function of TDZ doses resulted in increases of 24% and 13% in 2015/2016 and 2016/2017, respectively. In 2016/2017, the leaf K contents increased by 2.0, 6.8, 3.1 and 0.9 g kg⁻¹ with the application of TDZ doses on leaf differentiation, flowering, milky grain and harvest point. respectively. Panicle K content increased 1.91 g kg⁻¹ at harvest point. Despite the climatic differences between the two-crop season, it was possible to observe that cytokinin increases the dry matter accumulation in the leaves and stalk of the plant, being after translocated to the reproductive structures, resulting in increases of grain yield. The OsPHP, OsRR type B and OsCKX rice mutant cultivars showed increases in photosynthetic pigments, differences in plant height, yield components and grain yield in response to cytokinin doses. The gene expression shows that, even with OsHK disruption, the plant increases the expression of OsRR4, the gene that governs cytokinin-related characteristics in the plant. The use of cytokinin in rice crop promotes greater nutrient uptake, plant growth and development, resulting in higher grain yield.

Keywords: Plant physiology. Plant growth regulator. Growth analysis. Nutrient uptake. Gene expression.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Dados diários de precipitação pluvial, temperatura máxima e mínima durante a condução do experimento em 2015/2016 (a) e 2016/2017 (b)	29
Figura 2 - Fertilidade das espiguetas de plantas de arroz tratadas com doses de thidiazuron em 2015/2016 e 2016/2017	35
Figura 3 - Desdobramento estatístico para as variáveis número de espiguetas panícula ⁻¹ (a) e produtividade de grãos (b) em plantas de arroz tratadas com doses de thidiazuron em 2015/2016 e 2016/2017	36
Figura 1 - Dados diários de precipitação pluvial, temperatura máxima e mínima durante a condução do experimento em 2015/2016 (a) e 2016/2017 (b)	47
Figura 2 - Desdobramento estatístico para teores de N no colmo avaliado no ponto de colheita de plantas de arroz tratadas com thidiazuron em 2015/2016 e 2016/2017. Barras de erros representam diferença mínima significativa	50
Figura 3 - Desdobramento estatístico para os teores de K na folha nas fases de diferenciação foliar (a), emborrachamento (b), florescimento (c), grão leitoso (d), ponto de colheita (e) e na panícula no ponto de colheita (f) de plantas de arroz tratadas com thidiazuron. Barras de erros representam diferença mínima significativa, ns: não significativo	53
Figura 4 – Produtividade de grãos (a), quantidade de macronutrientes (b) e micronutrientes (c) exportados em grãos de plantas de arroz tratadas com thidiazuron em 2015/2016 e 2016/2017	55
Figura 1 - Dados diários de precipitação pluvial, temperatura máxima e mínima durante a condução do experimento em 2015/2016 (a) e 2016/2017 (b)	67
Figura 2 - Acúmulo de matéria seca (kg ha ⁻¹) nas folhas (a), colmo (b), panículas (c) e parte aérea (d) de plantas de arroz tratadas com thidiazuron em 2015/2016	71
Figura 3 - Acúmulo de matéria seca (kg ha ⁻¹) nas folhas (a), colmo (b), panículas (c) e parte aérea (d) de plantas de arroz tratadas com thidiazuron em 2016/2017	72
Figura 4 - Índice de área foliar (m ² m ⁻²) (a), taxa de crescimento da cultura (g g ⁻¹ m ⁻²) (b), taxa de crescimento relativo (g g ⁻¹ m ⁻²) (c), taxa de assimilação líquida (g cm ⁻² dia ⁻¹) (d) e área foliar específica (m ² g ⁻¹) (e) de plantas tratadas com thidiazuron em 2015/2016	74
Figura 5 - Índice de área foliar (m ² m ⁻²) (a), taxa de crescimento da cultura (g g ⁻¹ m ⁻²) (b), taxa de crescimento relativo (g g ⁻¹ m ⁻²) (c), taxa de assimilação líquida (g cm ⁻² dia ⁻¹) (d) e área foliar específica (m ² g ⁻¹) (e) de plantas tratadas com thidiazuron em 2016/2017	76
Figura 6 - Desdobramento estatístico para produtividade de grãos em função de doses de thidiazuron em 2015/2016 e 2017/2017. A interação entre o fator doses de thidiazuron e safra foi significativo a 5% de probabilidade no teste F	77
Figura 1 - Produtividade de grãos em plantas tratadas com doses de 6-benzialminopurina (BAP) e thidiazuron (TDZ)	91

Figura 2 - Teores de clorofila a (a), clorofila b (b), clorofila a + b (c) e carotenoides (d) do cultivar de arroz Kitaake tratado com 6-benzialminopurina (BAP) e thidiazuron (TDZ).....	92
Figura 3 - Teores de clorofila a (a), clorofila b (b), clorofila a + b (c) e carotenoides (d) do cultivar mutante de arroz OsPHP tratado com 6-benzialminopurina (BAP) e thidiazuron (TDZ)	92
Figura 4 - Teores de clorofila a (a), clorofila b (b), clorofila a + b (c) e carotenoides (d) do cultivar mutante de arroz OsRR tipo B tratado com 6-benzialminopurina (BAP) e thidiazuron (TDZ)	93
Figura 5 - Teores de clorofila a (a), clorofila b (b), clorofila a + b (c) e carotenoides (d) do cultivar mutante de arroz OsCKX tratado com 6-benzialminopurina (BAP) e thidiazuron (TDZ)	94
Figura 6 - Altura de plantas, número de panículas por planta, número de grãos por panícula, fertilidade das espiguetas e produtividade de grãos de plantas de arroz selvagem e mutantes (OsRR type B, OsPHP triple e OsCKX) tratados com 6-benzialminopurina (BAP) e thidiazuron (TDZ)	96
Figura 7 - Expressão do gene OsRR4 em de arroz do tipo selvagem, HK4 e HK4-6 tratados com citocinina exógena. A dobra de expressão para 6-benzialminopurina (BAP) e thidiazuron (TDZ) é em relação ao tratamento controle.....	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Caracterização dos atributos químicos do solo da área experimental referente as safras de 2015/2016 e 2016/2017.....	28
Tabela 2 – Probabilidade de F ($\leq 0,05$) e teores foliares de 6-benzilaminopurina e trans-zeatina ribosídeo ao longo do ciclo do arroz tratado com thidiazuron em 2015/2016 e 2016/2017.....	33
Tabela 3 - Probabilidade do teste F ($\leq 0,05$) para altura de plantas, número de panículas m^{-2} , número de espiguetas panícula $^{-1}$, fertilidade das espiguetas, massa de 1000 grãos, produtividade de grãos, rendimento de engenho, rendimento de inteiros e grãos quebrados em função de doses de TDZ aplicado durante o perfilhamento da cultura em 2015/2016 e 2016/2017.....	34
Tabela 4 - Altura de plantas, fertilidade das espiguetas massa de 1000 grãos, rendimento de inteiros e grãos quebrados de plantas de arroz tratadas com doses de thidiazuron em 2015/2016 e 2016/2017.....	34
Tabela 1 - Caracterização dos atributos químicos do solo da área experimental referente as safras de 2015/2016 e 2016/2017.....	46
Tabela 2 - Probabilidade de F ($\leq 0,05$) para os teores de nutrientes durante a diferenciação floral (DF), emborrachamento (EB), florescimento (FL), grão leitoso (GL) e pondo de colheita (PC) em plantas de arroz tratadas com thidiazuron em 2015/2016 e 2016/2017.....	51
Tabela 3 - Probabilidade de F ($\leq 0,05$) para produtividade de grãos e nutrientes exportados em plantas de arroz tratadas com thidiazuron em 2015/2016 e 2017/2017.....	54
Tabela 1 - Caracterização dos atributos químicos do solo da área experimental referente as safras de 2015/2016 e 2016/2017.....	66

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO GERAL	21
	CAPÍTULO 1 – ANÁLISE DE CITOCININA E PRODUTIVIDADE DE ARROZ DE TERRAS ALTAS COM APLICAÇÃO FOLIAR DE THIDIAZURON	26
1.1	INTRODUÇÃO	27
1.2	MATERIAL E MÉTODOS	28
1.2.1	Caracterização da área e delineamento experimental	28
1.2.2	Condução do experimento	30
1.2.3	Análise do teor foliar de citocininas	30
1.2.4	Biometria, componentes da produção e produtividade de grãos	31
1.2.5	Análise estatística	31
1.3	RESULTADOS	32
1.3.1	Análise do teor foliar de citocininas	32
1.3.2	Biometria, componentes da produção e produtividade	33
1.4	DISCUSSÃO	36
1.4.1	Análise foliar dos níveis de citocinina	36
1.4.2	Biometria, componentes da produção e produtividade de grãos	38
1.5	CONCLUSÃO	39
	REFERÊNCIAS	39
	CAPÍTULO 2 – APLICAÇÃO FOLIAR DE THIDIAZURON: NUTRIÇÃO E PRODUTIVIDADE DO ARROZ DE TERRAS ALTAS	43
2.1	INTRODUÇÃO	44
2.2	MATERIAL E MÉTODOS	45
2.2.1	Caracterização da área e delineamento experimental	45
2.2.2	Condução do experimento	47
2.2.3	Coleta de plantas e análise nutricional	48
2.2.4	Produtividade de grãos e exportação de nutrientes	48
2.2.5	Análise estatística	49
2.3	RESULTADOS	49
2.4	DISCUSSÃO	56
2.5	CONCLUSÃO	58
	REFERÊNCIAS	58
	CAPÍTULO 3 – APLICAÇÃO FOLIAR DE THIDIAZURON PODE ALTERAR O CRESCIMENTO DO ARROZ DE TERRAS ALTAS?	63
3.1	INTRODUÇÃO	64
3.2	MATERIAL E MÉTODOS	66
3.2.1	Análise do crescimento	69
3.2.2	Produtividade de grãos	69
3.2.3	Análise estatística	69
3.3	RESULTADOS	70
3.4	DISCUSSÃO	77
3.5	CONCLUSÃO	81
	REFERÊNCIAS	81
	CAPÍTULO 4 – ALTERAÇÕES MORFOLÓGICAS E GENÉTICAS DE CULTIVARES MUTANTES DE ARROZ TRATADOS COM CITOCININA EXÓGENA	85
4.1	INTRODUÇÃO	86
4.2	MATERIAL E MÉTODOS	87

4.2.1	Esterilização e germinação de sementes de arroz	87
4.2.2	Definição da dose de citocinina	88
4.2.3	Descrição dos genótipos usados	88
4.2.4	Análise de pigmentos fotossintéticos na folha	89
4.2.5	Extração de RNA e análise de qPCR	89
4.2.6	Avaliações morfológicas	90
4.2.7	Análise estatística	90
4.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	90
4.3.1	Definição da dose de citocinina	90
4.3.2	Conteúdo de clorofila e carotenóides na folha	91
4.3.3	Componentes da produção e produtividade	94
4.3.4	Expressão gênica do OsRR4	97
4.4	CONCLUSÃO	98
	REFERÊNCIAS	98
	CONSIDERAÇÕES FINAIS	101
	REFERÊNCIAS	103

INTRODUÇÃO GERAL

O arroz (*Oryza sativa* L.) é uma das culturas produtoras de alimento mais importante do mundo, presente diariamente na dieta de mais da metade da população mundial, fornecendo cerca de 27% das calorias consumidas em países de média e baixa renda (DAWE et al., 2010). Do ponto de vista econômico, aproximadamente 900 milhões de pessoas dependem diretamente do arroz, como produtores ou consumidores, principalmente em países subdesenvolvidos (PANDEY et al., 2010).

Cultivado em todos os continentes com exceção da Antártida, o arroz ocupa 23% da área total cultivada com cereais no mundo, o que representa mais de 167 milhões de hectares e cerca de 769 milhões de toneladas produzidas anualmente (FAO, 2019). Mais de 90% do arroz é produzido e consumido na Ásia, onde essa planta tem importância histórica. Ao longo da evolução das civilizações, Índia, China e o Sudeste da Ásia tiveram suas culturas fortemente influenciadas pelo cultivo do arroz (KRISHNAN et al., 2011).

Ao longo de anos, desde sua domesticação o arroz vem sendo cultivado nos mais diversos agroecossistemas. Características morfológicas como a presença de aerênquima, possibilita o cultivo do arroz em solos com condições anaeróbicas, o que deixa ainda mais ampla a possibilidade de exploração de áreas com o seu cultivo. Baseado em diversos critérios tais como regime hídrico, drenagem, solo e topografia, os ambientes de cultivo de arroz podem ser classificados como irrigado e terras altas, apresentando diferentes modalidades dentro de cada ecossistema.

No sistema de arroz irrigado, os campos são usualmente inundados durante parte ou todo o ciclo da cultura. O sistema de arroz irrigado inclui várzeas irrigadas por água da chuva, várzeas com irrigação controlada, inundação constante e manguezais (SAITO et al., 2013). O arroz de terras altas é geralmente cultivado em campos nivelados ou inclinados, sem necessidade da construção de taludes. A inundação é rara neste sistema. Na América Latina, a irrigação por aspersão é uma técnica usada para se obter incrementos em produtividade (ARF et al., 2001; CRUSCIOL et al., 2006; ARF et al., 2012; CRUSCIOL et al., 2013; NASCENTE et al., 2013; MENDES et al., 2014).

O sistema de arroz irrigado representa 92% da área de arroz colhida no mundo, correspondente à cerca de 75% de todo arroz produzido (BOUMAN et al., 2007; SAITO et al., 2018). Nesse sistema de cultivo são consumidos de 1700 a 3000 litros

de água para cada quilograma de grão de arroz produzido, podendo variar em função disponibilidade de água (chuva + irrigação), tipo de solo (textura, matéria orgânica, condutividade hidráulica, taxa de percolação, etc.) e clima (temperatura, fotoperíodo, humidade do ar, velocidade do vento, etc.) (PRASAD, 2011).

Devido à redução da disponibilidade de água para fins agrícolas e a competição por esse recurso para uso urbano e industrial, surgiu o grande desafio de um sistema de arroz irrigado com baixo consumo de água, bem como técnicas que possibilitem o aumento da produtividade do arroz de terras altas, assim atendendo a crescente demanda por alimento para quase 10 bilhões de pessoas em 2050, segundo as projeções (KRISHNAN et al., 2011).

Apesar de ocupar apenas 8% da área cultivada com arroz no mundo (SAITO et al., 2018), o arroz de terras altas é um sistema de cultivo que vem ganhando espaço e importância no cenário agrícola mundial. Com grande destaque principalmente na região dos trópicos (América latina, África e parte da Ásia), esse modelo de cultivo ainda apresenta baixas produtividades, cerca de duas toneladas por hectare (PRASAD, 2011; SAITO et al., 2018).

No Brasil, o arroz produzido no sistema de terras altas teve grande importância principalmente nas décadas de 1970 e 1980 por ser a cultura pioneira utilizada na exploração de novas áreas na região do Cerrado, chegando a ocupar mais de 4,5 milhões de hectares (PINHEIRO et al., 2006). O arroz era introduzido em áreas recém abertas com solos ácidos e baixa fertilidade, impróprias para exploração de outras culturas, cultivado durante o primeiro e segundo ano, sendo então substituído por pastagens ou culturas com maior retorno econômico. O arroz produzido nesse sistema foi caracterizado como atividade de baixo custo, alto risco climático e baixo retorno financeiro (PINHEIRO et al., 2006).

Baixas produtividades do arroz de terras altas são frequentemente atribuídas a estresses bióticos e abióticos, além de poucas práticas tecnológicas empregadas pelos produtores nesse sistema de produção (HEINEMANN et al., 2010; SAITO et al., 2018). Tais fatores aliados às variações climáticas de cada ano com ausência de regime de chuvas bem definido, aumentam os “gaps” de produtividade (OORT et al., 2017) desestimulando ainda mais os produtores a fazerem investimentos nessa atividade.

Os efeitos deletérios da deficiência hídrica durante a fase vegetativa implica no prolongamento do ciclo da cultura (CRUSCIOL et al., 2003; PERES et al., 2018),

diminuição da altura de plantas (STONE et al., 1984; OLIVEIRA, 1995; ARTIGIANI et al., 2012) e redução do perfilhamento (PINHEIRO et al., 1990; FORNASIERI FILHO; FORNASIERI, 1993), consequentemente reduzindo o número de panículas por planta. Na fase reprodutiva pode reduzir o número de panículas (PINHEIRO et al., 1985), o número total de espiguetas por panícula (YOSHIDA, 1981; HEINEMANN; STONE, 2009) e a fertilidade das espiguetas (STONE et al., 1984; HEINEMANN; STONE, 2009). Já na fase de maturação reduz a massa dos grãos (STONE et al., 1984; PERES et al., 2018) e diminui o ciclo (CRUSCIOL et al., 2003).

Graças ao melhoramento genético e a implementação de algumas práticas no manejo, foi possível obter aumento significativo na produtividade do arroz de terras altas ao longo dos anos (PINHEIRO et al., 2006). Dentre essas práticas, a suplementação de água com o uso de irrigação por aspersão tem sido diferencial para obtenção de altos rendimentos de grãos. A modalidade de cultivo no ecossistema de terras altas tem uma demanda média de 600 a 700 mm de água durante o ciclo (BOUMAN et al., 2005; FORNASIERI FILHO; FORNASIERI, 2006; BOUMAN et al., 2007), cerca de 80% menos que o sistema de arroz irrigado (PRASAD, 2011), sendo essa exigência suprida por irrigação por aspersão quando as chuvas não são suficientes.

A irrigação por aspersão mitiga o efeito de veranicos durante o ciclo da cultura. Estudo realizado por Stone et al. (1999) mostra que cultivares de arroz de terras altas adaptados ao sistema de irrigação por aspersão, podem garantir produtividades maiores que 5 t ha^{-1} , fazendo deste um sistema economicamente competitivo. Arf et al. (2000) também destacam a importância da irrigação para o arroz de terras altas, pois a deficiência hídrica e o não suprimento da demanda por água (evapotranspiração) da cultura durante o ciclo de cultivo, reduzem a produtividade podendo causar até a perda total da lavoura.

A deficiência hídrica geralmente é acompanhada de períodos de altas temperaturas. Essas duas formas de estresse tem maior impacto negativo na cultura do arroz durante a fase reprodutiva, onde são definidos o número de espiguetas por panícula e a fertilidade das espiguetas (YOSHIDA, 1981). Desta forma, a suplementação por irrigação, além de suprir a demanda de água da cultura, mitiga os efeitos deletérios de estresses abióticos. Estudos mostram que esta técnica está consolidada e garante estabilidade na produtividade do arroz de terras altas

(CRUSCIOL et al., 2005; CRUSCIOL et al., 2006; ARTIGIANI et al., 2012; CRUSCIOL et al., 2012; CRUSCIOL et al., 2013; PERES et al., 2018).

Uma vez que se obtém estabilidade na produtividade é possível a implementação de nível mais elevado de tecnologia na lavoura, com uso de cultivares mais exigentes e responsivos, adensamento de plantas, elevadas doses de adubação, biocidas de maior eficiência e até mesmo reguladores vegetais. Alves et al., 2015 demonstraram que o uso do regulador vegetal thidiazuron (TDZ) na cultura do arroz de terras altas pode promover aumento de até 23,5% na produtividade de grãos.

O TDZ (N-fenil-N'-1,2,3-tiadiazol-5-ilurea) é uma feniluréia. Foi classificado como um tipo de citocinina não purínica que induz diversas respostas na planta, similares às respostas induzidas por citocininas naturais ou sintéticas (GUO et al., 2011). Como principais funções da citocinina na planta pode-se elencar: divisão celular, aumento na capacidade fotossintética (SONG et al., 2013), expansão foliar, aumento na assimilação de CO₂, condutância estomática, eficiência da enzima rubisco, e desenvolvimento de cloroplastos funcionais (MONAKHOVA; CHERNYAD'EV, 2007; LAZOVA; YONOVA, 2010; CORTLEVEN; VALCKE, 2012). A citocinina também regula a mobilização de nutrientes e fotoassimilados por meio de alterações na relação fonte/dreno (TAIZ; ZEIGER, 2017).

A citocinina vem sendo amplamente estudada, e o uso dessa substância se faz promissor para melhorar o crescimento, desenvolvimento e produção das plantas. Estudo realizado por Liu et al. (2011) mostra que o desenvolvimento de gemas que originam perfilhos em planta de arroz são estimulados pela citocinina, de modo que o aumento nos níveis deste hormônio favorece o perfilhamento, e como consequência a produtividade. Em consonância à isso, Javid et al. (2011) constataram que aplicações de citocininas e auxinas em plantas de arroz, durante a fase reprodutiva, promove aumento no rendimento de grãos, massa de 1000 grãos e porcentagem de grãos cheios.

Na fase de maturação, o enchimento de grãos é prejudicado pela ação da enzima citocinina oxidase/desidrogenase, esta enzima degrada a citocinina na panícula, reduzindo o fluxo de fotoassimilados para aquela zona, gerando maior número de espiguetas vazias, principalmente na base da panícula (YANG et al., 2001). Esse efeito pode ser reduzido com a aplicação de citocinina nas panículas do arroz (ASHIKARI et al., 2005; ZHANG et al., 2010).

O estresse hídrico, comum em lavouras de arroz de terras altas, ocasiona desequilíbrios hormonais na planta; isso se dá pelo aumento nas concentrações de ácido abscísico e diminuição das auxinas e citocininas, fazendo com que os grãos não recebam quantidade adequada de fotoassimilados, resultando em grãos de menor qualidade (XU et al., 2007). Estudos evidenciam que a citocinina exerce importante papel nas interações com fatores bióticos e abióticos (ARGUESO ET AL., 2012; KIEBER; SCHALLER, 2014), aliviando estresses causado por eles (PAVLŮ et al., 2018).

Até aqui foram listados os desafios do arroz de terras altas, um sistema que visa produção com baixo consumo de água e exploração de áreas do Cerrado. Também foi tratado sobre as funções da citocinina na planta, bem como seu potencial para melhorar a produção. Baseado no que se sabe sobre citocinina e os resultados encontrados até agora, acredita-se que este hormônio promove aumento na produtividade do arroz devido a alterações conjuntas nos aspectos morfológicos, fisiológicos, nutricionais e genéticos, sendo necessário estudos para melhor entender o funcionamento dessa substância em plantas de arroz.

Para essa comprovação, foi realizado experimento com o objetivo de verificar a influência de doses de thidiazuron em cultivar de arroz de terras altas, no que diz respeito à absorção de nutrientes, crescimento da planta, componentes da produção e produtividade de grãos. Também foram analisados aspectos morfológicos, produtivos e expressão genica de cultivares mutantes de arroz, com alterações na rota de sinalização celular da citocinina, visando entender o funcionamento da citocinina a nível celular.

CAPÍTULO 1 – ANÁLISE DE CITOCININA E PRODUTIVIDADE DE ARROZ DE TERRAS ALTAS COM APLICAÇÃO FOLIAR DE THIDIAZURON

Resumo

O arroz produzido no ecossistema de terras altas é uma alternativa para produção com baixo consumo de água. Devido condições adversas durante o ciclo da cultura, a irrigação por aspersão e o uso de TDZ são alternativas para garantir boas produtividade do arroz de terras altas. Esse trabalho foi realizado à campo durante duas safras (2015/2016 e 2016/2017), com o objetivo de avaliar a influência de doses de citocinina exógena na cultura do arroz de terras altas por ocasião do perfilhamento. O delineamento experimental foi em blocos casualizados com seis repetições utilizando doses (0, 0,8, 1,6 e 2,4 g ha⁻¹) de thidiazuron no cultivar Ana 8001. A análise do teor foliar de citocinina realizada na diferenciação flora, florescimento, grão leitoso e colheita mostra que o uso de TDZ aumentou os teores foliares desse hormônio, em média 0,86 e 0,9 ppm para 6-benzialminopurina (BAP) e trans-zeatina ribosídeo (TZR), respectivamente. Na safra 2016/2017, a média geral dos teores de citocinina foi maior que em 2015/2016, exceto para BAP no ponto de colheita. Considerando os tratamentos, na segunda safra o controle apresentou maiores teores foliares de citocinina nas fases de diferenciação floral e grão leitoso para BAP, e no florescimento para TZR. A produtividade de grãos foi afetada pelo estresse hídrico e térmico na segunda safra, com redução de até 5967 kg ha⁻¹. A aplicação de thidiazuron promoveu incrementos no número de espiguetas por panícula e fertilidade das espiguetas, e mesmo com altas temperaturas e baixa quantidade de chuvas na segunda safra, foi possível obter aumento na produtividade de grãos.

1.1 INTRODUÇÃO

O arroz é uma das principais culturas alimentícias do mundo, servindo como alimento base para mais da metade da população mundial. É amplamente cultivado na África, Américas e principalmente na Ásia, onde encontra-se mais de 90% da área total cultivada com arroz no mundo (PRASAD, 2011). No Brasil, a área plantada com arroz está em torno de 1,7 milhão de hectares (CONAB, 2019), dividida em dois sistemas de produção, irrigado e terras altas.

O arroz produzido no sistema irrigado consome de 1700 a 3000 litros de água para cada quilograma de grão de arroz produzido (PRASAD, 2011). No entanto, a escassez de água para uso agrícola, juntamente com a crescente demanda de água para uso doméstico e industrial, aumenta ainda mais a importância do arroz de terras altas, um sistema com grande economia de água, demandando cerca de 600 a 700 mm de água durante o ciclo (BOUMAN et al., 2005; FORNASIERI FILHO; FORNASIERI, 2006; BOUMAN et al., 2007).

O arroz de terras altas no Brasil geralmente é produzido em áreas de Cerrado, caracterizadas por solos ácidos, baixa fertilidade e distribuição desuniforme de chuvas durante o ciclo da cultura (ARF et al., 2001; PINHEIRO et al., 2006; CRUSCIOL et al., 2013). Períodos de seca durante o ciclo em conjunto com altas temperaturas, principalmente durante o estágio reprodutivo podem gerar redução de até 87% na produtividade de grãos (STONE et al., 1984). A irrigação por aspersão é uma alternativa para reduzir os efeitos dos períodos de seca e garantir estabilidade na produtividade de grãos no sistema de arroz de terras altas (STONE et al., 1999; ARF et al., 2000; CRUSCIOL et al., 2003; ARTIGIANI et al., 2012; CRUSCIOL et al., 2013; PERES et al., 2018).

Estudo realizado por Alves et al. (2015) demonstra que o uso de thidiazuron na cultura do arroz de terras altas irrigado por aspersão promove aumentos significativos na produtividade de grãos. O thidiazuron é uma feniluréia (N-fenil-N'-1,2,3-tiadiazol-5-ilurea) classificado como um tipo de citocinina que induz respostas na planta, similares às respostas induzidas por citocininas naturais (GUO et al., 2011).

A citocinina é um hormônio vegetal que apresenta diversas funções na planta, inclusive interações com fatores abióticos (KIEBER; SCHALLER, 2014), podendo aliviar os efeitos de estresses (PAVLŮ et al., 2018). Considerando a grande exposição do arroz de terras altas a condições de estresse, se faz importante o estudo aprofundado desta técnica para melhor entender como a fornecimento de uma

citocinina exógena influencia positivamente na cultura do arroz.

A partir do exposto, cria-se a hipótese que a aplicação de citocinina sintética na planta, aumenta os teores endógenos desse hormônio, tendo como consequência melhorias nos aspectos produtivos da cultura. Por isso, foi realizado este estudo objetivando verificar o efeito da aplicação de uma fonte exógena de citocinina na cultura do arroz de terras altas irrigado por aspersão, avaliando os níveis foliares desse hormônio e os reflexos na altura da planta, componentes da produção e produtividade de grãos.

1.2 MATERIAL E MÉTODOS

1.2.1 Caracterização da área e delineamento experimental

O experimento foi conduzido em condições de terras altas, favorecidas pelo uso de irrigação por aspersão, nas safras de 2015/2016 e 2016/2017, em Botucatu (SP) (48°26'W, 22°51'S e altitude de 740 m). O clima, conforme a classificação de Köppen, é do tipo Cwa, caracterizado como tropical de altitude, com inverno seco e verão quente e chuvoso. Os dados climáticos durante o ciclo de cultivo nas duas safras foram monitorados (Figura 1).

O solo da área experimental foi classificado como NITOSSOLO VERMELHO distroférico (SANTOS et al., 2018). Seus atributos químicos (Tabela 1) foram determinados antes da instalação do experimento, na camada 0,0-0,20 m, segundo a metodologia proposta por Raij et al., (2001).

Tabela 1 - Caracterização dos atributos químicos do solo da área experimental referente as safras de 2015/2016 e 2016/2017

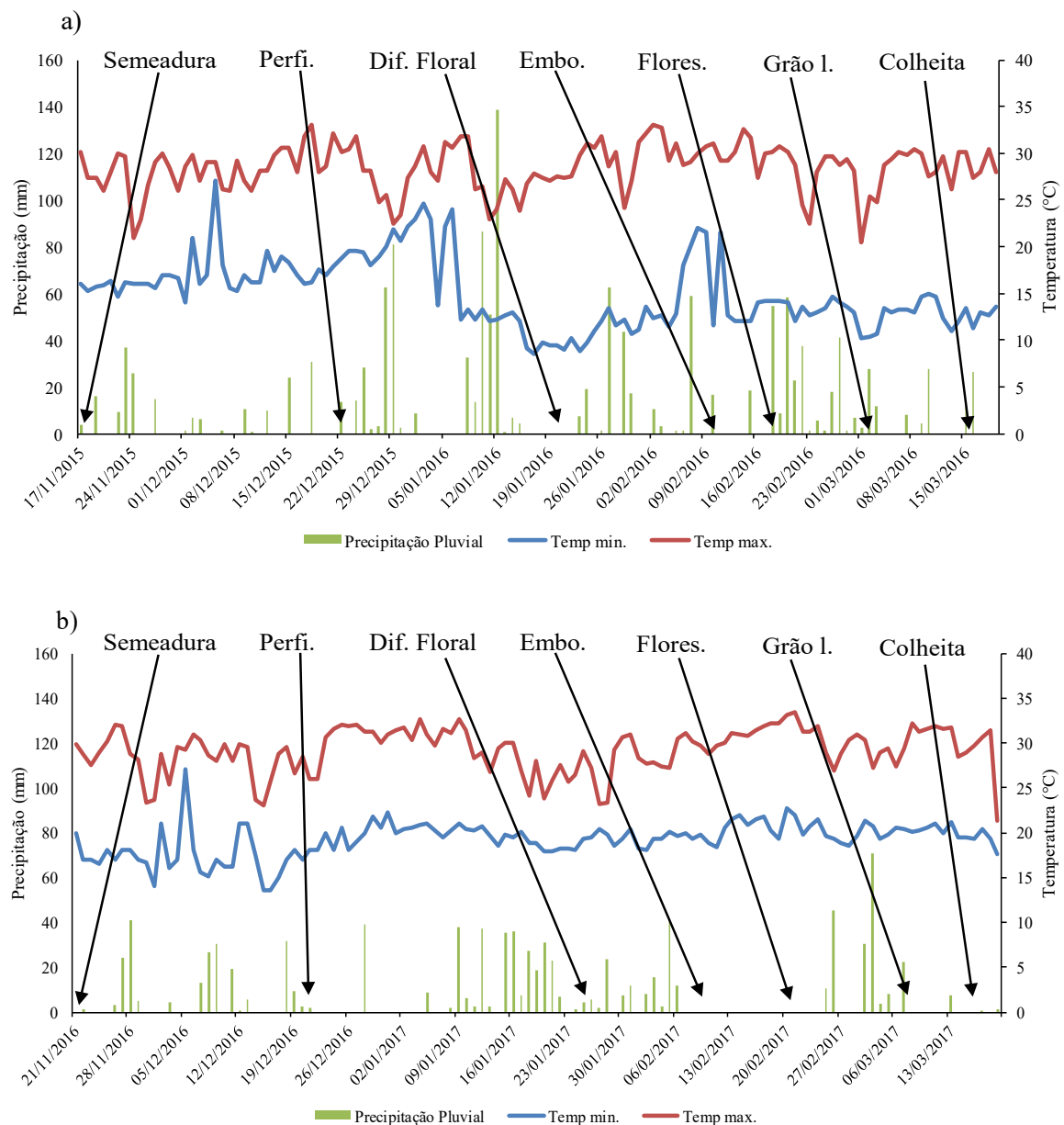
Safra	pH _(CaCl₂)	MO g dm ⁻³	P _(Resina) mg dm ⁻³	S	Al ⁺³	H+Al ⁺³	K	Ca	Mg	SB	CTC	V%
2015/2016	5,2	20	45	13	1	33	3,4	29	12	44	77	57
2016/2017	5,1	24	44	14	2	35	3,3	26	10	39	74	52

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos ao acaso com seis repetições. Os tratamentos foram constituídos por doses (0, 0,8, 1,6 e 2,4 g ha⁻¹) de thidiazuron, aplicadas durante a fase de perfilhamento da cultura. As doses adotadas nesse experimento foram definidas tendo como base no trabalho de Alves et al. (2015), visando aumentar a quantidade aplicada e encontrar a dose máxima de resposta em produtividade.

O cultivar utilizado foi o ANa 8001, que em virtude de seu porte médio mostra

resistência ao acamamento, embora possa acamar quando em condições de excessivo desenvolvimento vegetativo. O potencial produtivo é de 8000 kg ha⁻¹, sendo responsivo a novas tecnologias, dando suporte ao estabelecimento da agricultura moderna. Tem como características principais: ciclo curto (107 dias até a maturação completa), 80 dias da emergência ao florescimento, grãos tipo longo fino (agulhinha), moderadamente suscetível à brusone (*Pyricularia oryzae* Cav.) (AGRO NORTE, 2015).

Figura 1 - Dados diários de precipitação pluvial, temperatura máxima e mínima durante a condução do experimento em 2015/2016 (a) e 2016/2017 (b)



Cada unidade experimental foi constituída por 8 fileiras de plantas, com 7,0 m de comprimento, espaçadas em 0,35 m. As 4 fileiras centrais foram consideradas área útil, sendo que 0,50 m da extremidade de cada fileira de plantas e as quatro fileiras externas constituíram-se de bordadura.

1.2.2 Condução do experimento

O experimento foi conduzido em sistema de semeadura direta. A semeadura aconteceu no dia 17 e 21 de novembro, na safra 2015/2016 e 2016/2017, respectivamente, utilizando-se 200 sementes viáveis m^{-2} . A emergência das plântulas ocorreu aos seis dias após a semeadura. Na semeadura foi aplicado 40 kg ha^{-1} de N na forma de ureia, $61,6 \text{ kg ha}^{-1}$ de P_2O_5 na forma de superfosfato simples e $35,2 \text{ kg ha}^{-1}$ de K_2O na forma cloreto de potássio ao lado e abaixo das sementes, nas duas safras (RAIJ et al., 1996).

A irrigação do experimento foi realizada por sistema de aspersão convencional, composto por duas linhas laterais e aspersores com vazão de $1,07 \text{ m}^3 \text{ hora}^{-1}$. O momento da irrigação foi definido pelo método de irrigação de salvação, onde o fornecimento de água é realizado apenas quando as plantas apresentam sintomas de falta de água ao ponto de comprometer a produção ou quando a umidade do solo está em torno de 30-40% da capacidade de campo, sendo fornecido uma lâmina de 20 mm (SILVA et al., 2007).

O controle de plantas daninhas, insetos-praga e doenças foi realizado de acordo com as necessidades da cultura. Na adubação de cobertura foi aplicado 80 kg ha^{-1} de N, na forma de sulfato de amônio, parcelada em duas vezes (40 kg ha^{-1} e 40 kg ha^{-1}), respectivamente aos 15 (pré-perfilhamento) e 30 DAE (perfilhamento pleno), nas duas safras.

1.2.3 Análise do teor foliar de citocininas

As amostragens foliares para determinação dos níveis de citocinina foram feitas em função dos estádios fenológicos da cultura, na primeira e segunda safra, durante a diferenciação floral (59 e 60 DAE), florescimento (86 e 87 DAE), grão leitoso (98 e 102 DAE) e ponto de colheita (112 e 110 DAE), respectivamente. Foi coletado a última folha totalmente expandida, coletando aproximadamente 100 gramas de tecido vegetal por parcela, sendo amostrados apenas no tratamento controle e na dose 2,4

g ha⁻¹. Após coletadas, as amostras foram imediatamente imersas em nitrogênio líquido e armazenadas em temperatura de -80°C visando cessar o metabolismo e preservar as características metabólicas da planta. Foram determinados os níveis de 6-Benzilaminopurina e Trans-zeatina ribosídeo, em cromatografia líquida de alta performance (HPLC) segundo a metodologia proposta por Müller e Munné-Bosch (2011).

1.2.4 Biometria, componentes da produção e produtividade de grãos

- **Altura da planta**

Durante o estágio de grãos pastoso foi determinado em 10 plantas ao acaso, na área útil de cada parcela a distância média compreendida desde a superfície do solo até a extremidade superior da panícula mais alta.

- **Número de panículas por metro quadrado**

Determinado pela contagem do número de panículas em 1,0 m de fileira de plantas na área útil das parcelas e posteriormente calculado por metro quadrado.

- **Número total de espiguetas por panícula**

Determinado por meio da contagem do número de grãos granados e chochos, após separação dos mesmos com fluxo de ar, de 20 panículas coletadas em cada parcela.

- **Fertilidade das espiguetas**

Calculado a partir da relação entre número de espiguetas cheias e o número total de espiguetas, multiplicado por 100.

- **Massa de 1000 grãos**

Foi avaliado através da coleta ao acaso e pesagem de duas amostras de 1000 grãos de cada parcela (130 g kg⁻¹ de água).

- **Produtividade de grãos**

Determinada através da pesagem dos grãos em casca, provenientes da área útil das parcelas, corrigindo-se a umidade para 130 g kg⁻¹ de água, e convertendo em kg ha⁻¹.

1.2.5 Análise estatística

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância a 5% de probabilidade, quando significativo, as médias foram comparadas pelo teste de

diferença mínima significativa de Fisher (LSD) a 5% de probabilidade, e realizado regressão para doses de TDZ. Todas as análises foram realizadas utilizando o programa estatístico SISVAR 5.3 (FERREIRA, 2011).

1.3 RESULTADOS

1.3.1 Análise do teor foliar de citocininas

Considerando a interação entre os fatores doses de TDZ e safra, os teores foliares de BAP foram influenciados nos estádios de diferenciação floral e grão leitoso, enquanto para TZR houve interação na fase de diferenciação floral e florescimento (Tabela 2).

A aplicação de TDZ promoveu aumento nos teores de BAP na fase de diferenciação floral na safra 2015/2016 e diminuição em 2016/2017 (Tabela 2). Para a TZR, nesta mesma fase, houve diferença apenas na primeira safra, com maiores resultados em função do TDZ. De maneira geral, os teores foliares das citocininas analisadas durante a diferenciação floral foram maiores na segunda safra, com exceção da BAP no tratamento com TDZ.

Na fase de florescimento, é possível observar inversão dos resultados de TZR em função da aplicação de citocinina, da primeira para a segunda safra, semelhantemente ao ocorrido com a BAP durante a diferenciação floral (Tabela 2), ou seja, em 2015/2016 os maiores valores foram obtidos com o uso do TDZ, porém em 2016/2017 ocorreu o inverso.

A amostragem feita na fase de grão leitoso mostra que em 2016/2017 os teores de BAP foram maiores. Além disso, mais uma vez houve inversão dos resultados, de modo que, na segunda safra o teor de citocinina foi maior no tratamento controle, resultado oposto ao observado em 2015/2016 (Tabela 2).

Quanto ao efeito da safra, em 2016/2017 os teores foliares BAP e TZR foram maiores que em 2015/2016, exceto para BAP no ponto de colheita. Considerando a aplicação de TDZ, os maiores resultados foram no ponto de colheita para BAP, e no grão leitoso e colheita para TZR (Tabela 2).

Tabela 2 – Probabilidade de F ($\leq 0,05$) e teores foliares de 6-benzilaminopurina e trans-zeatina ribosídeo ao longo do ciclo do arroz tratado com thidiazuron em 2015/2016 e 2016/2017

		6-Benzilaminopurina			Trans-zeatina ribosídeo		
		Probabilidade de F					
		Trat. (T)	Safra (S)	T x S	Trat. (T)	Safra (S)	T x S
Dif. floral		0,0271	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Florescimento		0,8459	<0,0001	0,1054	0,7589	0,0136	0,0026
Grão leitoso		0,1338	<0,0001	0,0002	0,0020	<0,0001	0,2084
Colheita		0,0002	0,0003	0,2340	0,0005	<0,0001	0,0567
----- ppm -----							
		2015/2016	2016/2017	Média	2015/2016	2016/2017	Média
Dif. floral	TDZ	0,35 Aa*	0,34 Ab	0,34	0,14 Ba	0,18 Aa	0,16
	Controle	0,24 Bb	0,51 Aa	0,38	0,04 Bb	0,18 Aa	0,11
	Média	0,30	0,42		0,09	0,18	
Floresc.	TDZ	0,29	0,36	0,33 a	0,21 Aa	0,20 Ab	0,20
	Controle	0,27	0,39	0,33 a	0,17 Bb	0,25 Aa	0,21
	Média	0,28 B	0,37 A		0,19 B	0,22 A	
Grão leit.	TDZ	0,21 Ba	0,24 Ab	0,23	0,20	0,27	0,23 a
	Controle	0,17 Bb	0,31 Aa	0,24	0,14	0,24	0,19 b
	Média	0,19	0,27		0,17 B	0,25 A	
Colheita	TDZ	0,43	0,30	0,37 a	0,15	0,24	0,19 a
	Controle	0,30	0,22	0,26 b	0,12	0,17	0,14 b
	Média	0,36 A	0,26 B		0,13 B	0,20 A	

*Médias seguidas por letras diferentes maiúsculas na linha e minúscula na coluna são estatisticamente diferentes de acordo com o teste LSD à 5% de probabilidade.

1.3.2 Biometria, componentes da produção e produtividade

É possível observar que houve interação significativa entre os fatores doses de TDZ e safra nas variáveis número de espiguetas por panículas e produtividade de grãos (Tabela 3). Em relação ao efeito isolado de cada fator, as doses de TDZ influenciaram apenas a fertilidade das espiguetas. Já o fator safra influenciou a altura de plantas, fertilidade das espiguetas, massa de 1000 grãos, rendimento de inteiros e grãos quebrados (Tabela 3).

Tabela 3 - Probabilidade do teste F ($\leq 0,05$) para altura de plantas, número de panículas m^{-2} , número de espiguetas $panícula^{-1}$, fertilidade das espiguetas, massa de 1000 grãos, produtividade de grãos, rendimento de engenho, rendimento de inteiros e grãos quebrados em função de doses de TDZ aplicado durante o perfilhamento da cultura em 2015/2016 e 2016/2017

Variável	Probabilidade de F		
	Dose (D)	Safra (S)	D x S
Altura de plantas	0,9974	<0,0001	0,7203
Panículas por m^2	0,5679	0,2315	0,6863
Número de espiguetas por panícula	0,0298	<0,0001	0,0038
Fertilidade das espiguetas	0,0024	<0,0001	0,3958
Massa de mil grãos	0,9288	<0,0001	0,6036
Produtividade	<0,0001	<0,0001	0,0005
Rendimento de engenho	0,8676	0,8188	0,5321
Rendimento de inteiros	0,1455	<0,0001	>0,9999
Grãos quebrados	0,1751	<0,0001	>0,9999

Na primeira safra as plantas foram, em média, nove centímetros mais altas que na segunda safra (Tabela 4). A fertilidade das espiguetas diminuiu 13% na segunda safra. Quanto à massa de 1000 grãos, em 2016/2017 foi 1,7 g menor.

Em relação as características industriais rendimento de inteiros e grãos quebrados, na segunda safra a qualidade industrial do arroz foi superior, apresentando 4% a mais de grãos inteiros e 3% a menos de grãos quebrados (Tabela4).

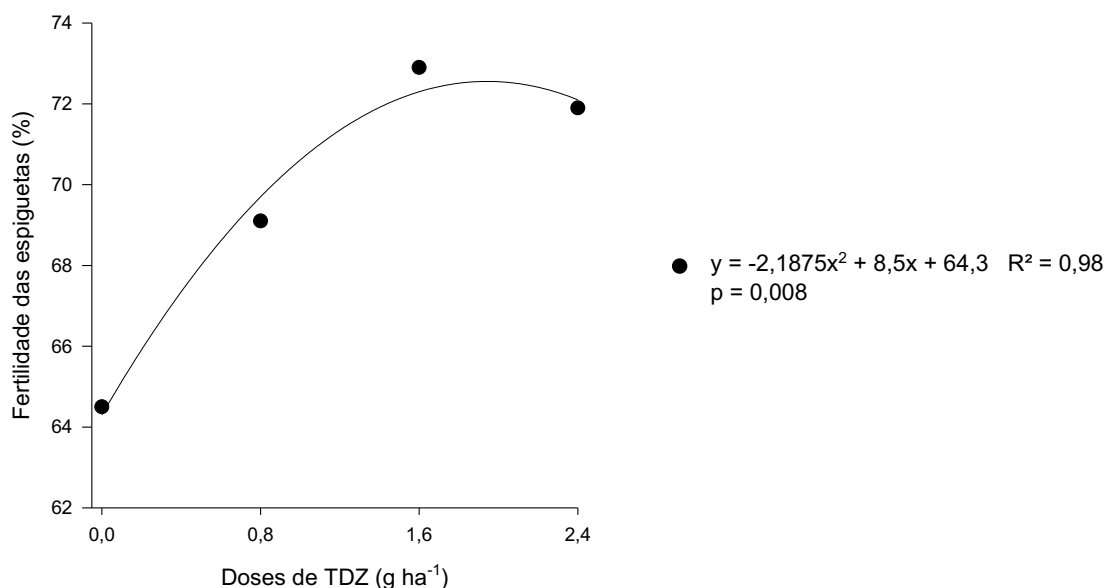
Tabela 4 - Altura de plantas, fertilidade das espiguetas massa de 1000 grãos, rendimento de inteiros e grãos quebrados de plantas de arroz tratadas com doses de thidiazuron em 2015/2016 e 2016/2017

Variável	unidade	Safra	
		2016	2017
Altura de plantas	cm	69 a*	60 b
Fertilidade das espiguetas	%	76 a	63 b
Massa de mil grãos	g	25,4 a	23,7 b
Rendimento de Inteiros	%	57 b	61 a
Grãos quebrados	%	8 a	5 b

* Médias seguidas por letras diferentes nas linhas são estatisticamente diferentes de acordo com o teste LSD à 5% de probabilidade.

Os resultados de fertilidade das espiguetas ajustaram-se à equação quadrática de regressão, observando incrementos em função das doses de TDZ até a dose estimada de $1,9 g ha^{-1}$ (Figura 2). Nesta dose o valor estimado para fertilidade das espiguetas é de 72,5%, cerca de 8% a mais que a dose zero.

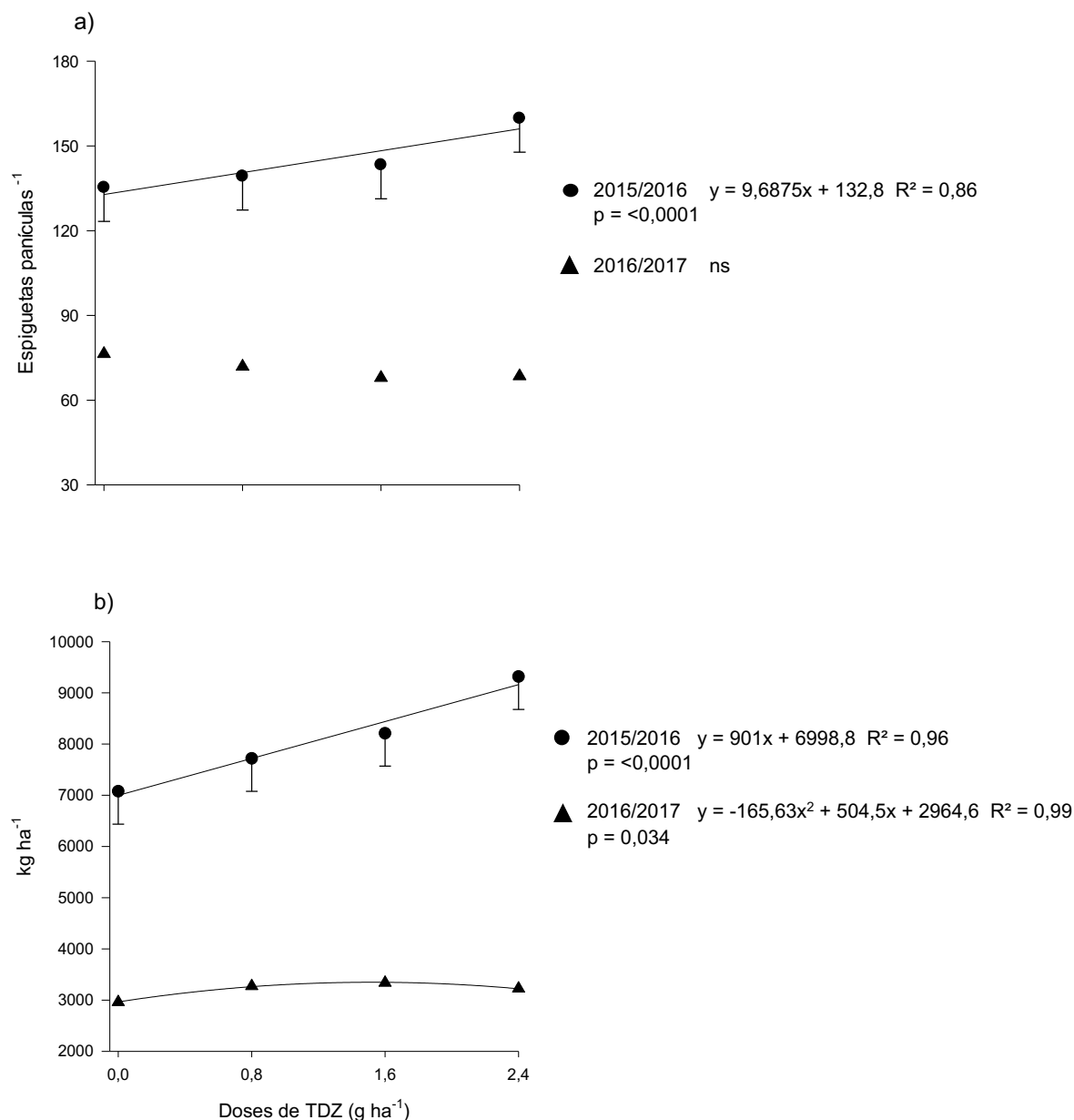
Figura 2 - Fertilidade das espiguetas de plantas de arroz tratadas com doses de thidiazuron em 2015/2016 e 2016/2017



A variável número de espiguetas por panícula teve os maiores resultados em 2015/2016, independente da dose aplicada (Figura 3a). Em relação às doses de TDZ, em 2016/2017 houve ajuste linear para esta variável, de modo que, a dose 2,4 g ha⁻¹ de TDZ foi 15% superior à testemunha. Na segunda safra não houve resposta às doses aplicadas para esta variável.

Quanto à produtividade, o desdobramento mostra comportamento semelhante ao número de espiguetas por panículas. Na primeira safra os resultados foram maiores, independente da dose aplicada, com aumento de 24% em relação à dose zero (Figura 3b). Já na segunda safra, os resultados ajustaram-se à equação quadrática, com ponto de máxima (3348 kg ha⁻¹) obtido com a dose estimada de 1,52 g ha⁻¹.

Figura 3 - Desdobramento estatístico para as variáveis número de espiguetas panícula⁻¹ (a) e produtividade de grãos (b) em plantas de arroz tratadas com doses de thidiazuron em 2015/2016 e 2016/2017



1.4 DISCUSSÃO

1.4.1 Análise foliar dos níveis de citocinina

A diferença entre as condições climáticas da primeira e segunda safra fez com que alguns resultados não se repetissem, além de provocar drástica variação na produtividade de grãos. A safra 2016/2017 teve média pluviométrica menor que 2015/2016, além de altas temperaturas e veranico de 10 dias no mês de fevereiro (Figura 1). Mesmo com a suplementação de irrigação por aspersão, não foi possível

atenuar os efeitos climáticos desfavoráveis na segunda safra.

Estudos mostram que a citocinina é um hormônio que exerce importante papel tanto de crescimento como em interações com fatores abióticos (ARGUESO et al., 2012; KIEBER; SCHALLER, 2014), principalmente no que se diz respeito à diminuição do efeito de estresses (Pavlů et al., 2018). Sendo assim, as maiores temperaturas e menor pluviosidade em 2016/2017 explicam as variações nos resultados das análises foliares de citocinina (Tabela 2). Na safra com maior condição de estresse (2016/2017) houve aumento nos teores de citocinina. Incrementos nos níveis de citocinina em plantas submetidas à altas condições de estresse também foram relatados por Reguera et al. (2013), Décima Oneto et al. (2016) e Ma et al. (2016), inclusive, aumentos da citocinina 6-Benzilaminopurina (NISHIYAMA et al., 2011), semelhantemente ao acontecido neste estudo.

Em relação as inversões nos teores de citocinina observadas em algumas fases, como na diferenciação floral e grão leitoso para BAP e florescimento para TZR (Tabela 2), tal comportamento pode ser explicado pela intensidade de estresse que as plantas foram expostas. Onde não houve interação entre os fatores, as plantas tratadas com TDZ apresentaram os maiores valores, nunca excedendo 0,23 ppm, exceto para BAP no ponto de colheita. Já em situações onde foi observada inversões nos teores de citocinina, da primeira para a segunda safra, os valores da dose 0 foram maiores, tendo teores superiores a 0,24 ppm.

Segundo Zwack; Rashotte (2015), as concentrações de citocinina podem variar em função da intensidade e duração do estresse, bem como do tempo decorrido do momento de estresse até a avaliação, o que explica variações entre os tratamentos e aumento nos teores foliares na segunda safra. Apesar da aplicação de thidiazuron elevar os teores foliares de BAP e TZR em 2015/2016, os maiores aumentos foram observados no tratamento controle na safra com maiores condições de estresse hídrico e térmico. Isso leva ao entendimento de que, em um primeiro momento, o thidiazuron aumenta os teores de citocinina deixando a planta, teoricamente, menos suscetível ao estresse. No entanto, a alta exposição ao estresse abiótico, faz com que as plantas não tratadas (não protegidas pela citocinina) produzam grandes quantidades desse hormônio. Zwack; Rashotte (2015) confirmam que quanto maior o período de estresse, maior são os níveis de citocinina produzidos pela planta, corroborando com os resultados desse trabalho.

1.4.2 Biometria, componentes da produção e produtividade de grãos

Na primeira safra, a distribuição de chuvas ao longo do ciclo foi homogênea, associadas a temperaturas entre 15°C e 28,5°C (Figura 1a), o que proporcionou condições para se atingir produtividade de até 9161 kg ha⁻¹. Em 2016/2017 as médias de temperaturas maiores ao longo do ciclo, juntamente com o veranico ocorrido durante 07/02 até 25/02, atingindo as fases de emborrachamento e florescimento da cultura (Figura 1b), resultaram em diminuição significativa da produtividade. Yoshida (1981) relata que estresse causado por altas temperaturas durante a fase reprodutiva da cultura do arroz causa redução significativa no número de espiguetas por panícula e fertilidade das espiguetas, semelhantemente ao ocorrido no experimento conduzido em 2016/2017.

A irrigação por aspersão não foi suficiente para fornecer a quantidade de água exigida pela cultura aliviar os efeitos da distribuição desuniforme das chuvas na safra 2016/2017, o que causou danos significativos ao crescimento e produção do arroz (Tabela 4). Estudos comparando lâminas de irrigação mostram que em situações de estresse hídrico ocorre redução na altura de plantas (CRUSCIOL et al., 2003; ARTIGIANI et al., 2012), fertilidade das espiguetas (CRUSCIOL et al., 2006; HEINEMANN; STONE, 2009) e massa de mil grãos (CRUSCIOL et al., 2006; GUIMARÃES et al., 2011).

O aumento da fertilidade das espiguetas e número de espiguetas por panícula em função das doses de TDZ em 2015/2016 (Figura 2 e 3a), se deu pelo efeito de crescimento e desenvolvimento da citocinina na planta. Os maiores teores de BAP e TZR em algumas fases em 2015/2016, permite inferir essa relação (Tabela 2). A citocinina promove divisão celular (KIEBER; SCHALLER, 2014), o que favorece a formação e definição do número de espiguetas, bem como crescimento do tubo polínico no momento da fecundação da espiguetas.

Além dos processos de crescimento e desenvolvimento, a citocinina também atua nas respostas a estresse abióticos por meio da proteção do aparato fotossintético, aumento do sistema antioxidante, melhoras no balanço osmótico e modulação de hormônios relacionados a estresses (PAVLŮ et al., 2018). Esses fatores podem ter influenciado positivamente as plantas tratadas com TDZ na primeira safra, considerando que, mesmo em condições climáticas favoráveis, as plantas sofrem com estresses diariamente, advindos de temperaturas altas nas horas mais

quentes do dia, ataque de insetos, pragas, barreiras químicas e físicas no solo, dias nublados, entre outros.

Considerando os teores foliares de citocinina maiores em 2017, principalmente no tratamento controle (Tabela 2), era esperado que houvesse alívio de estresse maior que em 2016. Porém, elevadas concentrações de citocinina na planta podem ser prejudiciais, podendo haver inibição do crescimento radicular e parte aérea (LIAO et al., 2017; RAMIREDDY et al., 2018).

Apesar de não ter efeito no número de espiguetas por panícula em 2016/2017, observou-se aumento na produtividade até a doses estimada de 1,52 g ha⁻¹. Isso aconteceu por causa dos incrementos na fertilidade das espiguetas, ou seja, o maior número de espiguetas férteis produzidas resultou em maior número de grãos cheios. Fageria; Moreira (2011) afirmam que qualquer oscilação nos componentes da produção reflete na produtividade.

1.5 CONCLUSÃO

O uso de citocinina exógena em arroz aumenta os níveis foliares desse hormônio, que tem interação direta com condições ambientais, aliviando efeitos de estresses abiótico, quando estes acontecem de forma moderada. Os principais componentes da produção afetados pelo uso do thidiazuron são o número de espiguetas por panícula e fertilidade das espiguetas, e esses incrementos, acontecendo em consonância, resultam no aumento na produtividade do arroz de terras altas. Desta forma, a aplicação de thidiazuron durante a fase de perfilhamento do arroz de terras altas possibilita melhor desenvolvimento da cultura, proporcionando estabilidade da produção.

REFERÊNCIAS

- AGRO NORTE, P. E. S. L. **Produtos, Arroz, ANa 8001**. Disponível em: <http://www.agronorte.com.br/br/VerProduto/1/48-ANa_8001>. Acesso em: 7 out. 2015.
- ALVES, C. et al. Thidiazuron aumenta a produtividade em arroz de terras altas. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 45, n. 3, p. 333–339, 2015.
- ARF, O. et al. Influência da época de semeadura no comportamento de cultivares de arroz irrigado por aspersão em selvíria, MS. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.

35, n. 10, p. 1967–1976, 2000.

ARF, O. et al. Resposta de cultivares de arroz de sequeiro ao preparo do solo e à irrigação por aspersão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, n. 6, p. 871–879, 2001.

ARF, O. et al. Preparo do solo, irrigação por aspersão e rendimento de engenho do arroz de terras altas. **Scientia Agricola**, v. 59, n. 2, p. 321–326, 2002.

ARGUESO, C. T. et al. Two-component elements mediate interactions between cytokinin and salicylic acid in plant immunity. **PLoS Genetics**, v. 8, n. 1, 2012.

ARTIGIANI, A. C. C. A. et al. Produtividade e qualidade industrial do arroz de terras altas em função da disponibilidade hídrica e adubação. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 42, n. 3, p. 340–349, 2012.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO-CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos, safra 2018/19, oitavo levantamento**. Brasília, 2019. 132p. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos>>. Acesso em: 27 maio. 2019.

CRUSCIOL, C. A. C. et al. Produtividade e qualidade industrial de grãos de arroz de terras altas em função de lâminas de água no sistema irrigado por aspersão. **Acta Scientiarum: Agronomy**, v. 25, n. 1, p. 125–130, 2003.

CRUSCIOL, C. A. C. et al. Yield of upland rice cultivars in rainfed and sprinkler-irrigated systems in the Cerrado region of Brazil. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, v. 46, n. 11, p. 1515–1520, 2006.

CRUSCIOL, C. a C. et al. Root distribution, nutrient uptake, and yield of two upland rice cultivars under two water regimes. **Agronomy Journal**, v. 105, n. 1, p. 237–247, 2013.

DÉCIMA ONETO, C. et al. Water deficit stress tolerance in maize conferred by expression of an isopentenyltransferase (IPT) gene driven by a stress- and maturation-induced promoter. **Journal of Biotechnology**, v. 220, p. 66–77, 2016.

FAGERIA, N. K.; MOREIRA, A. The Role of Mineral Nutrition on Root Growth of Crop Plants. In: **Advances in Agronomy**. vol. 110, p. 251-331, 2011.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 35, n. 6, p. 1039–1042, 2011.

GUIMARÃES, C. M. et al. Sistema radicular do arroz de terras altas sob deficiência hídrica. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 41, p. 126–134, 2011.

GUO, B. et al. Thidiazuron: A multi-dimensional plant growth regulator. **African Journal of Biotechnology**, v. 10, n. 45, p. 8984–9000, 2011.

HEINEMANN, A.; STONE, L. Efeito da deficiência hídrica no desenvolvimento e rendimento de quatro cultivares de arroz de terras altas. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 39, n. 2, 2009.

KIEBER, J. J.; SCHALLER, G. E. Cytokinins. **The Arabidopsis Book**, v. 12, p. e0168, 2014.

LIAO, X. et al. Overexpression of MsDREB6.2 results in cytokinin-deficient developmental phenotypes and enhances drought tolerance in transgenic apple plants. **The Plant Journal**, v. 89, n. 3, p. 510–526, 2017.

MA, X.; ZHANG, J.; HUANG, B. Cytokinin-mitigation of salt-induced leaf senescence in perennial ryegrass involving the activation of antioxidant systems and ionic balance. **Environmental and Experimental Botany**, v. 125, p. 1–11, 2016.

MÜLLER, M.; MUNNÉ-BOSCH, S. Rapid and sensitive hormonal profiling of complex plant samples by liquid chromatography coupled to electrospray ionization tandem mass spectrometry. **Plant Methods**, v. 7, n. 1, p. 37, 2011.

NISHIYAMA, R. et al. Analysis of Cytokinin Mutants and Regulation of Cytokinin Metabolic Genes Reveals Important Regulatory Roles of Cytokinins in Drought, Salt and Absciscic Acid Responses, and Absciscic Acid Biosynthesis. **The Plant Cell**, v. 23, n. 6, p. 2169–2183, 2011.

PAVLŮ, J. et al. Cytokinin at the Crossroads of Abiotic Stress Signalling Pathways. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 19, n. 8, p. 2450, 2018.

PERES, A. R. et al. Effect of irrigation, rainfed conditions and nitrogen sources on newly released upland rice cultivar (BRS Esmeralda) with greater tolerance to drought stress. **Australian Journal of Crop Science**, v. 12, n. 07, p. 1072–1081, 2018.

PINHEIRO, B. D. S.; CASTRO, E. da M. de; GUIMARÃES, C. M. Sustainability and profitability of aerobic rice production in Brazil. **Field Crops Research**, v. 97, n. 1, p. 34–42, 2006.

PRASAD, R. Aerobic Rice Systems. **Advances in Agronomy**, v. 111, p. 207–247, 2011.

RAIJ, B. van et al. Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. **Campinas: Instituto Agrônômico**, n. 19, 2001. p. 285

RAMIREDDY, E. et al. Root Engineering in Barley: Increasing Cytokinin Degradation Produces a Larger Root System, Mineral Enrichment in the Shoot and Improved Drought Tolerance. **Plant Physiology**, v. 177, n. 3, p. 1078–1095, 2018.

REGUERA, M. et al. Stress-Induced Cytokinin Synthesis Increases Drought Tolerance through the Coordinated Regulation of Carbon and Nitrogen Assimilation in Rice. **Plant Physiology**, v. 163, n. 4, p. 1609–1622, 2013.

SANTOS, A. B.; STONE, L. F.; VIEIRA, N. R. A. **The rice crop in Brazil**. 2. ed. Santo Antônio de Goiás, GO, Brazil: Embrapa Arroz e Feijão, 2006. 1000 p.

SANTOS, H. G. dos; et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 938 p.

SILVA, A. S. et al. Irrigação de salvação em culturas de subsistência. In: BRITO, L.T. de L.; MOURA, M.S.B. de; GAMA, G.F.B. (Ed.). **Potencialidades da água de chuva no Semiárido brasileiro**. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2007. cap. 8, p.159-179.

STONE, L. F. et al. Adubação nitrogenada em arroz sob irrigação suplementar por aspersão. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 34, n. 6, p. 927–932, 1999.

STONE, L. F.; LIBARDI, P. L.; REICHARDT, K. Deficiência hídrica, vermiculita e cultivares I. Efeito na produtividade do arroz. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 19, n. 6, p. 695–707, 1984.

YOSHIDA, S. Fundamentals of rice crop science. **Growth and development of the rice plant**, Los Baños: International Rice Research Institute, 1981. p. 268.

ZWACK, P. J.; RASHOTTE, A. M. Interactions between cytokinin signalling and abiotic stress responses. **Journal of Experimental Botany**, v. 66, n. 16, p. 4863–4871, 2015.

CAPÍTULO 2 – APLICAÇÃO FOLIAR DE THIDIAZURON: NUTRIÇÃO E PRODUTIVIDADE DO ARROZ DE TERRAS ALTAS

Resumo

O arroz cultivado no ecossistema de terras altas é uma alternativa para produção com baixo consumo de água tendo em vista a escassez de recursos hídricos para fins agrícolas. Ao longo dos anos o melhoramento genético e o uso de irrigação por aspersão promoveram melhoras nos índices de produtividade do arroz de terras altas. Atualmente tem sido mostrado que a citocinina tem capacidade de aumentar a produtividade do arroz de terras altas. Sendo assim, esse trabalho foi realizado com o objetivo de avaliar o efeito da citocinina na produtividade de arroz, bem como os nutrientes que são afetados por este hormônio. Foi realizado experimento em blocos casualizados com doses de thidiazuron (TDZ) (0, 0,8, 1,6 e 2,4 g ha⁻¹), aplicadas no perfilhamento do cultivar de arroz Ana 8001, nas safras 2015/2016 e 2016/2017. Foi realizada análise nutricional nas fases de diferenciação floral, emborrachamento, florescimento, grão leitoso e ponto de colheita. Os órgãos avaliados foram as folhas, colmo e panícula. A produtividade e exportação de nutrientes no grão também foram quantificadas. Na primeira safra os teores de K na folha aumentaram em função das doses de TDZ em todas as fases avaliadas, exceto no emborrachamento. Na panícula, a concentração de K também aumentou, o que pode ter favorecido a translocação de fotoassimilados para aquele órgão. Durante o ponto de colheita os teores de N no colmo diminuíram nas doses mais altas de citocinina, possivelmente devido à maior translocação de compostos nitrogenados para os drenos. Os incrementos na produtividade foram de até 2162 e 384 kg ha⁻¹ na primeira e segunda safra, respectivamente. A exportação de nutrientes se deu na sequência de N>K>P>Mg>S>Fe>Zn>Cu. Considerando a interação da citocinina com o K, as plantas tratadas com thidiazuron se beneficiam do efeito desse nutriente, promovendo aumento da produtividade.

2.1 INTRODUÇÃO

A produção de arroz é uma atividade que consome cerca de 80% da água doce destinada à agricultura no mundo (BOUMAN; TUONG, 2001; KHUSH, 2005). Devido ao aumento populacional e demanda de recursos hídricos para uso doméstico e industrial, sistemas de produção com baixo consumo de água vem ganhando espaço no cenário agrícola mundial.

O arroz produzido no ecossistema de terras altas é uma alternativa sustentável para agricultura com baixo consumo de água. Esse sistema tem uma exigência média 600 a 700 mm (BOUMAN et al., 2005; FORNASIERI FILHO; FORNASIERI, 2006; BOUMAN et al., 2007), cerca de 80% menos água que o sistema de arroz irrigado (PRASAD, 2011). No Brasil, o arroz de terras altas é produzido em áreas com baixa fertilidade e elevada acidez (PINHEIRO et al., 2006), depende de chuvas para o suprimento de água (ARF et al., 2001; SANTOS et al., 2006), e a ocorrência de veranicos durante o ciclo ocasiona reduções na produtividade (ARF et al., 2002), fazendo com que essa seja uma atividade de alto risco.

O desenvolvimento de cultivares adaptadas às condições de terras altas, tolerantes à seca (GUIMARÃES et al., 2016), juntamente com a irrigação por aspersão, tem possibilitado estabilidade de produtividade do arroz de terras altas. Stone et al. (1999) reportam que cultivares de arroz de terras altas adaptados ao sistema de irrigação por aspersão podem garantir produtividades maiores que 5 t ha⁻¹, fazendo deste um sistema economicamente competitivo.

Recentemente foi estabelecido que o uso de thidiazuron (TDZ) tem capacidade de aumentar a produtividade de grãos em cultivares de arroz de terras altas irrigados por aspersão (ALVES et al., 2015). O TDZ (N-fenil-N'-1,2,3-tiadiazol-5-ilurea) é uma feniluréia, foi classificado como um tipo de citocinina que induz diversas respostas na planta, similares às respostas induzidas por citocininas naturais (GUO et al., 2011). Alguns estudos também mostram que a citocinina pode interferir positivamente na produtividade de grãos em arroz (ASHIKARI et al., 2005; JAVID et al., 2011; ZULKARNAIN et al., 2013), reforçando o potencial dessa técnica para o arroz de terras altas.

A citocinina é um hormônio vegetal, desempenhando papel na divisão celular, aumento na capacidade fotossintética (SONG et al., 2013), expansão foliar, aumento na assimilação de CO₂, condutância estomática, eficiência da enzima rubisco, e desenvolvimento de cloroplastos funcionais (MONAKHOVA; CHERNYAD'EV, 2007;

LAZOVA; YONOVA, 2010; CORTLEVEN; VALCKE, 2012). A citocinina também regula a mobilização de nutrientes e fotoassimilados por meio de alterações na relação fonte/dreno (TAIZ; ZEIGER, 2017).

A literatura mostra influência direta da citocinina no crescimento radicular, de modo que, elevados níveis desse hormônio podem inibir o crescimento das raízes (KIEBER; SCHALLER, 2014), prejudicando a exploração do solo e captação de nutrientes. Por outro lado, a citocinina é responsável pela expressão de genes que codificam proteínas nas raízes responsáveis por absorção de nutrientes (SÉGUÉLA et al., 2008; NAM et al., 2012; SHEN et al., 2014; RUFFEL et al., 2016). Logo, tem-se a hipótese que o uso de citocinina influencia positivamente a absorção de nutrientes pela planta, resultando em melhor desenvolvimento e produtividade da cultura.

Desta forma, este trabalho foi realizado objetivando investigar os efeitos de doses de thidiazuron na produtividade de arroz de terras altas, juntamente com o comportamento nutricional das plantas tratadas com esta substância, identificando quais nutrientes são influenciados nos diferentes órgãos da parte aérea ao longo do ciclo da cultura.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1 Caracterização da área e delineamento experimental

O experimento foi conduzido em condições de terras altas, favorecidas pelo uso de irrigação por aspersão, nas safras 2015/2016 e 2016/2017, em Botucatu (SP) (48°26'W, 22°51'S e altitude de 740 m). O clima, conforme a classificação de Köppen, é do tipo Cwa, caracterizado como tropical de altitude, com inverno seco e verão quente e chuvoso. Os dados climáticos registrados durante o ciclo de cultivo nas duas safras estão apresentados na Figura 1.

O solo da área experimental foi classificado como NITOSSOLO VERMELHO distroférico (SANTOS et al., 2018). Seus atributos químicos foram determinados antes da instalação do experimento, na camada 0,0-0,20 m, segundo a metodologia proposta por Raij et al. (2001) (Tabela 1).

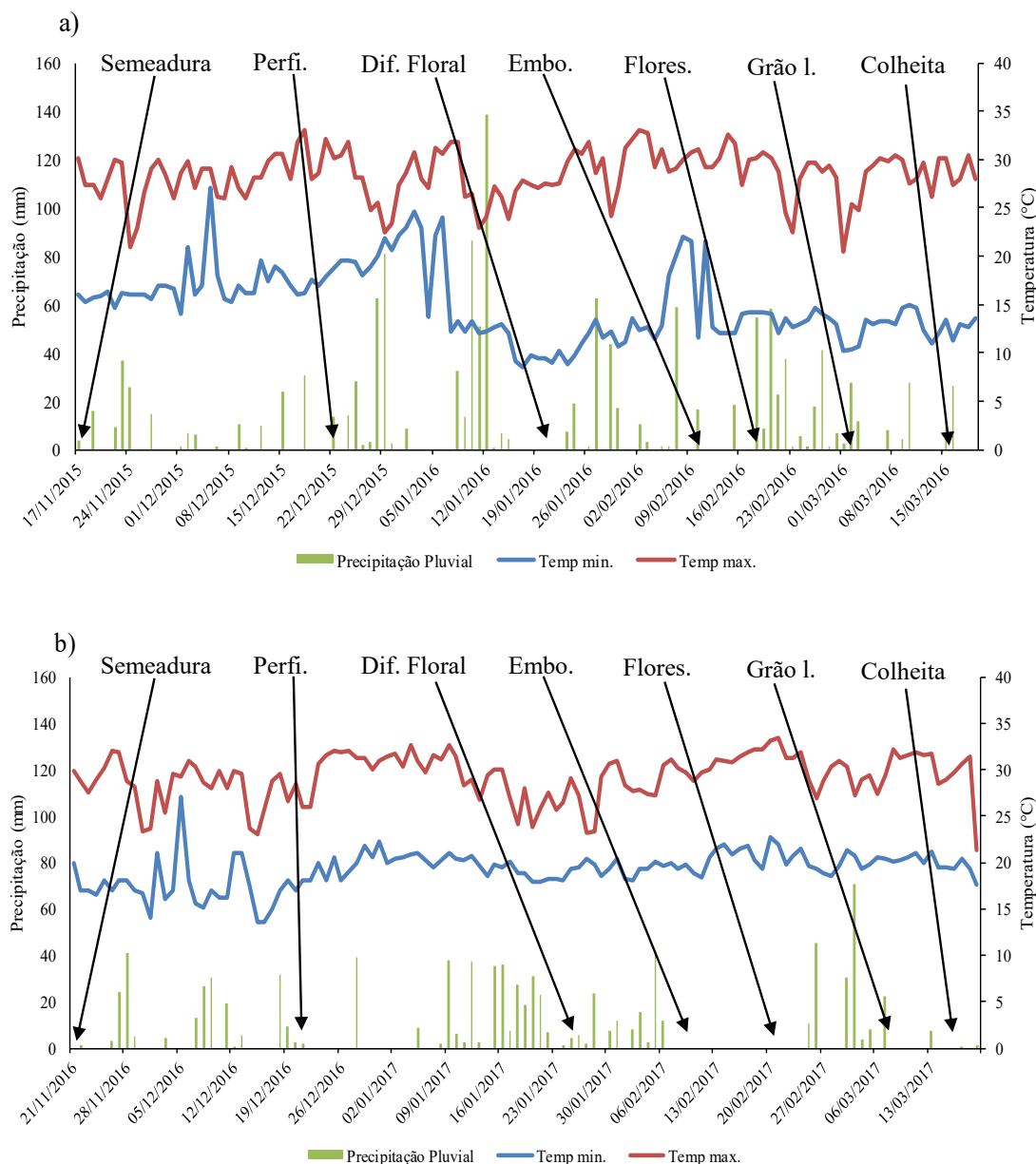
Tabela 1 - Caracterização dos atributos químicos do solo da área experimental referente as safras de 2015/2016 e 2016/2017

Safr	pH _(CaCl₂)	MO	P _(Resina)	S	Al ⁺³	H+Al ⁺³	K	Ca	Mg	SB	CTC	V%
		<i>g dm⁻³</i>	<i>mg dm⁻³</i>				<i>mmol_c dm⁻³</i>					
2015/2016	5,2	20	45	13	1	33	3,4	29	12	44	77	57
2016/2017	5,1	24	44	14	2	35	3,3	26	10	39	74	52

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos ao acaso com seis repetições. Os tratamentos foram constituídos por doses (0, 0,8, 1,6 e 2,4 g ha⁻¹) de thidiazuron, aplicadas durante a fase de perfilhamento da cultura. As doses adotadas nesse experimento foram definidas tendo como base no trabalho de Alves et al. (2015), visando aumentar a quantidade aplicada e encontrar a dose máxima de resposta em produtividade.

O cultivar foi o ANa 8001, que em virtude de seu porte médio, mostra resistência ao acamamento, embora possa acamar quando em condições de excessivo desenvolvimento vegetativo. O potencial produtivo é de 8.000 kg ha⁻¹, sendo responsivo a novas tecnologias, dando suporte ao estabelecimento da agricultura moderna. Tem como características principais: ciclo curto (107 dias até a maturação completa), 80 dias da emergência ao florescimento, grãos tipo longo fino (agulhinha), moderadamente suscetível à brusone (*Pyricularia oryzae* Cav.) (AGRO NORTE, 2015).

Figura 1 - Dados diários de precipitação pluvial, temperatura máxima e mínima durante a condução do experimento em 2015/2016 (a) e 2016/2017 (b)



Cada unidade experimental foi constituída por 8 fileiras de plantas, com 7,0 m de comprimento, espaçadas em 0,35 m. As 4 fileiras centrais foram consideradas área útil, sendo que 0,50 m da extremidade de cada fileira de plantas e as quatro fileiras externas constituíram-se de bordadura.

2.2.2 Condução do experimento

O experimento foi conduzido em sistema de plantio direto. A sementeira aconteceu no dia 17 e 21 de novembro, na safra 2015/2016 e 2016/2017,

respectivamente, utilizando-se 200 sementes viáveis m^{-2} . A emergência das plântulas ocorreu seis dias após a semeadura. Na semeadura foi aplicado 40 kg ha^{-1} de N na forma de ureia, 61,6 kg ha^{-1} de P_2O_5 na forma de superfosfato simples e 35,2 kg ha^{-1} de K_2O na forma cloreto de potássio, ao lado e abaixo da semente, nas duas safras (RAIJ et al., 1996).

A irrigação do experimento foi realizada por sistema de aspersão convencional, composto por duas linhas laterais e aspersores com vazão de 1,07 $\text{m}^3 \text{ hora}^{-1}$. O momento da irrigação foi definido pelo método de irrigação de salvação, onde o fornecimento de água é realizado apenas quando as plantas apresentam sintomas de falta de água ao ponto de comprometer a produção ou quando a umidade do solo está em torno de 30-40% da capacidade de campo, sendo fornecido uma lâmina de 20 mm (SILVA et al., 2007).

O controle de plantas daninhas, insetos-praga e doenças foi realizado de acordo com as necessidades da cultura. Na adubação de cobertura foi aplicado 80 kg ha^{-1} de N, na forma de sulfato de amônio, parcelada em duas vezes (40 kg ha^{-1} e 40 kg ha^{-1}), respectivamente aos 15 (pré-perfilhamento) e 30 (perfilhamento pleno), nas duas safras.

2.2.3 Coleta de plantas e análise nutricional

As amostragens foram realizadas em função dos estádios fenológicos da cultura, na primeira e segunda safra, no perfilhamento (30 e 25 DAE), diferenciação floral (59 e 60 DAE), emborrachamento (79 e 75 DAE), florescimento (86 e 87 DAE), grão leitoso (98 e 102 DAE) e ponto de colheita (112 e 110 DAE), respectivamente. Em cada parcela, foram coletadas as plantas contidas em 0,30 m de linha da área útil. As partes da planta foram separadas em folha (lâmina foliar), colmo, (colmo + bainha) e panícula. As amostras foram alocadas em estufa com circulação forçada de ar a 60°C, até atingir massa constante. Para a avaliação nutricional, as amostras foram moídas em moinho tipo Willey e as concentrações de N, P, K, Ca, Mg, S, Zn, Cu, Fe e Mn foram determinadas segundo metodologia proposta por (MALAVOLTA et al., 1997).

2.2.4 Produtividade de grãos e exportação de nutrientes

A produtividade de grãos foi determinada por meio da colheita de duas linhas da área útil de cada parcela, sendo os grãos em casca pesados e a umidade corrigida

para 130 g kg^{-1} de água, e posteriormente convertido em kg ha^{-1} . A exportação de nutrientes pelos grãos foi obtida multiplicando o teor de nutrientes nos grãos pela produtividade obtida em cada tratamento.

2.2.5 Análise estatística

Os resultados foram submetidos à análise de variância a 5% de probabilidade, quando significativo, as médias foram comparadas pelo teste de diferença mínima significativa de Fisher (LSD) a 5% de probabilidade, e realizado regressão para doses de TDZ. Todas as análises foram realizadas utilizando o programa estatístico SISVAR 5.3 (FERREIRA, 2011).

2.3 RESULTADOS

Em 2015/2016 a quantidade de chuva ao longo do ciclo atingiu 1385 mm, as médias de temperatura mínima e máxima foram de 15 e $28,4^{\circ}\text{C}$, respectivamente (Figura 1a), enquanto em 2016/2017 a precipitação foi de 878 mm, com médias de temperatura mínima de $19,2^{\circ}\text{C}$ e máxima de $29,2^{\circ}\text{C}$ (Figura 1b).

Dentre todos os nutrientes avaliados apenas os teores de N e K foram influenciados pelas doses de TDZ aplicadas, e essa influência só aconteceu em função da diferença entre as duas safras. Para o N, observou-se influência dos teores apenas no colmo durante o ponto de colheita (Tabela 2). Em relação ao K, os teores foliares apresentaram interação em todas as fases avaliadas, e também para os teores na panícula no ponto de colheita (Tabela 2).

Na interação apresentada na Figura 2 é possível observar que, na safra 2015/2016, os teores de N no colmo foram maiores que em 2016/2017 para todas as doses. Quanto à resposta das doses, na primeira safra os resultados ajustaram-se à equação quadrática, sendo o ponto de máxima atingido na dose estimada de $1,1 \text{ g ha}^{-1}$. Na segunda safra os teores apresentaram redução linear em função das doses, com diminuição de $0,66 \text{ g por kg de matéria seca na dose de } 2,4 \text{ g ha}^{-1}$ (Figura 2).

Figura 2 - Desdobramento estatístico para teores de N no colmo avaliado no ponto de colheita de plantas de arroz tratadas com thidiazuron em 2015/2016 e 2016/2017. Barras de erros representam diferença mínima significativa

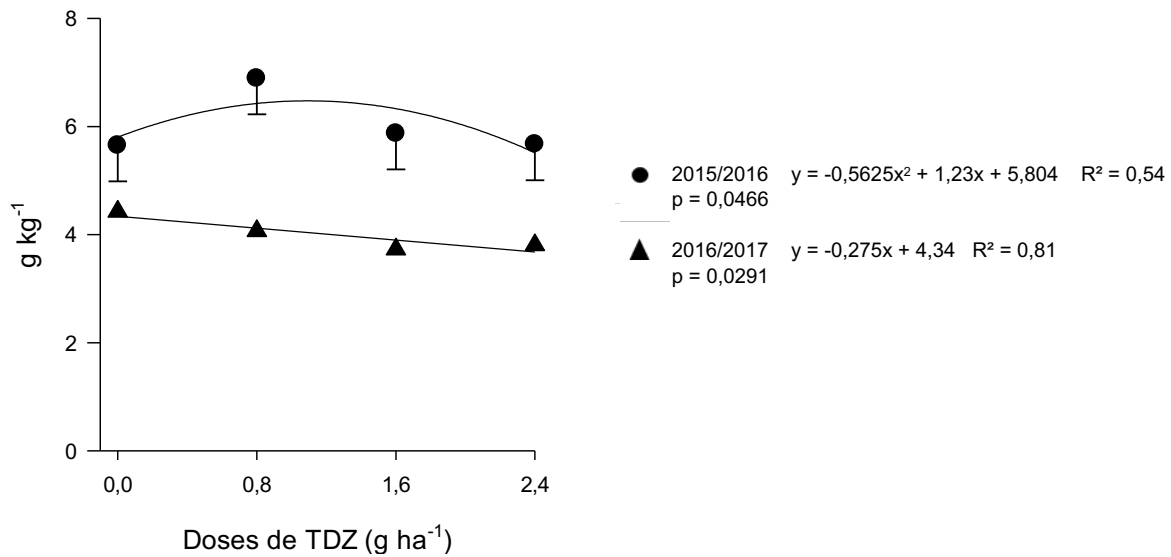


Tabela 2 - Probabilidade de F ($\leq 0,05$) para os teores de nutrientes durante a diferenciação floral (DF), emborrachamento (EB), florescimento (FL), grão leitoso (GL) e pondo de colheita (PC) em plantas de arroz tratadas com thidiazuron em 2015/2016 e 2016/2017

		Folha					Colmo					Panícula		
		DF	EB	FL	GL	PC	DF	EB	FL	GL	PC	FL	GL	PC
N	TDZ	0,7791	0,4215	0,9798	0,3003	0,9618	0,5956	0,7357	0,9154	0,8519	0,0117	0,8491	0,8910	0,8111
	T*S [†]	0,9813	0,9338	0,7643	0,9516	0,5139	0,6889	0,7370	0,5845	0,9699	0,0131	0,9661	0,4102	0,2114
P	TDZ	0,1722	0,7951	0,0829	0,4748	0,2523	0,4110	0,8700	0,7330	0,5478	0,0386	0,5309	0,4823	0,7625
	T*S	0,4255	0,6546	0,8197	0,5066	0,2368	0,1910	0,5472	0,0261	0,3972	0,0826	0,5355	0,1880	0,7011
K	TDZ	0,0444	0,0638	<0,0001	0,0312	0,0631	0,3913	0,0940	0,8672	0,5610	0,6317	0,2923	0,5260	0,0004
	T*S	0,0044	0,0003	<0,0001	0,0002	0,0314	0,1318	0,0805	0,6124	0,0735	0,5961	0,4963	0,5381	0,0012
Ca	TDZ	0,5797	0,1054	0,1577	0,1161	0,3548	0,8920	0,4783	0,7708	0,6224	0,4429	0,6197	0,1473	0,9171
	T*S	0,2127	0,1287	0,2690	0,3334	0,3403	0,8685	0,6173	0,6977	0,4317	0,3231	0,5691	0,1013	0,9163
Mg	TDZ	0,4197	0,1254	0,4615	0,1348	0,5775	0,9516	0,8967	0,5738	0,1212	0,4511	0,6516	0,0670	0,5063
	T*S	0,4454	0,4730	0,7177	0,3491	0,8585	0,7797	0,1890	0,4996	0,8906	0,4681	0,6835	0,4682	0,7860
S	TDZ	0,9129	0,3246	0,8505	0,3892	0,8310	0,7182	0,6094	0,6342	0,3522	0,8773	0,6087	0,9809	0,3853
	T*S	0,2599	0,4199	0,4838	0,2625	0,3374	0,4243	0,4510	0,3816	0,9371	0,1047	0,2133	0,2174	0,6879
Cu	TDZ	0,2304	0,9973	0,1750	0,7560	0,4701	0,5480	0,2140	0,4830	0,7344	0,0825	0,1118	0,9028	0,2313
	T*S	0,1640	0,1416	0,3059	0,8361	0,4904	0,6643	0,6914	0,0376	0,0728	0,2382	0,1186	0,9671	0,2848
Zn	TDZ	0,6336	0,9661	0,3985	0,0621	0,6334	0,3726	0,6550	0,3353	0,4722	0,7874	0,4791	0,1238	0,1153
	T*S	0,4542	0,5286	0,3382	0,1561	0,2788	0,2102	0,5685	0,1052	0,3838	0,9528	0,4003	0,4954	0,1754
Mn	TDZ	0,9249	0,5519	0,9126	0,6102	0,8702	0,9319	0,2764	0,6105	0,1300	0,8509	0,0133	0,1500	0,0551
	T*S	0,7372	0,9668	0,6056	0,4835	0,1676	0,4497	0,4657	0,4238	0,5451	0,2198	0,1350	0,0762	0,1031
Fe	TDZ	0,5106	0,5128	0,8214	0,3444	0,8752	0,3898	0,4691	0,3251	0,3862	0,5909	0,8995	0,7486	0,4295
	T*S	0,8384	0,7232	0,1199	0,2502	0,9330	0,8980	0,8355	0,2855	0,2449	0,4658	0,5408	0,6230	0,4196

[†] Interação entre o fator doses de thidiazuron e safra.

Os teores de K na folha na fase de diferenciação floral foram maiores em 2015/2016, porém, não responderam ao efeito das doses de TDZ, enquanto em 2016/2017 os resultados tiveram aumento linear em função das doses (Figura 3a), chegando a um teor de $19,9 \text{ g kg}^{-1}$ de matéria seca.

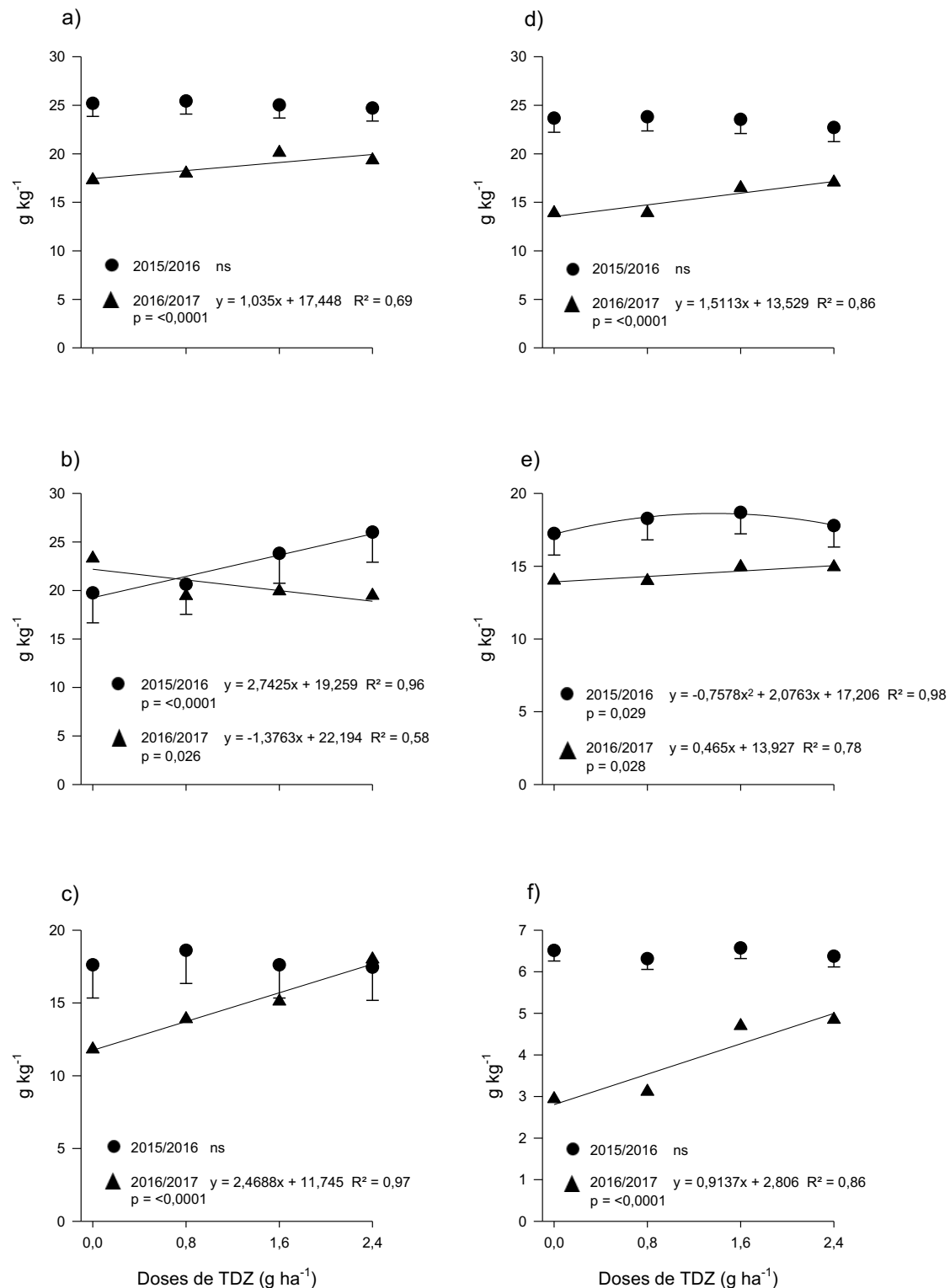
Durante a fase de emborrachamento os teores diferiram nas duas safras, com exceção da dose $0,8 \text{ g ha}^{-1}$. Observa-se na Figura 3b que a partir da dose $0,8 \text{ g ha}^{-1}$ ocorre a inversão dos teores de K na folha. De maneira geral, nota-se incremento de 6,5 e decréscimo de $3,3 \text{ g ha}^{-1}$ dos teores de K na folha nas safras de 2015/2016 e 2016/2017, respectivamente.

Na fase de florescimento e grão leitoso, os teores de K na folha responderam às doses de TDZ semelhante à fase de diferenciação floral (Figura 3c e 3d). Na primeira safra não houve efeito das doses, enquanto em 2016/2017 os resultados ajustaram-se à equação linear positiva, com aumentos de 5,9 e $3,6 \text{ g ha}^{-1}$ para florescimento e grão leitoso, nessa ordem.

Nota-se na Figura 3e que os teores foliares de K no ponto de colheita também foram maiores em 2015/2016. Na primeira safra os resultados ajustaram-se à equação quadrática, com máximo valor de K ($18,6 \text{ g kg}^{-1}$) obtido com a dose estimada de $1,37 \text{ g ha}^{-1}$. Já na segunda safra, os incrementos foram lineares até a maior dose, com cerca de $1,11 \text{ g kg}^{-1}$ de K a mais que a testemunha.

No ponto de colheita, o comportamento dos teores de K na panícula foram semelhantes aos foliares na maioria das fases avaliadas, onde, os resultados de 2015/2016 sobressaíram, porém, não respondendo ao efeito do TDZ aplicado (Figura 3f). Em 2016/2017 houve aumento linear dos teores em resposta às doses aplicadas, com aumento total de $2,2 \text{ g}$ de K por kg de matéria seca.

Figura 3 - Desdobramento estatístico para os teores de K na folha nas fases de diferenciação foliar (a), emborrachamento (b), florescimento (c), grão leitoso (d), ponto de colheita (e) e na panícula no ponto de colheita (f) de plantas de arroz tratadas com thidiazuron. Barras de erros representam diferença mínima significativa, ns: não significativo



A produtividade de grãos apresentou interação entre os fatores doses de TDZ

e safra. Já a quantidade exportada de nutrientes pelos grãos, calculada em função da produtividade, teve apenas efeito das doses, exceto para Ca e Mn (Tabela 3).

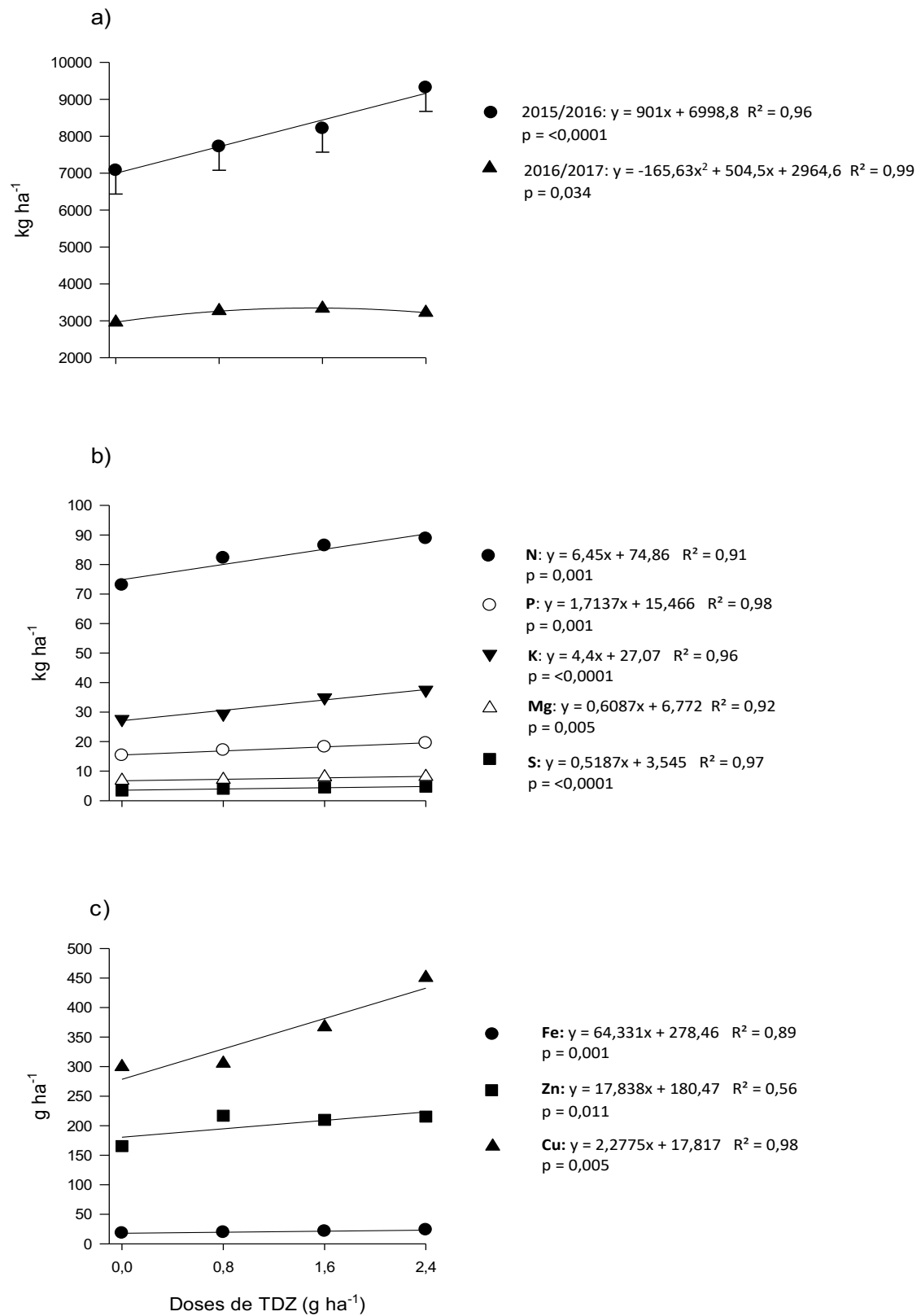
Tabela 3 - Probabilidade de F ($\leq 0,05$) para produtividade de grãos e nutrientes exportados em plantas de arroz tratadas com thidiazuron em 2015/2016 e 2017/2017

Variável	TDZ	TDZ*Safra
Produtividade	<0,0001	0,0005
N	0,0075	0,1099
P	0,0124	0,0622
K	0,0003	0,5429
Ca	0,6562	0,3297
Mg	0,0370	0,2540
S	<0,0001	0,0036
Cu	0,0236	0,6506
Zn	0,0123	0,0615
Mn	0,1251	0,0704
Fe	0,0040	0,0062

A produtividade de grãos em 2015/2016 foi superior à 2016/2017 para todas as doses aplicadas (Figura 4a). A média geral de produtividade na primeira safra foi de 8080 kg ha⁻¹ em comparação com 3199 kg ha⁻¹ em 2016/2017, redução de 60%. Os resultados de produtividade em 2015/2016 ajustaram-se à equação linear, com incrementos de até 2162 kg ha⁻¹ na maior dose. Na segunda safra, apesar da baixa produtividade, as doses também promoveram aumentos, porém até a dose estimada de 1,52 g ha⁻¹, cerca de 384 kg ha⁻¹ a mais de grãos.

A exportação de macronutrientes (Figura 4b) e micronutrientes (Figura 4c) pelo grão foi crescente em função do aumento das doses de TDZ. Os nutrientes com maior quantidade exportada foram N>K>P>Mg>S para os macro e Fe>Zn>Cu para os micronutrientes. Considerando os nutrientes com maior aumento em consequência das doses tem-se Fe, S, Cu, P, Zn, Mg, K e N, com 35,5, 25,9, 23,4, 21,0, 19,1, 17,7, 17,2 e 17,1%, respectivamente.

Figura 4 – Produtividade de grãos (a), quantidade de macronutrientes (b) e micronutrientes (c) exportados em grãos de plantas de arroz tratadas com thidiazuron em 2015/2016 e 2016/2017



2.4 DISCUSSÃO

A diferença de absorção de nutrientes entre as safras foi principalmente devido a disparidade climática. Mesmo os 878 mm de chuva observado na segunda safra serem considerados suficiente para a produção do arroz de terras altas (BOUMAN et al., 2007; XUE et al., 2008), as precipitações aconteceram de forma desuniforme ao longo do ciclo, e, mesmo com o fornecimento de água por meio da irrigação por aspersão, não foi possível evitar as reduções na produtividade.

Apesar do ajuste quadrático para os teores de N no colmo durante o ponto de colheita (Figura 2), é possível inferir que o aumento das doses de TDZ reduzam os teores desse nutriente no órgão e fase em questão. Porém, essa redução pode estar relacionada à maior exportação de nutrientes para o grão. Cliquet et al. (1990) demonstraram que grande parte do N armazenado nos colmos é remobilizado para formação e enchimento de grãos. Crusciol et al. (2016) também relatam diminuição de nutrientes moveis no colmo em resultado da exportação para a panícula. Logo, é possível que a citocinina intensifique esse processo, uma vez que, além da redução dos teores de N no colmo, as doses de thidiazuron promoveram incrementos de produtividade.

Ainda em relação ao potencial de remobilização de nutrientes e fotoassimilados da citocinina, a literatura demonstra que este hormônio é responsável pela ativação de invertases extracelulares e transportadores de hexoses (ROITSCH; EHNEß, 2000; WERNER et al., 2008), possivelmente, isso estimulou a exportação de compostos contendo N do colmo para o grão.

Em adição a isso, estudos mostram interação positiva entre citocinina e a absorção de N, pois, plantas mutantes com rupturas na rota de produção de citocinina apresentam deficiência na absorção de N (PATTERSON et al., 2016; PAVLŮ et al., 2018). Sendo assim, o aumento das doses de citocinina e reduções nos teores no colmo reforça a ideia de que o N foi redistribuído, não havendo uma possível indução de deficiência.

Levando em conta que os teores de K na folha foram positivamente influenciados pelas doses de citocinina em quase todas as fases, é importante associar o papel que esse nutriente exerce nas relações fonte/dreno da planta. Esse nutriente cria um potencial eletro-osmótico que gera efluxo de fotoassimilados do

mesofilo para o apoplasto, o carregamento no floema, transporte no floema e por fim absorção nas células dreno (CONTI; GEIGER, 1982; VREUGDENHIL, 1985; TAIZ; ZEIGER, 2017). Esse fato é reforçado ainda pelos incrementos dos teores na panícula observados no ponto de colheita, o que pode ter ajudado no enchimento de grãos.

Os efeitos das doses de citocinina nos teores de K foram mais acentuados em 2016/2017. Naquela safra a temperatura média foi 2,5°C maior e teve 507 mm a menos de chuva. Além de atuar como ativador de inúmeras enzimas no metabolismo das plantas (MARSCHNER, 2011), o K também desempenha papel fundamental no controle estomatal, conferindo à planta maior tolerância ao estresse hídrico e térmico (ANDRES et al., 2014; TAIZ; ZEIGER, 2017).

Existem poucos estudos mostrando a influência direta da citocinina no fechamento de estômatos em condições de seca (FARBER et al., 2016), sendo essa função exercida pelo ácido abscísico (ABA) (ZHU, 2002). Porém, considerando que a citocinina aumentou os teores de K na folha, e que esse nutriente tem ação direta na abertura e fechamento dos estômatos, pode-se dizer que a citocinina atuou indiretamente na tolerância ao estresse abiótico em 2016/2017.

No emborrachamento em 2016/2017, o teor foliar de K diminuiu em função das doses de TDZ, ao contrário de todas as outras fases (Figura 3b). Nam et al. (2012) relatam que plantas deficientes em citocinina tendem a expressar em maior quantidade o gene HAK5, responsável pela codificação de transportadores de K em raízes. Desse ponto de vista, faz sentido a redução nos teores de K, devido ao aumento da quantidade de citocinina fornecida à planta. Porém, isso não se repetiu nas demais fases e órgãos. Possivelmente, o veranico ocorrido em 2016/2017, que se iniciou pouco antes da fase de emborrachamento, deve ter gerado desequilíbrio no metabolismo da planta ocasionando tais resultados.

A produtividade de grãos foi positivamente influenciada pelo uso de TDZ, corroborando com os resultados de Alves et al. (2015), que também fizeram aplicações de doses de TDZ na fase de perfilhamento em cultivares de arroz de terras altas. O efeito positivo da citocinina na produtividade de arroz também é relatado por Ashikari et al. (2005), Javid et al. (2011) e Zulkarnain et al. (2013).

A citocinina é um hormônio vegetal que atua na divisão celular, senescência foliar, dominância apical, relações fonte/dreno, absorção de nutrientes e respostas a fatores biótico e abióticos (KIEBER; SCHALLER, 2014; SCHALLER et al., 2014; TAIZ; ZEIGER, 2017). Tendo em vista a gama de funções exercida por esse hormônio é

justificável os incrementos de produtividade, não só apenas pelo aumento dos teores de K e N.

No que se diz respeito ao acúmulo de nutrientes no grão, não existem trabalhos mostrando a atuação da citocinina nesta característica em cereais. É possível encontrar relatos da influencia da citocinina na expressão de genes que codificam proteínas responsáveis pela absorção radicular de N (RUFFEL et al., 2011; RUFFEL et al., 2016), P (WANG et al., 2006; SHEN et al., 2014), K (NAM et al., 2012) e Fe (SÉGUÉLA et al., 2008), porém, sem resultados do acúmulo na parte área.

O aumento na exportação de nutrientes pelo grão em função das doses de TDZ se deu pelo fato de como essa variável foi calculada (teor nos grãos x kg ha⁻¹ de grãos). A citocinina não necessariamente aumentou o teor de nutrientes no grão. Crusciol et al. (2016) relatam que cultivares de alta produtividade não tem maior demanda por nutrientes por cada tonelada de grão produzido. Neste caso, o aumento da exportação de nutrientes está ligado à capacidade do cultivar em acumular matéria seca nos órgãos reprodutivos, corroborando com Alvarez et al. (2012).

Sendo assim, em consonância com Crusciol et al. (2007), acréscimos em produtividade geram grandes quantidade de nutrientes removidos, sendo necessário levar esse fato em consideração para o planejamento da adubação da cultura.

2.5 CONCLUSÃO

O uso de thidiazuron aumenta os teores de K na folha do arroz, em consequência, as plantas se beneficiam da função desse nutriente. Isso confere tolerância ao estresse hídrico e térmico, promovendo incrementos na produtividade de grãos, mesmo em anos com condições climáticas adversas. Assim como o K, a produtividade de grãos responde positivamente ao uso de TDZ, resultando em ganhos significativos. A exportação de nutrientes pelo grão também aumenta, em consequência do acúmulo de matéria seca nos órgãos reprodutivos.

REFERÊNCIAS

AGRO NORTE, P. E. S. L. **Produtos, Arroz, ANa 8001**. Disponível em: <http://www.agronorte.com.br/br/VerProduto/1/48-ANa_8001>. Acesso em: 7 out. 2015.

ALVAREZ, R. de C. F.; CRUSCIOL, C. A. C.; NASCENTE, A. S. Análise de crescimento e produtividade de cultivares de arroz de terras altas dos tipos tradicional, intermediário e moderno. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 42, n. 4, p. 397–406, 2012.

ALVES, C. et al. Thidiazuron aumenta a produtividade em arroz de terras altas. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 45, n. 3, p. 333–339, 2015.

ANDRES, Z. et al. Control of vacuolar dynamics and regulation of stomatal aperture by tonoplast potassium uptake. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 111, n. 17, p. 1806–1814, 2014.

ARF, O. et al. Resposta de cultivares de arroz de sequeiro ao preparo do solo e à irrigação por aspersão. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 36, n. 6, p. 871–879, 2001.

ARF, O. et al. Preparo do solo, irrigação por aspersão e rendimento de engenho do arroz de terras altas. **Scientia Agricola**, v. 59, n. 2, p. 321–326, 2002.

ASHIKARI, M. Cytokinin Oxidase Regulates Rice Grain Production. **Science**, v. 309, n. 5735, p. 741–745, 2005.

BOUMAN, B. A. .; TUONG, T. Field water management to save water and increase its productivity in irrigated lowland rice. **Agricultural Water Management**, v. 49, n. 1, p. 11–30, 2001.

BOUMAN, B. A. M. et al. Yield and water use of irrigated tropical aerobic rice systems. **Agricultural Water Management**, v. 74, n. 2, p. 87–105, 2005.

BOUMAN, B. A. M. et al. Rice and Water. **Advances in Agronomy**, v. 92, p. 187–237, 2007.

CLIQUET, J. B.; DELÉENS, E.; MARIOTTI, A. C and N Mobilization from Stalk and Leaves during Kernel Filling by C and N Tracing in Zea mays L. **Plant physiology**, v. 94, n. 4, p. 1547–53, 1990.

CONTI, T. R.; GEIGER, D. R. Potassium Nutrition and Translocation in Sugar Beet. **Plant Physiology**, v. 70, n. 1, p. 168–172, 1982.

CORTLEVEN, A.; VALCKE, R. Evaluation of the photosynthetic activity in transgenic tobacco plants with altered endogenous cytokinin content: lessons from cytokinin. **Physiologia Plantarum**, v. 144, n. 4, p. 394–408, 2012.

CRUSCIOL, C. A. C. et al. Macronutrient Uptake and Removal by Upland Rice Cultivars with Different Plant Architecture. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 40, 2016.

CRUSCIOL, C. A. C.; SORATTO, R. P.; ARF, O. Produtividade de grãos e exportação de nutrientes de cultivares de arroz irrigadas por aspersão em consequência da época de semeadura. **Bragantia**, v. 66, n. 2, p. 247–257, 2007.

FARBER, M.; ATTIA, Z.; WEISS, D. Cytokinin activity increases stomatal density and

transpiration rate in tomato. **Journal of Experimental Botany**, v. 67, n. 22, p. 6351–6362, 2016.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 35, n. 6, p. 1039–1042, 2011.

FORNASIERI FILHO, D.; FORNASIERI, J. L. **Manual da cultura do arroz**. Jaboticabal: Funep, 2006. 589 p.

GHORBANI JAVID, M. et al. Effects of the exogenous application of auxin and cytokinin on carbohydrate accumulation in grains of rice under salt stress. **Plant Growth Regulation**, v. 65, n. 2, p. 305–313, 2011.

GUIMARÃES, C. M. et al. Drought tolerance in upland rice: identification of genotypes and agronomic characteristics. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 38, n. 2, p. 201–206, 2016.

GUO, B. et al. Thidiazuron: A multi-dimensional plant growth regulator. **African Journal of Biotechnology**, v. 10, n. 45, p. 8984–9000, 2011.

KHUSH, G. S. What it will take to Feed 5.0 Billion Rice consumers in 2030. **Plant Molecular Biology**, v. 59, n. 1, p. 1–6, 2005.

KIEBER, J. J.; SCHALLER, G. E. Cytokinins. **The Arabidopsis Book**, v. 12, p. e0168, 2014.

LAZOVA, G.; YONOVA, P. Photosynthetic Parameters Were Modified in Wheat (*Triticum aestivum* L.) Flag Leaves by Two Phenylurea Cytokinins. **International Journal of Plant Sciences**, v. 171, n. 8, p. 809–817, 2010.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, A. S. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. **Potafós**, n. 2, p. 319, 1997.

MARSCHNER, P. **Marschner's mineral nutrition of higher plants**. London: Academic Press inc, 2011, 674 p.

MONAKHOVA, O. F.; CHERNYAD'EV, I. I. A protector effect of cytokinin preparations on the photosynthetic apparatus of wheat plants under water deficiency conditions. **Applied Biochemistry and Microbiology**, v. 43, n. 6, p. 641–649, 2007.

NAM, Y.-J. et al. Regulatory Roles of Cytokinins and Cytokinin Signaling in Response to Potassium Deficiency in Arabidopsis. **Plos One**, v. 7, n. 10, p. 1–9, 2012.

PATTERSON, K. et al. Nitrate-Regulated Glutaredoxins Control Arabidopsis Primary Root Growth. **Plant Physiology**, v. 170, n. 2, p. 989–999, 2016.

PAVLŮ, J. et al. Cytokinin at the Crossroads of Abiotic Stress Signalling Pathways. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 19, n. 8, p. 2450, 2018.

- PINHEIRO, B. D. S.; CASTRO, E. da M. de; GUIMARÃES, C. M. Sustainability and profitability of aerobic rice production in Brazil. **Field Crops Research**, v. 97, n. 1, p. 34–42, 2006.
- PRASAD, R. Aerobic Rice Systems. **Advances in Agronomy**, v. 111, p. 207–247, 2011.
- RAIJ, B. van et al. Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. **Campinas: Instituto Agrônômico**, n. 19, 2001. p. 285
- ROITSCH, T.; EHNESS, R. Regulation of source/sink relations by cytokinins. **Plant Growth Regulation**, v. 32, n. 2, p. 359–367, 2000.
- RUFFEL, S. et al. Nitrogen economics of root foraging: Transitive closure of the nitrate-cytokinin relay and distinct systemic signaling for N supply vs. demand. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 108, n. 45, p. 18524–18529, 2011.
- RUFFEL, S. et al. Long-distance nitrate signaling displays cytokinin dependent and independent branches. **Journal of Integrative Plant Biology**, v. 58, n. 3, p. 226–229, 2016.
- SANTOS, A. B.; STONE, L. F.; VIEIRA, N. R. A. **The rice crop in Brazil**. 2. ed. Santo Antônio de Goiás, GO, Brazil: Embrapa Arroz e Feijão, 2006. 1000 p.
- SANTOS, H. G. dos; et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 938 p.
- SCHALLER, G. E.; STREET, I. H.; KIEBER, J. J. Cytokinin and the cell cycle. **Current Opinion in Plant Biology**, v. 21, p. 7–15, 2014.
- SGULA, M. et al. Cytokinins negatively regulate the root iron uptake machinery in Arabidopsis through a growth-dependent pathway. **The Plant Journal**, v. 55, n. 2, p. 289–300, 2008.
- SHEN, C. et al. OsARF16 Is Involved in Cytokinin-Mediated Inhibition of Phosphate Transport and Phosphate Signaling in Rice (*Oryza sativa* L.). **Plos One**, v. 9, n. 11, p. e112906, 2014.
- SILVA, A. S. et al. Irrigação de salvação em culturas de subsistência. In: BRITO, L.T. de L.; MOURA, M.S.B. de; GAMA, G.F.B. (Ed.). **Potencialidades da água de chuva no Semiárido brasileiro**. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2007. cap. 8, p.159-179.
- SONG, W. et al. Increased photosynthetic capacity in response to nitrate is correlated with enhanced cytokinin levels in rice cultivar with high responsiveness to nitrogen nutrients. **Plant and Soil**, v. 373, n. 1–2, p. 981–993, 2013.
- STONE, L. F. et al. Adubação nitrogenada em arroz sob irrigação suplementar por aspersão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 34, n. 6, p. 927–932, 1999.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 858 p.

VREUGDENHIL, D. Source-to-sink gradient of potassium in the phloem. **Planta**, v. 163, n. 2, p. 238–240, 1985.

WANG, X. et al. Cytokinin represses phosphate-starvation response through increasing of intracellular phosphate level. **Plant, Cell and Environment**, v. 29, n. 10, p. 1924–1935, 2006.

WERNER, T. et al. Cytokinin deficiency causes distinct changes of sink and source parameters in tobacco shoots and roots. **Journal of Experimental Botany**, v. 59, n. 10, p. 2659–2672, 2008.

XUE, C. et al. Optimizing yield, water requirements, and water productivity of aerobic rice for the North China Plain. **Irrigation Science**, v. 26, n. 6, p. 459–474, 2008.

ZHU, J.-K. Salt and drought stress signal transduction in plants. **Annual Review of Plant Biology**, v. 53, n. 1, p. 247–273, 2002.

ZULKARNAIN, W. M. et al. Growth and yield response to water availability at different growth stages of rice. **Journal of Food, Agriculture and Environment**, v. 1111, n. 22, p. 540–544, 2013.

CAPÍTULO 3 – APLICAÇÃO FOLIAR DE THIDIAZURON PODE ALTERAR O CRESCIMENTO DO ARROZ DE TERRAS ALTAS?

Resumo

O cultivo de arroz no ecossistema de terras altas vem ganhando importância no cenário agrícola mundial devido a necessidade de um sistema de produção sustentável e com baixo consumo de água. Devido a sua baixa produtividade comparada com o arroz irrigado, técnicas que aumentem a produtividade do arroz de terras altas vêm sendo desenvolvidas. Recentemente, foi postulado que o uso de TDZ promove incrementos significativos na produtividade do arroz de terras altas. Objetivou-se com esse trabalho identificar, por meio de análise de crescimento, o efeito da citocinina no do arroz de terras altas, avaliando o acúmulo de matéria seca (MS) na parte aérea e a resposta em produtividade de grãos. O experimento foi conduzido durante duas safras (2015/2016 e 2016/2017) em condições de terras altas, irrigado por aspersão. O delineamento experimental foi o de blocos casualizados com seis repetições, os tratamentos constituíram-se de dose de TDZ (0, 0,8, 1,6 e 2,4 g ha⁻¹), aplicadas no perfilhamento da cultura. Foi avaliado o acúmulo de MS nas folhas, colmo e panícula nas fases de perfilhamento, diferenciação floral, emborrachamento, florescimento, grão leitoso e ponto de colheita. Foi estimado o índice de área foliar (IAF), taxa de crescimento da cultura (TCC), taxa de crescimento relativo (TCR), taxa assimilatória líquida (TAL), área foliar específica (AFE) e a produtividade de grãos. Na primeira safra, houve maior acúmulo de MS devido às condições climáticas favoráveis comparadas à segunda safra. As doses de thidiazuron influenciaram positivamente o IAF, TCC, TCR e TAL, mais notadamente no primeiro ano. A produtividade de grãos, em 2015/2016, apresentou ajuste linear positivo em função das doses, atingindo 8994 kg ha⁻¹ com a dose de 2,4 g ha⁻¹, enquanto em 2016/2017 a maior produtividade, 3560 kg ha⁻¹, foi obtida com a dose de 1,95 g ha⁻¹. A citocinina promove aumento no acúmulo de MS nas folhas e colmo da planta, que é eficientemente redirecionada para a panícula na fase reprodutiva, resultando em ganhos de produtividade.

3.1 INTRODUÇÃO

O arroz cultivado no ecossistema irrigado ocupa cerca de 82% da área cultivada com arroz no mundo (Saito et al., 2018). No entanto, a crescente demanda de água para uso em indústria e centros urbanos tem limitado esse sistema de produção. Por outro lado, o arroz cultivado no ecossistema de terras altas vem ganhando espaço, devido ao menor consumo de água (FORNASIERI FILHO; FORNASIERI, 2006; BOUMAN et al., 2007) e possibilidade de explorar áreas de baixa fertilidade (PINHEIRO et al., 2006).

No Brasil, o arroz de terras altas teve grande importância como cultura pioneira usada na exploração de novas áreas na região do Cerrado (PINHEIRO et al., 2006). Inicialmente, as produtividades eram baixas devido ao cultivo em solos de baixa fertilidade e distribuição desuniforme de chuvas durante o ciclo da cultura (ARF et al., 2001; CRUSCIOL et al., 2013). Graças ao melhoramento genético e fornecimento de água com irrigação por aspersão, foi possível estabelecer um nível de produtividade que garante confiabilidade e competitividade para esse sistema de produção (STONE et al., 1999; ARF et al., 2000; CRUSCIOL et al., 2005; PERES et al., 2018).

Recentemente, um estudo mostrou que o uso de TDZ na cultura do arroz de terras altas irrigado por aspersão, tem o potencial de aumentar a produtividade de grãos (ALVES et al., 2015), fazendo dessa uma técnica eficiente na busca de aumentos na produtividade do arroz de terras altas. O TDZ é uma feniluréia (N-fenil-N'-1,2,3-tiadiazol-5-ilurea), classificado como um tipo de citocinina que induz diversas respostas na planta, similares às respostas induzidas por citocininas naturais (GUO et al., 2011).

A citocinina é um dos principais hormônios das plantas. Dentre suas funções destacam-se a divisão celular (TAIZ; ZEIGER, 2017), expansão foliar, assimilação de CO₂, condutância estomática (MONAKHOVA; CHERNYAD'EV, 2007; LAZOVA; YONOVA, 2010), eficiência da enzima rubisco (TALLA et al., 2016), e desenvolvimento de cloroplastos funcionais (CORTLEVEN; SCHMÜLLING, 2015). No geral, a citocinina promove incrementos na capacidade fotossintética (SONG et al., 2013). A citocinina também regula a mobilização de nutrientes e fotoassimilados (KIEBER; SCHALLER, 2014; TAIZ; ZEIGER, 2017), e está relacionada com respostas aos estresses bióticos e abióticos (PAVLŮ et al., 2018).

Estudos mostram que a citocinina pode favorecer o perfilhamento, enchimento de grãos e produtividade de arroz (YANG et al., 2001; JAVID et al., 2011; LIU et al., 2011). No entanto, pouco se sabe sobre a relação desse hormônio nos aspectos de crescimento de plantas de arroz, sendo necessários estudos que elucidem melhor a influência da citocinina nesses aspectos.

Baseado nas funções que a citocinina exerce na planta, admite-se a hipótese de que, por melhorar os aspectos relacionados à fotossíntese, a citocinina, aumenta o acúmulo de MS na planta, que é melhor redistribuída para as estruturas reprodutivas, resultando em maior produtividade de grãos. Sendo assim, este trabalho foi realizado objetivando verificar se a aplicação de citocinina influencia o acúmulo de MS em plantas de arroz, por conseguinte, nas variáveis de crescimento, e se esses aumentos refletem na produtividade de grãos.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado em área pertencente à Faculdade de Ciências Agronômicas – Unesp, Campus de Botucatu – SP (48°26'W, 22°51'S e altitude de 740 m), durante duas safras (2015/2016 e 2016/2017) em condições de terras altas com irrigação por aspersão. O clima da região é do tipo Cwa, caracterizado como tropical de altitude, com inverno seco e verão quente e chuvoso, conforme a classificação de Köppen. Os dados climáticos referentes ao período em que o experimento foi conduzido estão apresentados na Figura 1.

O solo da área experimental é do tipo NITOSSOLO VERMELHO distroférico (SANTOS et al., 2018). Seus atributos químicos foram determinados na camada 0,0-0,20 m antes da instalação do experimento nas duas safras, segundo metodologia proposta por Raij et al. (2001) (Tabela 1).

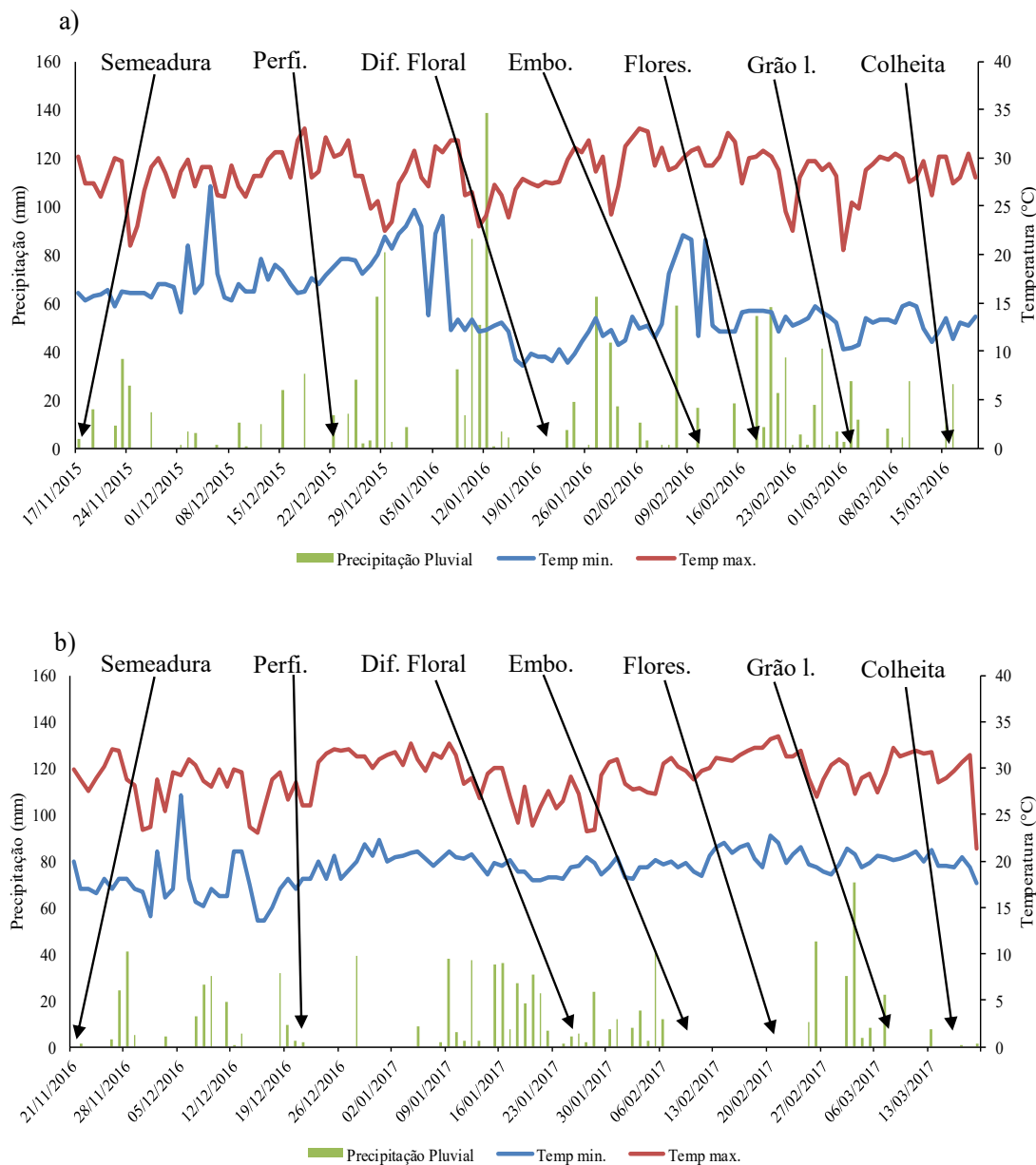
Tabela 1 - Caracterização dos atributos químicos do solo da área experimental referente as safras de 2015/2016 e 2016/2017

Safr	pH _(CaCl₂)	MO	P _(Resina)	S	Al ⁺³	H+Al ⁺³	K	Ca	Mg	SB	CTC	V%
		g dm ⁻³	mg dm ⁻³				mmol _c dm ⁻³					
2015/2016	5,2	20	45	13	1	33	3,4	29	12	44	77	57
2015/2017	5,1	24	44	14	2	35	3,3	26	10	39	74	52

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos ao acaso com seis repetições. Os tratamentos foram constituídos por doses (0, 0,8, 1,6 e 2,4 g ha⁻¹) de thidiazuron, aplicadas durante a fase de perfilhamento da cultura. As doses adotadas nesse experimento foram definidas tendo como base no trabalho de Alves et al. (2015), visando aumentar a quantidade aplicada e encontrar a dose máxima de resposta em produtividade.

O cultivar foi o ANa 8001, de seu porte e resistente ao acamamento, embora possa apresentar algum problema sob condições de excessivo desenvolvimento vegetativo. O potencial produtivo é de 8.000 kg ha⁻¹, sendo responsivo à novas tecnologias, dando suporte ao estabelecimento da agricultura moderna. Tem como características principais: ciclo curto (107 dias até a maturação completa), 80 dias da emergência ao florescimento, grãos tipo longo fino (agulhinha), moderadamente suscetível à brusone (*Pyricularia oryzae* Cav.) (AGRO NORTE, 2015).

Figura 1 - Dados diários de precipitação pluvial, temperatura máxima e mínima durante a condução do experimento em 2015/2016 (a) e 2016/2017 (b)



As parcelas experimentais continham oito fileiras de plantas, com 7,0 m de comprimento, espaçadas em 0,35 m. As seis fileiras centrais foram consideradas área útil, sendo que 0,50 m da extremidade de cada fileira de plantas e as duas fileiras externas foram consideradas bordadura e não foram avaliadas.

O experimento foi implantado em sistema de plantio direto. A semeadura aconteceu no dia 17 e 21 de novembro, nas safras 2015/2016 e 2016/2017, respectivamente, utilizando-se 200 sementes viáveis m^{-2} . A emergência das plântulas ocorreu aos seis dias após a semeadura. A adubação de semeadura consistiu da aplicação de 40 kg ha^{-1} de N (ureia), 61,6 kg ha^{-1} de P_2O_5 (superfosfato simples) e

35,2 kg ha⁻¹ de K₂O (cloreto de potássio) no sulco de semeadura, nas duas safras (RAIJ et al., 1996).

A irrigação do experimento foi realizada por sistema de aspersão convencional, composto por duas linhas laterais e aspersores com vazão de 1,07 m³ hora⁻¹. O momento da irrigação foi definido pelo método de irrigação de salvação, onde o fornecimento de água é realizado apenas quando as plantas apresentam sintomas de falta de água ao ponto de comprometer a produção ou quando a umidade do solo está em torno de 30-40% da capacidade de campo, sendo fornecido uma lâmina de 20 mm (SILVA et al., 2007).

O controle de plantas daninhas, insetos-praga e doenças foi realizado de acordo com as necessidades da cultura. Na adubação de cobertura foi aplicado 80 kg ha⁻¹ de N, na forma de sulfato de amônio, parcelada em duas vezes (40 kg ha⁻¹ e 40 kg ha⁻¹), respectivamente aos 15 (pré-perfilhamento) e 30 (perfilhamento pleno), nas duas safras.

As amostragens foram feitas em função dos estádios fenológicos da cultura, na primeira e segunda safra, durante o perfilhamento (30 e 25 DAE), diferenciação floral (59 e 60 DAE), emborrachamento (79 e 75 DAE), florescimento (86 e 87 DAE), grão leitoso (98 e 102 DAE) e ponto de colheita (112 e 110 DAE), respectivamente. Em cada parcela, foram coletadas as plantas contidas em 0,30 m de linha da área útil.

Nas plantas coletadas, foram contados os perfilhos (perfilhos amostra⁻¹), descartadas as raízes e separadas as folhas verdes e colmos. Em seguida, executou-se a leitura da área foliar do limbo (lâmina foliar), com o auxílio de medidor de área foliar modelo AAM-7, fabricado por Hayashi - Denkoh CO, mediante amostragem de 20 folhas, sendo mensurada a matéria seca das mesmas e, por comparação com a matéria seca total das folhas, foi encontrada a área foliar total. As partes da planta foram separadas em folha (apenas lâmina foliar), colmo (colmo + bainha) e panícula. A matéria seca de cada órgão foi determinada submetendo à secagem a 60°C, em estufa com circulação forçada de ar, até atingir massa constante.

3.2.1 Análise do crescimento

A partir dos resultados de massa de matéria seca dos órgãos amostrados em 0,3 m de linha, foi determinado o acúmulo de matéria seca por hectare nas folhas, colmo, panículas e planta inteira. Os dados de área foliar e matéria seca obtidos foram submetidos à análise de crescimento funcional no programa ANACRES, desenvolvido por Portes; Castro Jr (1991). Os parâmetros da análise de crescimento estimados foram: índice de área foliar (IAF) que é a relação entre a área foliar total e a área de solo sombreada pelas folhas, taxa de crescimento da cultura (TCC), área foliar específica (AFE), definido como a razão entre a área foliar e a massa das mesmas, taxa de crescimento relativo (TCR), sendo este a variação da massa seca em função da massa seca inicial num intervalo de tempo, e taxa assimilatória líquida (TAL) que expressa a massa seca produzida por unidade de área foliar por unidade de tempo.

3.2.2 Produtividade de grãos

Os grãos presentes nas panículas amostradas no ponto de colheita foram separados, pesados e a massa de cada amostra convertida em kg ha^{-1} , considerando 130 g kg^{-1} de água.

3.2.3 Análise estatística

Os resultados de produtividade foram submetidos à análise de variância a 5% de probabilidade, e quando significativo, foi realizado regressão para o fator doses de TDZ e teste de diferença mínima significativa de Fisher (LSD) a 5% de probabilidade para o fator safra. Todas as análises foram realizadas utilizando o programa estatístico SISVAR 5.3 (FERREIRA, 2011). O acúmulo de matéria seca na parte aérea foi ajustado utilizando a equação de Gauss de terceiro parâmetro com o auxílio do programa SigmaPlot 12.5.

3.3 RESULTADOS

As condições climáticas durante a condução do experimento em 2015/2016 foram mais favoráveis ao crescimento das plantas do que em 2016/2017 (Figura 1). Além de maior quantidade de chuvas, estas foram bem distribuídas ao longo do ciclo, juntamente com médias de temperaturas máximas e mínimas menores, com amplitude térmica de 13,4°C, comparado com 10°C em 2016/2017.

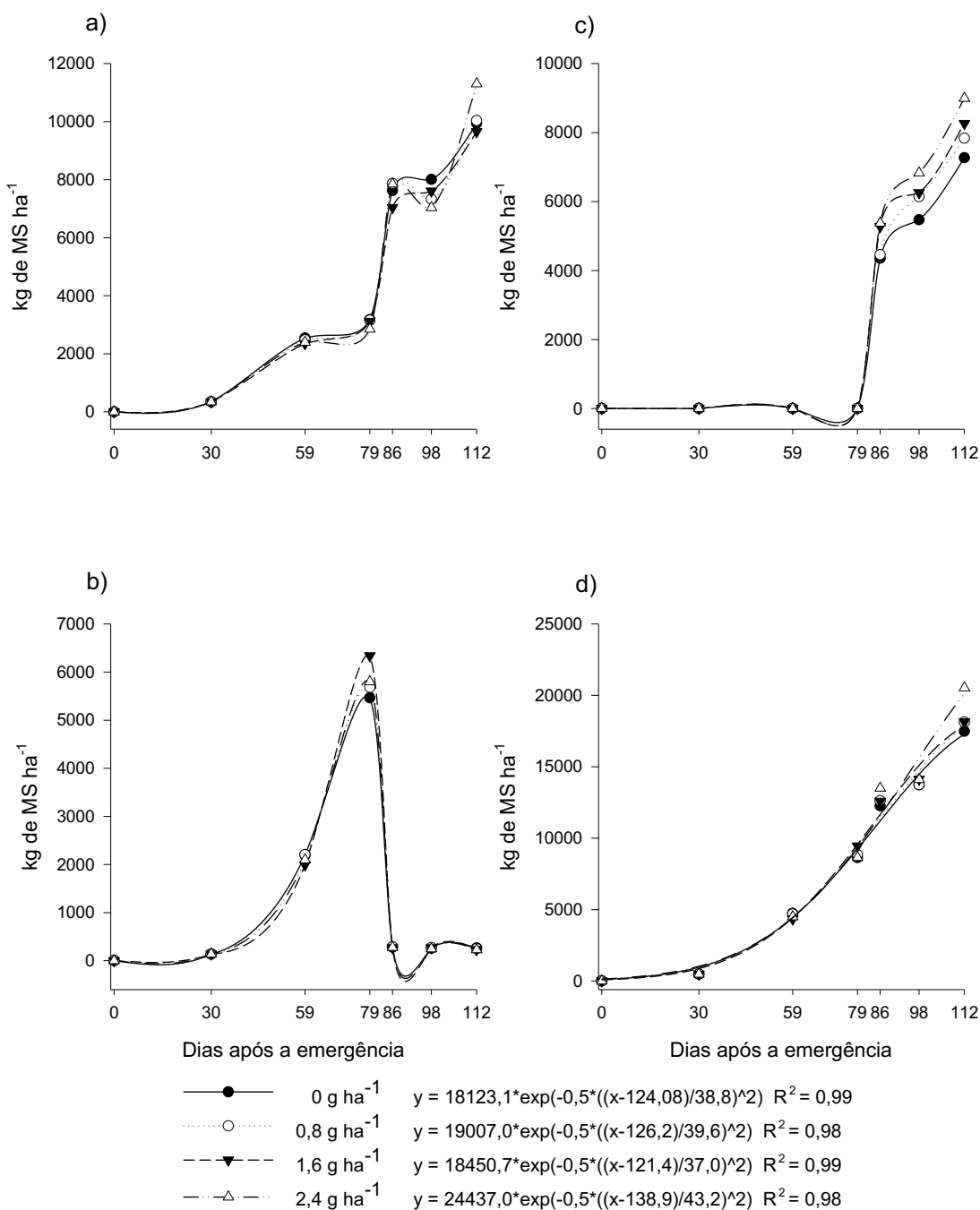
Em 2015/2016 o acúmulo de MS nas folhas não teve diferenças expressivas entre os tratamentos até o florescimento (Figura 2a). Na fase de grão leitoso, o controle apresentou o maior acúmulo, 8006 kg ha⁻¹ de MS, enquanto a média das doses de TDZ foi de 7323 kg ha⁻¹. Entretanto, 14 dias depois, o acúmulo de MS com as doses de TDZ foram superiores, sendo possível observar uma média de 10033 kg ha⁻¹ onde foi aplicado citocinina, comparado à 9941 kg ha⁻¹ no tratamento controle.

O pico de acúmulo de MS no colmo aconteceu na fase de emborrachamento (Figura 2b). Nesta fase observa-se superioridade das doses de TDZ, em média, 475 kg ha⁻¹ a mais que o controle. Na fase subsequentes, houve redução de cerca de 5540 kg ha⁻¹ de MS no colmo por causa da exerceção da panícula por ocasião do florescimento. Até o ponto de colheita os valores permaneceram por volta de 260 kg ha⁻¹, sem nenhuma superioridade clara entre os tratamentos.

A primeira avaliação da panícula mostrou valores de 4356, 4459, 5275 e 5373 kg ha⁻¹ de MS para o controle e as doses 0,8, 1,6 e 2,4 g ha⁻¹ de TDZ, respectivamente (Figura 2c). Até o ponto de colheita houve aumento exponencial da MS nas panículas, independente do tratamento, sendo as doses de citocinina responsáveis pelos maiores acúmulos, totalizando uma média de 8365 kg ha⁻¹ de MS comparado à 7270 kg ha⁻¹ da testemunha.

O ajuste da curva de acúmulo de MS na parte área, apresentado na Figura 2d, mostra que a maior taxa de crescimento aconteceu a partir da fase de emborrachamento, e, depois da fase de grão leitoso foi possível observar diferença entre os tratamentos, sendo os maiores resultados obtidos com as doses de TDZ até o final do ciclo da cultura.

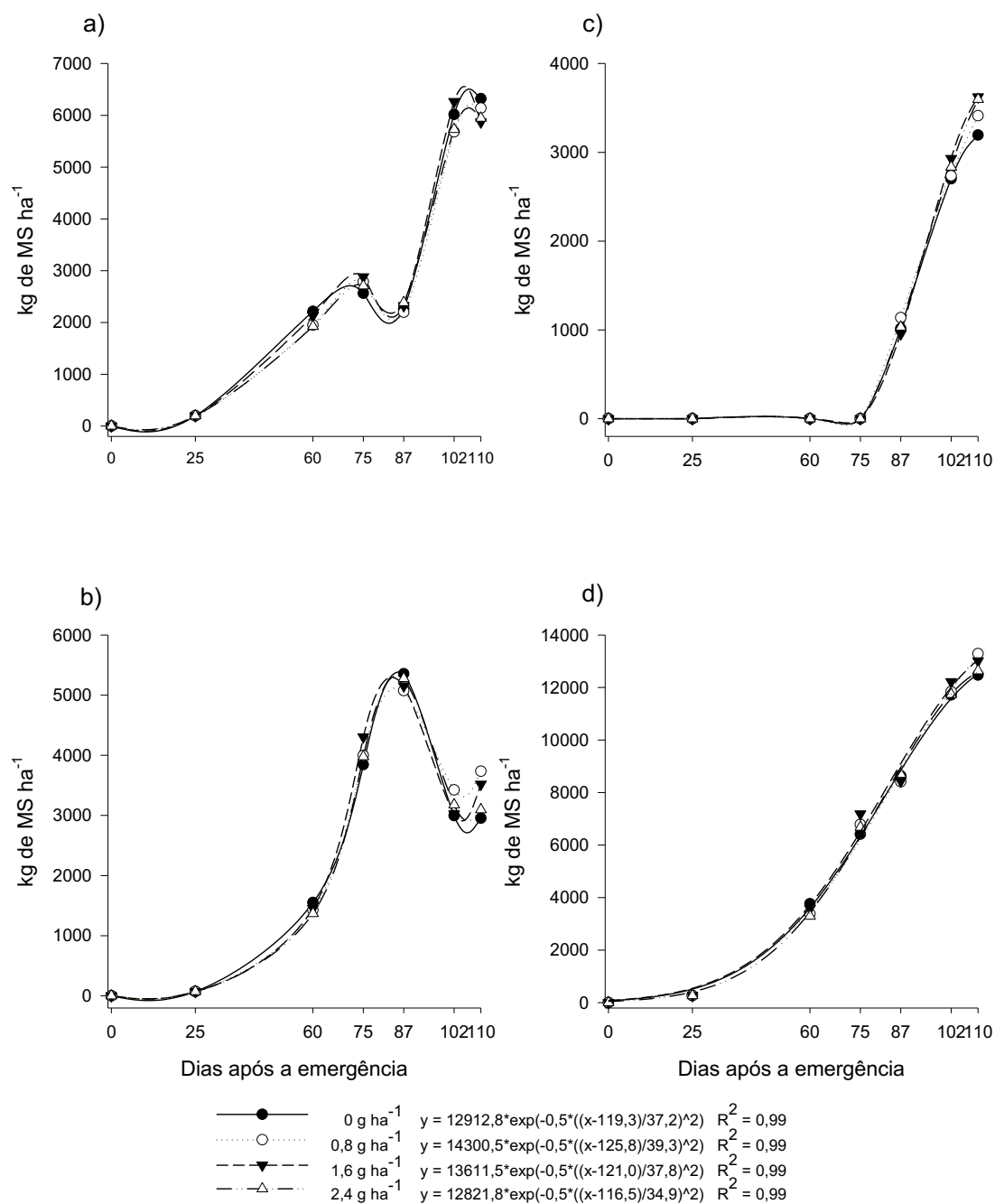
Figura 2 - Acúmulo de matéria seca (kg ha⁻¹) nas folhas (a), colmo (b), panículas (c) e parte aérea (d) de plantas de arroz tratadas com thidiazuron em 2015/2016



Em 2016/2017 o crescimento das plantas foi inferior. Tomando como base o acúmulo de MS nas folhas (Figura 3a), naquela safra houve redução de cerca de 40% em relação à 2015/2016. Até na fase de diferenciação floral não foi possível constatar qual dose destacou-se. No emborrachamento, o acúmulo de MS nas folhas com as doses de TDZ foi 8% maior que o controle. Aos 87 dias (florescimento) observou-se redução de 443 kg ha⁻¹ de MS nas folhas, cerca de 16%. Nas próximas fases, as

plantas voltaram a acumular MS nas folhas, atingindo o final do ciclo com 6320, 6139, 5870, 5945 kg ha⁻¹ para as doses 0, 0,8, 1,6 e 2,4 g ha⁻¹ de TDZ, respectivamente.

Figura 3 - Acúmulo de matéria seca (kg ha⁻¹) nas folhas (a), colmo (b), panículas (c) e parte aérea (d) de plantas de arroz tratadas com thidiazuron em 2016/2017



O acúmulo de MS no colmo acompanhou a tendência do que aconteceu com as folhas até a fase de emborrachamento, onde, aos 60 dias, o controle foi maior do

que os tratamentos com citocinina, e aos 75 dias houve inversão, com as doses de TDZ sendo responsáveis pelos maiores resultados (Figura 3b). Diferente do que aconteceu em 2015/2016, o pico de acúmulo de MS no colmo se deu no florescimento, com média de 5214 kg ha^{-1} . A exerceção da panícula em 2016/2017 não foi completa, e além disso, não houve diminuição na MS do colmo na mesma proporção observada em 2016. A redução de MS do pico no acúmulo até o ponto de colheita foi de 36%, enquanto em 2015/2016 a redução foi de 95%. Ao contrário de 2015/2016, no final do ciclo as doses de citocinina promoveram resultados de MS do colmo superiores ao controle, mostrando menor exportação de fotoassimilados desse órgão para as estruturas reprodutivas.

Em 2016/2017, a primeira avaliação das panículas (florescimento) apresentou valores 78% menores do que a mesma fase em 2015/2016 (Figura 3c). Os incrementos foram crescentes do florescimento ao ponto de colheita para todas as doses. No ponto de colheita, a MS das panículas mostrou-se maior nos tratamentos com TDZ, com 3194, 3412, 3624 e 3597 kg ha^{-1} para o controle e doses 0,8, 1,6 e 2,4 g ha^{-1} de TDZ, respectivamente.

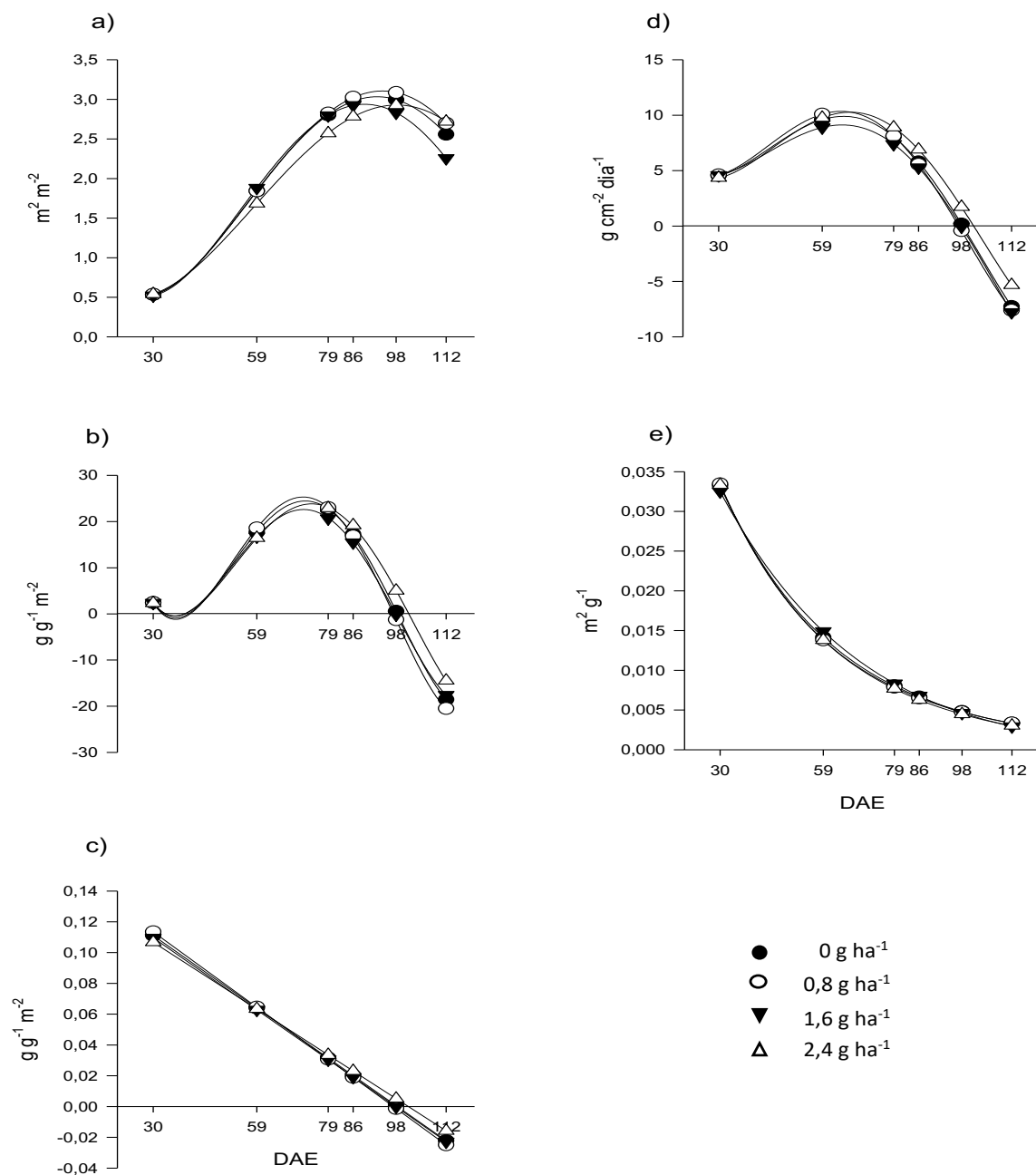
O ajuste da curva de acúmulo de MS na parte aérea não apresentou diferenças consideráveis entre as doses até a fase de grão leitoso (Figura 3d). A partir dessa fase, nota-se superioridade no tratamento com a dose de 1,6 g ha^{-1} de TDZ, que corresponde à dose com maior acúmulo de MS na panícula.

Na primeira safra, o pico de crescimento do IAF (Figura 6a) aconteceu na fase de grão leitoso, com a dose 0,8 g ha^{-1} promovendo os maiores resultados, cerca de $3,08 \text{ m}^2$ de folha por m^2 de solo. Da fase de grão leitoso até o ponto de colheita, houve redução média dessa variável de aproximadamente 13,5%, sendo a maior redução observada com a dose 1,6 g ha^{-1} .

Os maiores valores para TCC foram observados na fase de emborrachamento da cultura (Figura 6b). A partir dessa fase, iniciou-se decréscimo nesta variável, saindo de uma média de 22,2 e atingindo $-18,5 \text{ g g}^{-1} \text{ m}^2$. Da fase de emborrachamento até a colheita, os maiores valores de TCC foram obtidos com o uso da dose 2,4 g ha^{-1} .

Referente à TCR das plantas, houve redução linear nos valores ao longo do ciclo da planta (Figura 5c). Semelhantemente ao TCC, a partir do emborrachamento, os maiores resultados foram obtidos com a dose 2,4 g ha^{-1} .

Figura 4 - Índice de área foliar ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$) (a), taxa de crescimento da cultura ($\text{g g}^{-1} \text{m}^{-2}$) (b), taxa de crescimento relativo ($\text{g g}^{-1} \text{m}^{-2}$) (c), taxa de assimilação líquida ($\text{g cm}^{-2} \text{dia}^{-1}$) (d) e área foliar específica ($\text{m}^2 \text{g}^{-1}$) (e) de plantas tratadas com thidiazuron em 2015/2016



Para a variável TAL, novamente, as diferenças aconteceram a partir do emborrachamento, também com a maior dose de TDZ resultando nos maiores valores, em média, 1,03, 1,34, 1,81 e 2,2 $\text{g cm}^{-2} \text{dia}^{-1}$ nas fases de emborrachamento, florescimento, grão leitoso e ponto de colheita, respectivamente (Figura 4d).

A variável AFE diminuiu ao longo do ciclo, sem tendência de diferenças entre as doses. Na primeira amostragem, a média foi de $0,023 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$, e no ponto de colheita $0,004 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ (Figura 4e), redução de $0,019 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$.

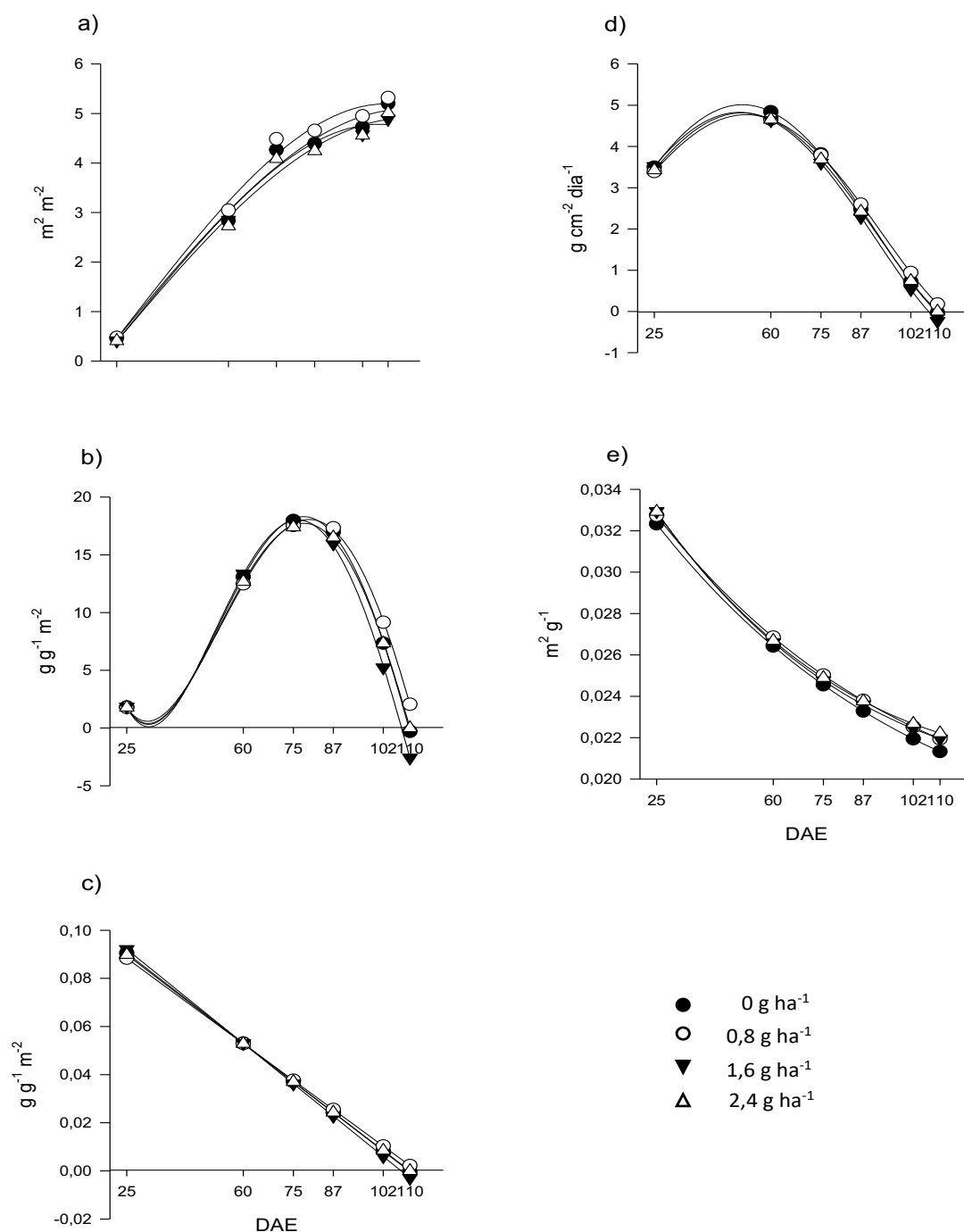
O IAF em 2016/2017 não apresentou redução nos valores no final do ciclo, diferentemente de 2015/2016 (Figura 5a). Além disso, os resultados no ponto de colheita foram nitidamente superiores aos da safra anterior, $5,2 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ em 2016/2017, comparado à $2,5 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ em 2015/2016. Quanto aos tratamentos, houve leve superioridade da testemunha nas duas últimas fases amostradas.

Assim como em 2015/2016, o pico de TCC foi obtido na amostragem realizada na fase de emborrachamento (Figura 5b), porém, com apenas $17,6 \text{ g g}^{-1} \text{ m}^{-2}$, 20% a menos que na primeira safra. No florescimento iniciou-se decréscimo no TCC, sendo o controle o tratamento com menores reduções dessa variável.

O valor do TCR no início do ciclo em 2016/2017 foi menor que em 2015/2016, com valores de $0,09 \text{ g g}^{-1} \text{ m}^{-2}$ (Figura 5c). O decréscimo linear até o ponto de colheita também aconteceu, atingindo $-0,027 \text{ g g}^{-1} \text{ m}^{-2}$. Em relação ao uso de citocinina, a dose $0,8 \text{ g ha}^{-1}$ foi a que teve menores reduções no TCR, como pode ser visto na Figura 5c, de 87 DAE até o ponto de colheita.

A variável TAL também apresentou valores gerais inferiores em 2016/2017. O valor máximo observado foi de $4,8 \text{ g cm}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ durante o emborrachamento no tratamento controle (Figura 5d), cerca de 50% menor que em 2015/2016. Do florescimento até o ponto de colheita houve superioridade da dose $0,8 \text{ g ha}^{-1}$ em relação às demais.

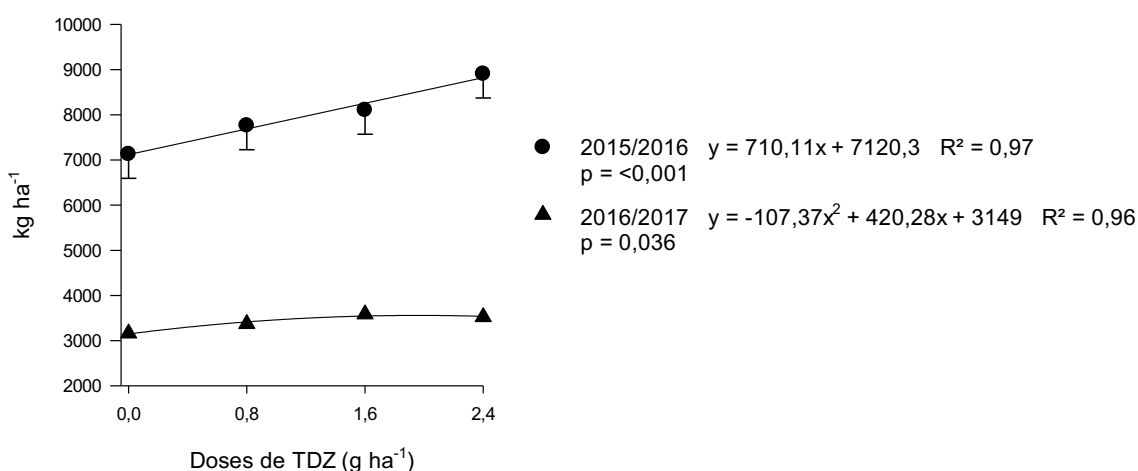
Figura 5 - Índice de área foliar ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$) (a), taxa de crescimento da cultura ($\text{g g}^{-1} \text{m}^{-2}$) (b), taxa de crescimento relativo ($\text{g g}^{-1} \text{m}^{-2}$) (c), taxa de assimilação líquida ($\text{g cm}^{-2} \text{dia}^{-1}$) (d) e área foliar específica ($\text{m}^2 \text{g}^{-1}$) (e) de plantas tratadas com thidiazuron em 2016/2017



Quanto à AFE, em todas as fases fenológicas avaliadas, o controle apresentou os menores resultados (Figura 5e). Dentre as doses de TDZ, a dose de 2,4 g ha^{-1} , foi superior as demais, notadamente a partir da fase de grão leitoso.

Assim como o crescimento, a produtividade de grãos foi fortemente influenciada pelas condições climáticas, resultado em grande diferença entre as duas safras. A safra 2015/2016, foi superior à 2016/2017, independente da dose de citocinina, com média de 7972 kg ha⁻¹ de grãos, cerca de 4559 kg a mais que 2016/2017. Analisando a resposta às doses, na primeira safra, os resultados de produtividade ajustaram-se à equação linear crescente, com diferença de 1779 kg ha⁻¹ entre o controle e a maior dose de TDZ aplicada. Na segunda safra, os dados de produtividade tiveram ajuste quadrático, com o ponto de máxima de 3560 kg, obtido com a dose estimada de 1,95 g ha⁻¹ (Figura 6).

Figura 6 - Desdobramento estatístico para produtividade de grãos em função de doses de thidiazuron em 2015/2016 e 2017/2017. A interação entre o fator doses de thidiazuron e safra foi significativo a 5% de probabilidade no teste F



3.4 DISCUSSÃO

Por definição, crescimento de planta é o aumento do volume e/ou massa da planta com ou sem formação de novas estruturas, como órgãos, tecidos, células ou organelas celulares (BRUKHIN; MOROZOVA, 2011), sendo esse processo influenciado principalmente por fatores genéticos e ambientais. Partindo desse ponto, a grande diferença no crescimento e produtividade, observada entre as duas safras, foi devido às diferenças climáticas entre 2015/2016 e 2016/2017, uma vez que o mesmo cultivar (ANa 8001) foi utilizado nas duas safras.

O arroz requer temperaturas entre 20°C e 30°C para adequado crescimento e desenvolvimento (YOSHIDA, 1981). Apesar das temperaturas em 2016/2017 estarem mais próximas do ideal, é possível que a baixa amplitude térmica ao longo do ciclo

tenha afetado o crescimento da planta. Além da menor amplitude, as temperaturas em 2016/2017 foram maiores. Pessarakli (2016) relata que exposição a temperaturas acima das condições ambientais normais resulta em modificação da estrutura e composição da membrana dos tilacoides, reduzindo a eficiência da fotossíntese e como consequência diminuindo o acúmulo de MS.

Considerando o acúmulo de MS total na planta, a curva que melhor se ajustou aos dados das duas safras foi a sigmoide (Figura 2d e 10d), corroborando com Santos; Costa (1997) e Alvarez et al. (2012). O acúmulo de MS é lento no início, se intensificando a partir do perfilhamento, onde observa-se aumento gradual em altura, desenvolvimento radicular e de folhas, alongamento dos colmos, formação e ramificação da panícula e espiguetas (FAGERIA et al., 2011).

A MS das folhas na safra 2015/2016, além de ser maior que em 2016/2017, não apresentou redução no final do ciclo. Apesar deste resultado diferir dos encontrados por Alvarez et al. (2012), que avaliaram o crescimento de cultivares de arroz do tipo moderno, intermediário e tradicional, é possível que em 2015/2016, o alto crescimento e produtividade das plantas, exigiu que as plantas mantivessem crescimento ativo das folhas até o final do ciclo para suprir a demanda de fotoassimilados nas panículas.

Em relação ao colmo, a MS desse órgão teve pico antes do florescimento, com redução em função da exerceção da panícula em ambas as safras. Em adição à isso, a panícula, por sua vez, é o principal dreno da planta, tendo como fonte as folhas, colmo e raízes da planta (YANG et al., 2006). Como em 2016/2017 a massa do colmo não teve redução na mesma proporção que em 2015/2016, é possível assumir que a planta não foi eficiente em exportar fotoassimilados do colmo para a panícula, ou até mesmo não produziu estruturas reprodutivas férteis suficientes para drenar a matéria seca do colmo. Considerando a baixa produtividade da segunda safra, é provável que a hipótese do menor número de drenos seja mais aceitável. Em consonância com isso, Alvarez et al. (2012) também relatam translocação de fotoassimilados do colmo, bainha e folhas para a formação da panícula.

Considerando que o acúmulo de MS no arroz acontece por meio da fixação do CO₂ em uma molécula de ácido 3-fosfoglicérico (3-PGA) pela atividade da enzima Rubisco (PESSARAKLI, 2016), é possível inferir que em 2015/2016 esse processo foi

mais eficiente do que em 2016/2017, e as doses de citocinina tiveram grande influência nesse aspecto, uma vez que os resultados de acúmulo de MS na parte aérea foram maiores quanto maior a dose de TDZ aplicada (Figura 2d). Estudos mostram efeitos diretos da citocinina na atividade da Rubisco (TALLA et al., 2016), bem como formação de cloroplastos, (CORTLEVEN; SCHMÜLLING, 2015), condutância estomática (LAZOVA; YONOVA, 2010) e aumento na capacidade fotossintética (SONG et al., 2013), reafirmando o efeito positivo do uso de TDZ no crescimento de plantas, observados nesse estudo.

O IAF corresponde à relação entre a área foliar total do dossel e a área de solo sombreada pelas folhas (BENINCASA, 2003). Este índice costuma ter redução no final do ciclo por causa do aumento do número de folhas senescentes (CAMPOS et al., 2008; ALVAREZ et al., 2012), semelhantemente ao observado em 2015/2016. No entanto, em 2016/2017 não houve redução do IAF no final do ciclo, além de valores muito superiores aos observados por Santos; Costa, (1997) e Alvarez et al. (2012), que avaliaram crescimento de cultivares de arroz de terras altas.

Os resultados de IAF em 2016/2017 igualam-se à resultados de cultivares de arroz irrigado (FALQUETO et al., 2009), porém, altos valores dessa variável nem sempre são desejados, uma vez que o excesso de folhas causa o auto sombreamento, tendo como consequência redução na fotossíntese (YOSHIDA, 1972).

A citocinina é considerada como o hormônio da juventude, responsável por manter a folha verde e evitar a senescência (KIEBER; SCHALLER, 2014; TAIZ; ZEIGER, 2017). Esta informação ajuda explicar os resultados de IAF em 2015/2016, onde os maiores valores de IAF no final do ciclo foram obtidos com a maior dose de TDZ, ou seja, houve menor senescência das folhas.

Segundo Rossetto; Nakagawa (2001), os valores máximo de TCC são obtidos no início do estágio reprodutivo, seguido de decréscimo com a maturação das plantas, em função da paralização do crescimento vegetativo, perda de folhas e senescência. Este comportamento foi observado nas duas safras, com picos durante a fase de florescimento. No entanto, em 2015/2016 a redução do TCC no final do ciclo foi superior à 2016/2017, provavelmente devido ao contínuo aumento de área foliar naquela safra. Como em 2015/2016 a dose 2,4 g ha⁻¹ foi responsável pelos maiores valores de IAF, isto também refletiu nos maiores valores de TCC na fase de maturação.

A TCR reflete o aumento da matéria seca da planta num intervalo de tempo em função do tamanho inicial, com tendência de diminuição da TCR ao longo do ciclo (FALQUETO et al., 2009), ou seja, a quantidade que uma planta jovem cresce é maior do que quando esta está no final do ciclo. A redução constante do TCR foi verificada nas duas safras, corroborando com os resultados de Falqueto et al. (2009) e Alvarez et al. (2012).

A variável TAL consiste na eficiência do sistema assimilador envolvido na produção de massa seca, estimando a fotossíntese líquida (SANTOS; COSTA, 1997; FALQUETO et al., 2009). O pico da TAL é esperado no início do ciclo devido à elevada capacidade das folhas jovens realizarem fotossíntese (ANTONIAZZI; DESCHAMPS, 2006). Nas duas safras, o pico da TAL aconteceu antes do florescimento, com redução até o final do ciclo. Essa redução aconteceu em função da senescência de folhas mais velhas e da planta como um todo, acompanhando o comportamento das variáveis TCC e TCR.

De acordo com Radford (1967), a AFE reflete o inverso da espessura da folha. Os valores maiores no início do ciclo, diminuindo até o ponto de colheita, observados nas duas safras, foram devido às folhas pouco espessas, com pouca MS e área foliar. Com o desenvolvimento da cultura, o aumento da área foliar e a MS das folhas, tem-se a tendência de redução dessa variável (BENINCASA, 2003).

A AFE ainda permite verificar se as plantas estão acumulando fotoassimilados em suas folhas ou se estes estão sendo translocados para outros órgãos (TAIZ; ZEIGER, 2009). Logo, quanto mais grossa a folha e mais MS acumulada, menor será o valor da AFE, considerando que na segunda safra os menores resultados foram obtidos com o tratamento controle e os maiores com a dose 2,4 g ha⁻¹ (Figura 5e), pode-se inferir que a citocinina promoveu maior translocação de fotoassimilados resultando em folhas mais finas e com menos MS.

Além dos fatores relacionados à fotossíntese que influenciam no crescimento, como atividade da Rubisco (TALLA et al., 2016), formação de cloroplastos, (CORTLEVEN; SCHMÜLLING, 2015), condutância estomática (LAZOVA; YONOVA, 2010), a citocinina também exerce papel nas interações com estresse abiótico (PAVLŮ et al., 2018), absorção de nutrientes (SÉGUÉLA et al., 2008; NAM et al., 2012; SHEN et al., 2014) e mobilização de fotoassimilados (TAIZ; ZEIGER, 2017), fatores

estes, que também podem ter influenciado positivamente na produtividade, além do crescimento da planta.

Em 2016, o aumento linear na produtividade em função das doses é condizente com os resultados de crescimento das plantas, uma vez que a dose de 2,4 g ha⁻¹ foi responsável pelos melhores resultados em diversas variáveis de crescimento. Já em 2017, nem sempre as doses de TDZ promoveram os melhores resultados, e como consequência, a maior dose não resultou na maior produtividade.

3.5 CONCLUSÃO

A aplicação de doses de thidiazuron influenciam positivamente o crescimento da planta de arroz, fazendo com que esta acumule mais matéria seca nas folhas e colmo, e exporte para a panícula no estágio reprodutivo, sendo corroborado pelas variáveis de crescimento analisadas. Em anos com condições climáticas ideais para o cultivo e produção do arroz, a resposta à citocinina é maior, tanto no crescimento como na produtividade de grãos. Sob condições severas de estresse, a planta cresce e produz menos, responde às doses de citocinina, porém em menor proporção e com limitação à maior dose usada neste trabalho.

REFERÊNCIAS

- AGRO NORTE, P. E. S. L. **Produtos, Arroz, ANa 8001**. Disponível em: <http://www.agronorte.com.br/br/VerProduto/1/48-ANa_8001>. Acesso em: 7 out. 2015.
- ALVAREZ, R. de C. F.; CRUSCIOL, C. A. C.; NASCENTE, A. S. Análise de crescimento e produtividade de cultivares de arroz de terras altas dos tipos tradicional, intermediário e moderno. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 42, n. 4, p. 397–406, 2012.
- ALVES, C. et al. Thidiazuron aumenta a produtividade em arroz de terras altas. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 45, n. 3, p. 333–339, 2015.
- ANTONIAZZI, N.; DESCHAMPS, C. Análise de crescimento de duas cultivares de cevada após tratamentos com elicitores e fungicidas. **Ciência Rural**, v. 36, n. 4, p. 1065–1071, 2006.
- ARF, O. et al. Influência da época de semeadura no comportamento de cultivares de arroz irrigado por aspersão em selvíria, MS. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 35, n. 10, p. 1967–1976, 2000.
- ARF, O. et al. Resposta de cultivares de arroz de sequeiro ao preparo do solo e à irrigação por aspersão. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 36, n. 6, p. 871–879,

2001.

BENINCASA, M. M. P. **Análise de Crescimento de Plantas (Noções Básicas)**. Jaboticabal: Funep, 2003. 41 p.

BOUMAN, B. A. M.; LAMPAYAN, M. R.; TUONG, T. P. **Water management in irrigated rice: coping with water scarcity**. Los Baños (Philippines): International Rice Research Institute, 2007. 54 p.

BRUKHIN, V.; MOROZOVA, N. Plant Growth and Development - Basic Knowledge and Current Views. **Mathematical Modelling of Natural Phenomena**, v. 6, n. 2, p. 1–53, 2011.

CAMPOS, M. F. de et al. Análise de crescimento em plantas de soja tratadas com substâncias reguladoras. **Biotemas**, v. 21, n. 3, 2008.

CORTLEVEN, A.; SCHMÜLLING, T. Regulation of chloroplast development and function by cytokinin. **Journal of Experimental Botany**, v. 66, n. 16, p. 4999–5013, 2015.

CRUSCIOL, C. A. C. et al. Influência de lâminas de água e adubação mineral na nutrição e produtividade de arroz de terras altas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 4, p. 647–654, 2003.

CRUSCIOL, C. a C. et al. Root distribution, nutrient uptake, and yield of two upland rice cultivars under two water regimes. **Agronomy Journal**, v. 105, n. 1, p. 237–247, 2013.

FAGERIA, N. K.; MOREIRA, A.; COELHO, A. M. Yield and yield components of upland rice as influenced by nitrogen sources. **Journal of Plant Nutrition**, v. 34, n. 3, p. 361–370, 2011.

FALQUETO, A. R. et al. Crescimento e partição de assimilados em cultivares de arroz diferindo no potencial de produtividade de grãos. **Bragantia**, v. 68, n. 3, p. 563–571, 2009.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 35, n. 6, p. 1039–1042, 2011.

FORNASIERI FILHO, D.; FORNASIERI, J. L. Manual da cultura do arroz. Jaboticabal: Funep, 2006. 589 p.

GHORBANI JAVID, M. et al. Effects of the exogenous application of auxin and cytokinin on carbohydrate accumulation in grains of rice under salt stress. **Plant Growth Regulation**, v. 65, n. 2, p. 305–313, 2011.

GUO, B. et al. Thidiazuron: A multi-dimensional plant growth regulator. **African Journal of Biotechnology**, v. 10, n. 45, p. 8984–9000, 2011.

KIEBER, J. J.; SCHALLER, G. E. Cytokinins. **The Arabidopsis Book**, v. 12, p.

e0168, 2014.

LAZOVA, G.; YONOVA, P. Photosynthetic Parameters Were Modified in Wheat (*Triticum aestivum* L.) Flag Leaves by Two Phenylurea Cytokinins. **International Journal of Plant Sciences**, v. 171, n. 8, p. 809–817, 2010.

LIU, Y. et al. The relationship between nitrogen, auxin and cytokinin in the growth regulation of rice (*Oryza sativa* L.) tiller buds. **Australian Journal of Crop Science**, v. 5, n. 8, p. 1019–1026, 2011.

MONAKHOVA, O. F.; CHERNYAD'EV, I. I. A protector effect of cytokinin preparations on the photosynthetic apparatus of wheat plants under water deficiency conditions. **Applied Biochemistry and Microbiology**, v. 43, n. 6, p. 641–649, 2007.

NAM, Y.-J. et al. Regulatory Roles of Cytokinins and Cytokinin Signaling in Response to Potassium Deficiency in Arabidopsis. **Plos One**, v. 7, n. 10, p. 1–9, 2012.

PAVLÚ, J. et al. Cytokinin at the Crossroads of Abiotic Stress Signalling Pathways. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 19, n. 8, p. 2450, 2018.

PERES, A. R. et al. Effect of irrigation, rainfed conditions and nitrogen sources on newly released upland rice cultivar (BRS Esmeralda) with greater tolerance to drought stress. **Australian Journal of Crop Science**, v. 12, n. 07, p. 1072–1081, 2018.

PESSARAKLI, M. **Handbook of Photosynthesis**. 3. ed. Oakville, Canada: Apple Academic Press Inc., 2016. 200 p.

PINHEIRO, B. D. S.; CASTRO, E. da M. de; GUIMARÃES, C. M. Sustainability and profitability of aerobic rice production in Brazil. **Field Crops Research**, v. 97, n. 1, p. 34–42, 2006.

PORTES, T. D. A.; CASTRO JR, L. G. De. Análise de crescimento de plantas: um programa computacional auxiliar. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, v. 3, n. 1, p. 53–56, 1991.

RADFORD, P. J. Growth Analysis Formulae - Their Use and Abuse. **Crop Science**, v. 7, n. 3, p. 171, 1967.

RAIJ, B. van et al. Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. **Campinas: Instituto Agrônômico**, n. 19, 2001. p. 285

ROSSETTO, C. A. V.; NAKAGAWA, J. Época de colheita e desenvolvimento vegetativo de aveia preta. **Scientia Agricola**, v. 58, n. 4, p. 731–736, 2001.

SAITO, K. et al. Progress in varietal improvement for increasing upland rice productivity in the tropics. **Plant Production Science**, v. 21, n. 3, p. 145–158, 2018.

SANTOS, A. B. Dos; COSTA, J. D. Crescimento de arroz de sequeiro em diferentes populações e irrigação suplementar. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 32, n. 6, p. 591–599, 1997.

SANTOS, H. G. dos; et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 938 p.

SGULA, M. et al. Cytokinins negatively regulate the root iron uptake machinery in Arabidopsis through a growth-dependent pathway. **The Plant Journal**, v. 55, n. 2, p. 289–300, 2008.

SHEN, C. et al. OsARF16 Is Involved in Cytokinin-Mediated Inhibition of Phosphate Transport and Phosphate Signaling in Rice (*Oryza sativa* L.). **Plos One**, v. 9, n. 11, p. e112906, 2014.

SILVA, A. S. et al. Irrigação de salvação em culturas de subsistência. In: BRITO, L.T. de L.; MOURA, M.S.B. de; GAMA, G.F.B. (Ed.). **Potencialidades da água de chuva no Semiárido brasileiro**. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2007. cap. 8, p.159-179.

SONG, W. et al. Increased photosynthetic capacity in response to nitrate is correlated with enhanced cytokinin levels in rice cultivar with high responsiveness to nitrogen nutrients. **Plant and Soil**, v. 373, n. 1–2, p. 981–993, 2013.

STONE, L. F. et al. Adubação nitrogenada em arroz sob irrigação suplementar por aspersão. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 34, n. 6, p. 927–932, 1999.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 858 p.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiología vegetal**. 4. ed. Porto Alegre: Artmed, 2009. 819 p.

TALLA, S. K. et al. Cytokinin delays dark-induced senescence in rice by maintaining the chlorophyll cycle and photosynthetic complexes. **Journal of Experimental Botany**, v. 67, n. 6, p. 1839–1851, 2016.

YANG, J. et al. Hormonal Changes in the Grains of Rice Subjected to Water Stress during Grain Filling. **Plant physiology**, v. 127, n. 1, p. 315–323, 2001.

YANG, L. et al. Seasonal changes in the effects of free-air CO₂ enrichment (FACE) on dry matter production and distribution of rice (*Oryza sativa* L.). **Field Crops Research**, v. 98, n. 1, p. 12–19, 2006.

YOSHIDA, S. Physiological Aspects of Grain Yield. **Annual Review of Plant Physiology**, v. 23, n. 1, p. 437–464, 1972.

YOSHIDA, S. Fundamentals of rice crop science. **Growth and development of the rice plant**, Los Baños: International Rice Research Institute, 1981. p. 268.

CAPÍTULO 4 – ALTERAÇÕES MORFOLÓGICAS E GENÉTICAS DE CULTIVARES MUTANTES DE ARROZ TRATADOS COM CITOCININA EXÓGENA

Resumo

Os efeitos da citocinina nas plantas são desencadeados por um processo de sinalização que começa pela percepção de sinal na membrana plasmática e vai até a expressão génica no núcleo celular. Não se sabe ao certo quais componentes da sinalização celular são influenciados pela aplicação de citocinina exógena bem como a expressão de genes relacionados a esse hormônio. Esse trabalho foi realizado com o objetivo de entender melhor o mecanismo de ação de citocinina exógena na rota de sinalização celular desse hormônio e expressão de genes que governam as características responsáveis por sua ação nas plantas. Foi realizado experimento comparando o efeito de duas citocininas, 6-benzilaminopurina (BAP) e thidiazuron (TDZ), aplicadas quatro vezes durante a fase de perfilhamento de cultivares de arroz com alterações em genes relacionados à rota de sinalização celular da citocinina (OsPHP, OsRR tipo B e OsCKX). Foi realizado também a quantificação da expressão do gene OsRR4 no mutante OshK. Todos os cultivares estudados apresentaram aumento no conteúdo de clorofilas e carotenoides, em função do uso de citocinina exógena. Em relação à biometria, o cultivar selvagem e o OsCKX tiveram redução na altura com o uso de ambas as citocininas. O número de panículas por planta e a produtividade de grãos tiveram incrementos nos cultivares OsPHP, OsRR tipo B e selvagem, em resposta aos tratamentos. Quanto à expressão do gene OsRR4, as plantas tratadas com o TDZ, tiveram maior quantidade de expressão desse gene em comparação com a BAP. O arroz mostrou-se ser extremamente resistente à altas doses de citocinina exógena. Os resultados de expressão genica confirmam que o uso de citocinina exógena aumenta a sinalização celular desse hormônio, consecutivamente melhorando as características da planta controladas pela citocinina.

4.1 INTRODUÇÃO

O arroz é um dos cereais mais consumidos no mundo. É cultivado nos cinco continentes, tanto em regiões tropicais como subtropicais. A Ásia é o principal produtor com mais de 80% da produção mundial (KRISHNAN et al., 2011), em sua maioria no sistema irrigado. No entanto, o impacto ambiental dessa prática e a escassez de água fins agrícolas, impõe a necessidade de um sistema de produção sustentável e com baixo consumo de água. Uma alternativa para isso envolve o cultivo de arroz no ecossistema de terras altas, o qual utiliza apenas água proveniente de chuvas, podendo ter fornecimento de água com irrigação por aspersão (STONE et al., 1984; ARF et al., 2000; CRUSCIOL et al., 2006) .

A técnica de irrigação por aspersão no arroz de terras altas tem mostrado excelente resultados para pequenos e médios produtores na região de Cerrado localizada no Centro-oeste brasileiro (SANTOS et al., 2006). Essa suplementação hídrica garante estabilidade da produção, mesmo com a ocorrência de veranicos durante o ciclo da cultura. Essa técnica permite a implementação de outras tecnologias, tais como uso de altas doses de fertilizantes, cultivares com maior exigência e altas densidades de semeadura (ARF et al., 2001).

A cultura do arroz tem se mostrado altamente responsiva ao uso de reguladores de vegetais, mais notavelmente, inibidores da biossíntese do ácido giberélico (NASCIMENTO et al., 2009; GITTI et al., 2011; ARF et al., 2012; ALVAREZ et al., 2014). Recentemente, um estudo envolvendo a aplicação de thidiazuron, uma citocinina sintética, em arroz de terras altas, mostrou incrementos na produtividade e qualidade de beneficiamento dos grãos (ALVES et al., 2015).

Estudos sobre o uso de citocinina em arroz mostram que este hormônio promove incrementos na capacidade fotossintética (SONG et al., 2013), expansão foliar, assimilação de CO₂, condutância estomática, eficiência da enzima rubisco, e desenvolvimento de cloroplastos funcionais (MONAKHOVA; CHERNYAD'EV, 2007; LAZOVA; YONOVA, 2010; CORTLEVEN; VALCKE, 2012). A citocinina regula a mobilização de nutrientes e fotoassimilados (TAIZ; ZEIGER, 2017), e também está relacionada com respostas aos estresses bióticos e abióticos (PAVLŮ et al., 2018).

Utilizando técnicas de genética molecular, foi possível elucidar o sistema de detecção e sinalização das citocininas nas células (FARBER et al., 2016), inclusive

importantes componentes de sinalização positivos e negativos (KIEBER; SCHALLER, 2014). As citocininas ligam-se aos receptores de Histidina quinase (HK) e induzem sua auto fosforilação. Em seguida as proteínas de Histidina-fosfotransferência (PHP) transferem o grupo fosfato do receptor para o núcleo para fosforilar e ativar um conjunto de fatores de transcrição conhecidos como reguladores de resposta (RR) tipo-B. Os RRs tipo B, depois de ativados, induzem a transcrição de vários genes regulados pela citocinina, incluindo genes que codificam RRs do tipo A, que por sua vez suprimem as respostas da citocinina (HWANG et al., 2012; TSAI et al., 2012; KIEBER; SCHALLER, 2014). Sendo assim, a possível interação entre a citocinina exógena e genes ligados com a biossíntese de citocinina na planta podem elucidar o mecanismo de ação do TDZ em plantas de arroz e explicar os resultados positivos encontrados em arroz de terras altas por Alves et al. (2015).

Objetivou-se com esse trabalho verificar a influência de doses de citocinina nos aspectos morfológicos e genéticos de cultivares de arroz mutantes, alterados na rota de sinalização celular da citocinina, tentando assim entender melhor o mecanismo de ação do TDZ no arroz, associando com os resultados obtidos com arroz cultivado em ecossistema de terras altas.

4.2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado em casa de vegetação situada no Departamento de Biologia da Universidade da Carolina do Norte em Chapel Hill. Foram utilizadas caixas de 14" com capacidade de 25 L contendo 15 vasos cada, onde as plantas foram cultivadas individualmente em um sistema hidropônico.

4.2.1 Esterilização e germinação de sementes de arroz

As sementes de arroz foram descascadas e alocadas em tubos tipo Falcon de 50 mL, estéreis. Em seguida, as sementes foram cobertas com isopropanol 100% durante um minuto e enxaguadas com água esterilizada. O próximo passo foi cobrir as sementes com solução de cloro 50% e agitar por 30 minutos a 28°C. A solução de cloro foi descartada e as sementes foram enxaguadas com água estéril até o cheiro de cloro desaparecer. As sementes foram colocadas em placa de Petri contendo disco de papel de filtro de 85 mm e submergidas em água. Por fim, as placas foram incubadas a 37°C durante 24 horas e depois colocadas em câmara de LED com luzes

na faixa do espectro vermelho e azul, ficando lá até o momento ideal para transplante no solo.

4.2.2 Definição da dose de citocinina

Devido a diferença varietal e ambiente de cultivo dos cultivares brasileiros de arroz (*Oryza sativa* ssp. indica) e o cultivar Kitaake (*Oryza sativa* ssp. japonica) foi realizado experimento com delineamento inteiramente casualizados com quatro repetições, sendo testado doses (0,01, 0,1, 1,0 e 10 mM) de citocininas no cultivar de arroz tipo selvagem (Kitaake). Foram testadas duas citocininas, thidiazuron e 6-Benzilaminopurina, dissolvidas em etanol 60%. As soluções de citocinina foram aplicadas utilizando borrifador manual previamente calibrado, visando aplicar três mililitros por planta. As doses foram aplicadas na fase correspondente ao perfilhamento médio das plantas. Todas as pulverizações foram realizadas as 10:30 da manhã. O experimento foi conduzido até a maturação, sendo considerado a produção de grãos o parâmetro para a definição da dose ideal. Devido a ausência visual de resposta logo após a aplicação da maior dose de citocinina, foi decidido realizar pulverizações sequenciais a cada três dias, totalizando 4 aplicações.

4.2.3 Descrição dos genótipos usados

O cultivar padrão utilizado foi arroz o Kitaake (tipo selvagem), uma variedade Japônica, insensível a mudanças no fotoperíodo e com ciclo de 115 dias, aproximadamente. Os mutantes utilizados tinham rupturas nos componentes de sinalização da citocinina, cada um separadamente, como descrito abaixo:

- OsHK (Histidina quinase): oshk4 e oshk4-6. Localizado na membrana plasmática e funciona como sensor, recebe o sinal externo e sinaliza para os reguladores de resposta. Este mutante foi usado apenas para quantificação do OsRR4 em reação quantitativa em cadeia da polimerase (qPCR).
- OsPHP (Proteínas de histidina-fosfotransferência): osphp1-2-3. Funciona como mediador do componente duplo de fosforilação entre o sensor histidina quinase e os reguladores de resposta (RRs) do tipo B. Executa importante papel na propagação do sinal de transdução da citocinina.

- Superexpressão do OsRR tipo B (Reguladores de resposta): osrr22-23. Os RR tipo B são reguladores positivos da sinalização da citocinina, que controlam a transcrição de um subconjunto de genes regulados pela citocinina, incluindo os RRs tipo A.
- Superexpressão do OsCKX (Citocinina oxidase): osckx4. A CKX é uma enzima que cliva, irreversivelmente, as cadeias laterais da citocinina, levando à perda completa da atividade dessa substância.

4.2.4 Análise de pigmentos fotossintéticos na folha

Para determinar os pigmentos fotossintéticos (clorofila a, clorofila b e carotenóides) presentes no tecido foliar, três discos de 0,5mm de diâmetro foram coletados na borda e a nervura central da última folha totalmente expandida da planta principal, 24 horas depois da aplicação de citocinina. Os discos foram colocados em frascos de vidros tampados e cobertos com papel alumínio, contendo dois mL de N,N-dimetilformamida (DMF) durante 24 horas, segundo a metodologia proposta por Lichtenthaler (1987).

As leituras de absorbância para clorofila a, clorofila b e carotenóides foram realizadas em espectrofotômetro no comprimentos de onda 664, 647, 480 nm, respectivamente. As leituras foram realizadas com um mL do extrato e um mL de água deionizada, usando como branco a mistura de um mL de DMF mais um mL de água. Os cálculos para determinação dos pigmentos foram feitas de acordo com a metodologia de Wellburn (1994).

4.2.5 Extração de RNA e análise de qPCR

Foram coletadas quatro amostras de tecido foliar por tratamento no cultivar selvagem e nos mutantes OsHK4 e OsHK4-6. O RNA foi extraído utilizando o reagente RNAzol® RT como descrito por Chomczynski et al. (2010). A reação quantitativa em cadeia da polimerase (qPCR) foi realizada utilizando o tampão 2x PowerUp SYBR Green (ThermoFisher Scientific, catálogo número A25742), em termo ciclador QuantStudio 6 Flex Real-Time PCR system (ThermoFisher Scientific). Foram feitas duas réplicas técnicas para cada amostra, e a dobra de expressão gênica foi calculada usando a fórmula $2^{-\Delta\Delta CT}$. O gene avaliado foi o OsRR4, responsável pela codificação de RR tipo B.

4.2.6 Avaliações morfológicas

A características morfológicas avaliadas foram: altura de plantas, medindo a distância média (m) da superfície do vaso até a extremidade mais alta da panícula. Número de panículas, contando o número de panículas viáveis por vaso. Número de espiguetas por panícula, contando o número total de espiguetas cheias e vazias de cada panícula. Fertilidade das espiguetas, obtida a partir da divisão do número total de espiguetas pelo número de espiguetas cheias, multiplicado por 100. Produtividade por planta, pela massa total de grãos produzida por planta.

4.2.7 Análise estatística

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância a 5% de probabilidade, e as médias foram comparadas pelo teste de diferença mínima significativa de Fisher (LSD) a 5% de probabilidade. Todas as análises foram realizadas utilizando o programa estatístico SISVAR 5.3 (FERREIRA, 2011).

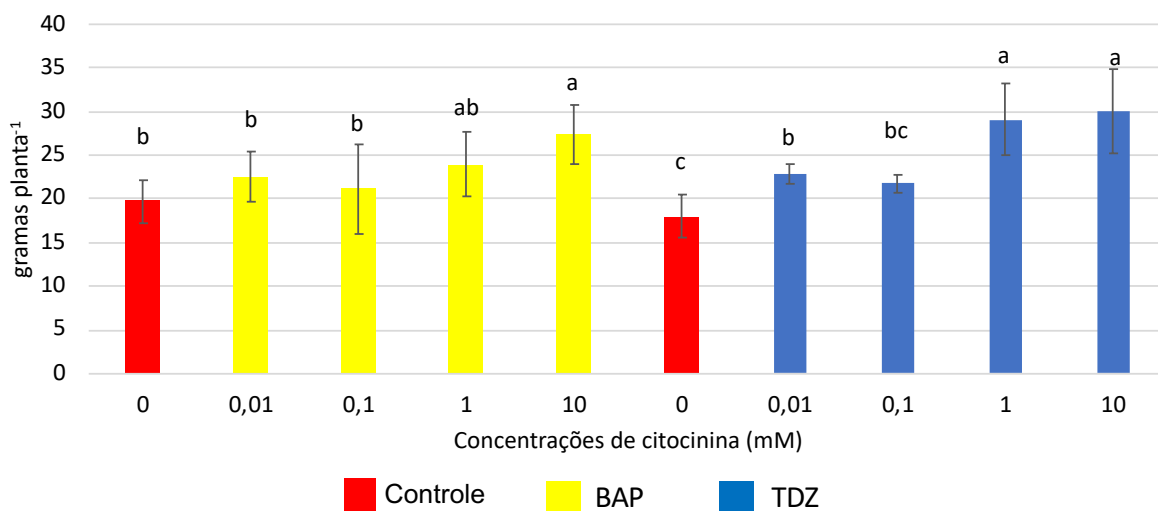
4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.3.1 Definição da dose de citocinina

As doses 1 e 10 mM de ambas as citocininas testadas tiveram os maiores resultados para produtividade de grãos (Figura14). Quando foram aplicadas as doses de 1 e 10 mM de BAP as plantas produziram em média 25 g de arroz, cerca de 4 e 6 g a mais que a média das duas menores doses e o controle, respectivamente. Com a aplicação de TDZ, as duas maiores doses resultaram na produção média de 29,5 g de arroz por planta, enquanto com as doses 0,01 e 0,1 mM, as plantas produziram 22,8 e 21,8 g, respectivamente, e o controle produziu 18 g.

A princípio era esperado efeito herbicida com as doses mais altas de citocinina, pois o TDZ é usado como desfolhante na cultura do algodão (SUTTLE, 1985; GORMUS et al., 2017). Mesmo com a maior dose de citocinina (10mM), o arroz apresentou alterações morfológicas mínimas, sugerindo certa insensibilidade ao efeito herbicida. Logo, considerando que não houve diferença entre as produtividades nas doses 1 e 10 mM, para as duas citocininas testadas, optou-se por usar a dose 1 mM no experimento com mutantes.

Figura 1 - Produtividade de grãos em plantas tratadas com doses de 6-benzilaminopurina (BAP) e thidiazuron (TDZ)



4.3.2 Conteúdo de clorofila e carotenóides na folha

Todos os cultivares testados apresentaram aumento no teor de clorofila e carotenóides em função da aplicação citocinina. O TDZ e a BAP foram estatisticamente iguais, exceto para os teores de carotenóides do mutante OsPHP (Figura 3d). Onde não houve aplicação de citocinina, independente do cultivar, as plantas tiveram resultados similares, com média de $10 \mu\text{g cm}^{-2-1}$ de clorofila a+b.

Os valores de clorofila e carotenóides obtidos no mutante OsPHP triplo, foram maiores que o cultivar selvagem, em média 5 e 9% para clorofila a+b e carotenóides, respectivamente (Figura 3). Segundo Mähönen et al. (2006), a PHP pode atuar como regulador negativo da citocinina e sua expressão é regulada negativamente em função de citocinina exógena. Sendo assim, no mutante OsPHP, a ausência de regulação negativa desse hormônio resultou no aumento da clorofila e dos carotenóides.

Figura 2 - Teores de clorofila a (a), clorofila b (b), clorofila a + b (c) e carotenoides (d) do cultivar de arroz Kitaake tratado com 6-benzialminopurina (BAP) e thidiazuron (TDZ)

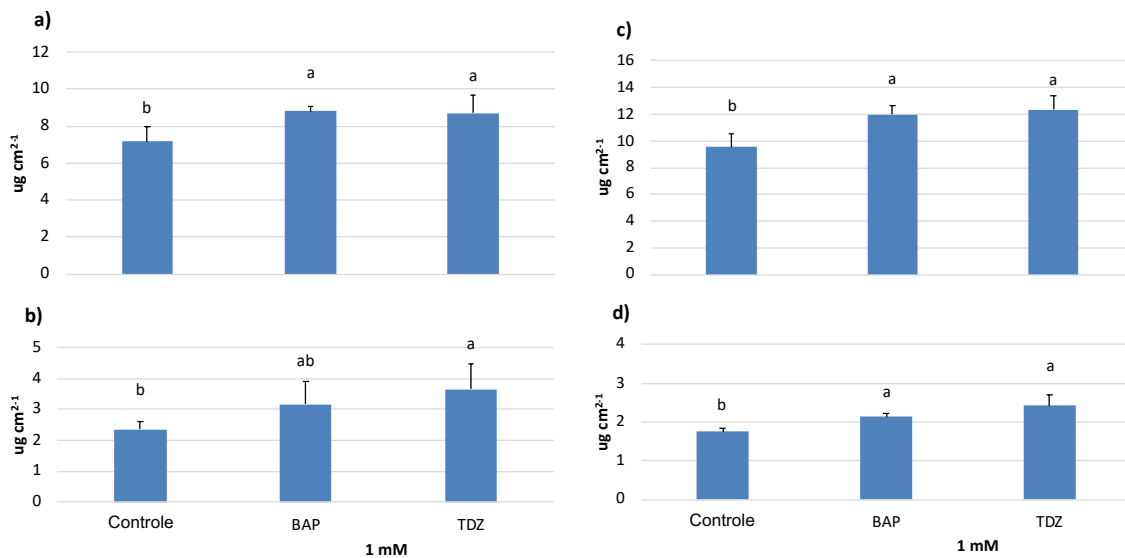
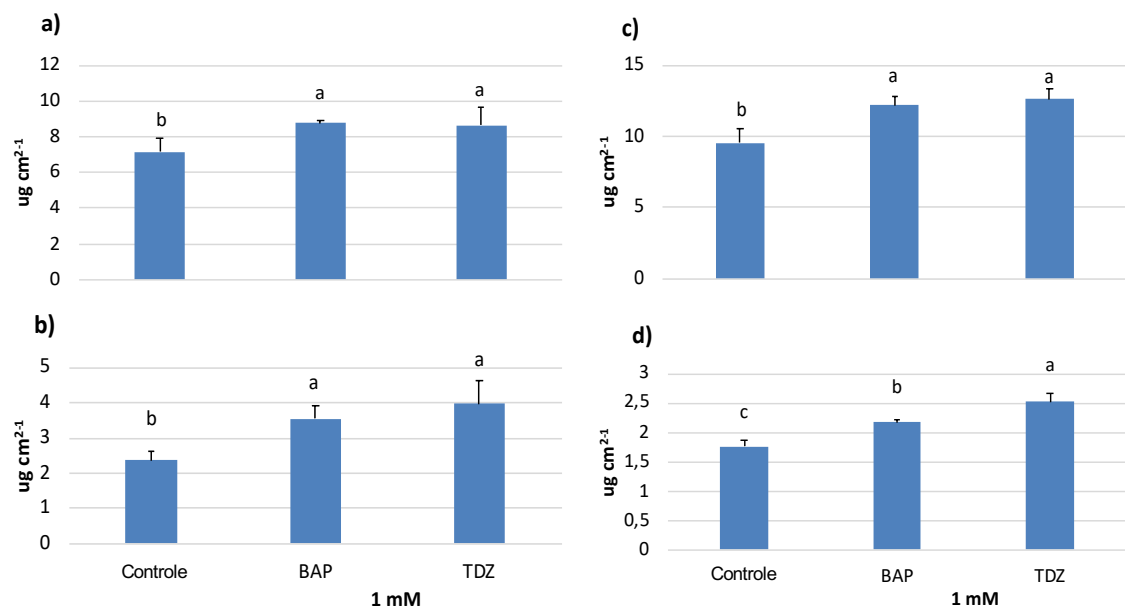


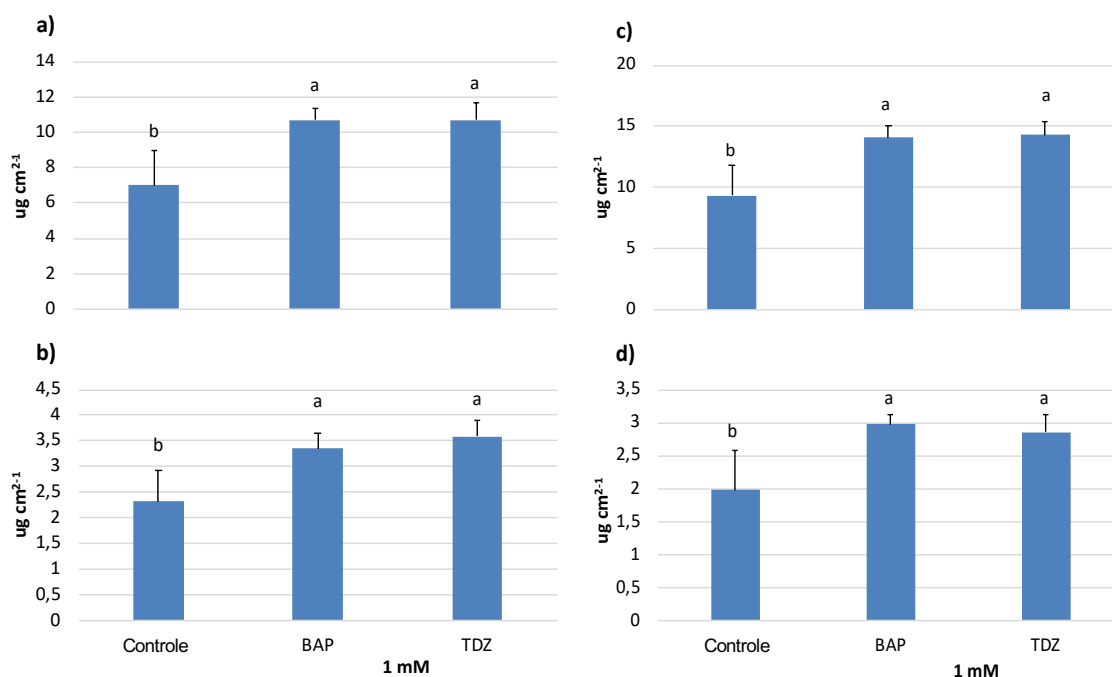
Figura 3 - Teores de clorofila a (a), clorofila b (b), clorofila a + b (c) e carotenoides (d) do cultivar mutante de arroz OsPHP tratado com 6-benzialminopurina (BAP) e thidiazuron (TDZ)



Em relação ao mutante RR Tipo B, as citocininas exógenas promoveram aumento médio de 44,5% da clorofila a+b e carotenóides, enquanto o tipo selvagem apresentou 23% e 30% nos mesmos pigmentos, respectivamente (Figura 4). O conjunto de RRs do Tipo B regula a transcrição de genes na rota de sinalização da

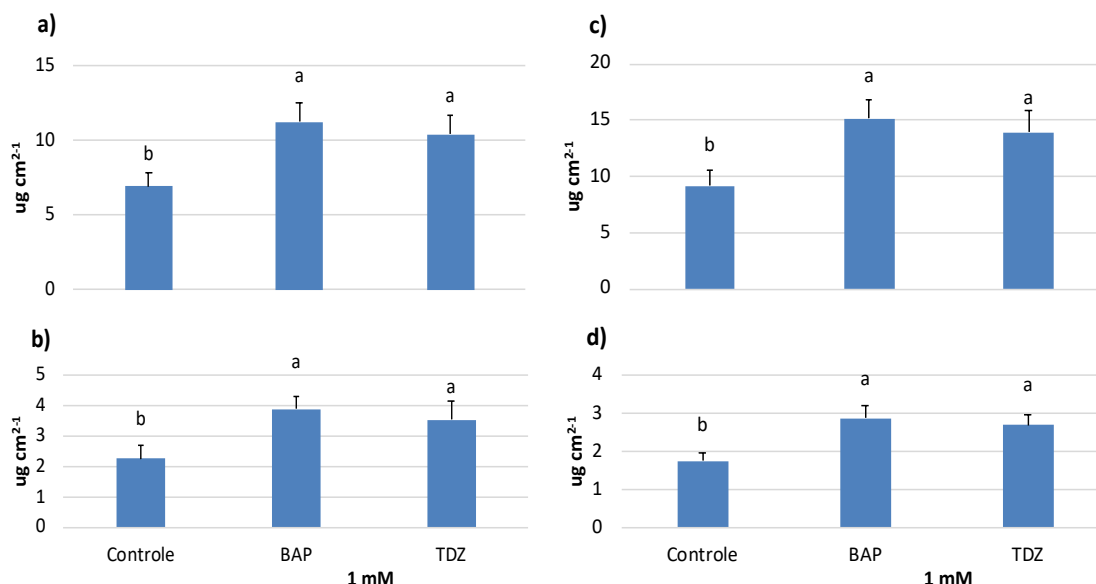
citocinina (KIEBER; SCHALLER, 2014), resultando na rápida indução de genes alvo associados à citocinina, como os responsáveis pela síntese de clorofila. Portanto, a superexpressão dos genes RR do tipo B provavelmente aumentou da produção de clorofila.

Figura 4 - Teores de clorofila a (a), clorofila b (b), clorofila a + b (c) e carotenoides (d) do cultivar mutante de arroz OsRR tipo B tratado com 6-benzilaminopurina (BAP) e thidiazuron (TDZ)



Não era esperado aumento de 65% para os teores de clorofila a+b e e 62% para os teores de carotenóides no mutante com superexpressão da CKX (Figura 5). De acordo com Kieber; Schaller (2014), as CKX catalisam a degradação das citocininas e, portanto, prevê-se que o aumento na expressão de CKX diminua a concentração de citocininas bioativas, e como consequência, seja reduzida a sinalização desse hormônio na célula. Entretanto, o OsCKX4 foi identificado como gene de resposta primária à citocinina, diretamente regulado pelo ARR1, um RR do tipo B (TANIGUCHI et al., 2007), o que pode levar a efeitos contrários inicialmente.

Figura 5 - Teores de clorofila a (a), clorofila b (b), clorofila a + b (c) e carotenoides (d) do cultivar mutante de arroz OsCKX tratado com 6-benzialminopurina (BAP) e thidiazuron (TDZ)



Além do mais, é possível também que a superexpressão da CKX não foi suficiente para degradar a alta concentração de citocinina exógena (1 mM) em curto espaço de tempo (24 horas após a última aplicação), e os demais genes regulados pelo RR tipo B sobressaíram, como por exemplo, os genes responsáveis pela produção de clorofila. Corroborando com isso, Černý et al. (2013) demonstraram que a superexpressão de CKX estimula a biossíntese de citocinina. Mesmo com essas informações, mais estudos são necessários para confirmar a repetibilidade dos resultados e também determinar quanto tempo a ação da CKX consegue degradar a citocinina exógena, diminuindo seus efeitos na planta.

4.3.3 Componentes da produção e produtividade

O cultivar selvagem e o mutante com superexpressão do OsCKX mostraram redução na altura de plantas com a aplicação de citocinina (Figura 6a). A diminuição da altura da planta é um dos efeitos morfológicos esperados pela ação da citocinina. Segundo To; Kieber (2008) em *Arabidopsis thaliana* a desestibulação é um processo regulado pela citocinina, e é possível que a sinalização da citocinina no meristema apical possa agir como antagonista dos níveis de giberelina. Levando em conta que a giberelina é o hormônio responsável pelo alongamento de entrenós (TAIZ; ZEIGER,

2017), é considerável que o desbalanço hormonal causado pelas doses de citocinina possam ter refletido na diminuição da altura das plantas.

Outro papel fisiológico da citocinina é o estímulo de brotação das gemas laterais (TAIZ; ZEIGER, 2017). Para o arroz, esse processo reflete em maior número de perfilhos por planta e, conseqüentemente, a planta pode produzir mais panículas. Exceto pelo mutante OsCKX, todos os genótipos estudados apresentaram maior número de panículas com a aplicação de pelo menos uma das citocininas (Figura 6b).

É importante relatar que o estágio de perfilhamento desse experimento foi mais longo que o habitual, permanecendo mesmo durante o estágio de florescimento. Considerando que o mutante OsCKX não apresentou diferenças no número de panículas, pode-se inferir que a CKX tenha degradado a citocinina exógena durante o ciclo da planta, reduzindo a brotação das gemas que originam os perfilhos, e como consequência, esse mutante não teve aumento no número de panículas. Yeh et al. (2015) mostraram que plantas de arroz que produzem maior quantidade da enzima CKX tem menor número de perfilhos, corroborando com os resultados do presente estudo.

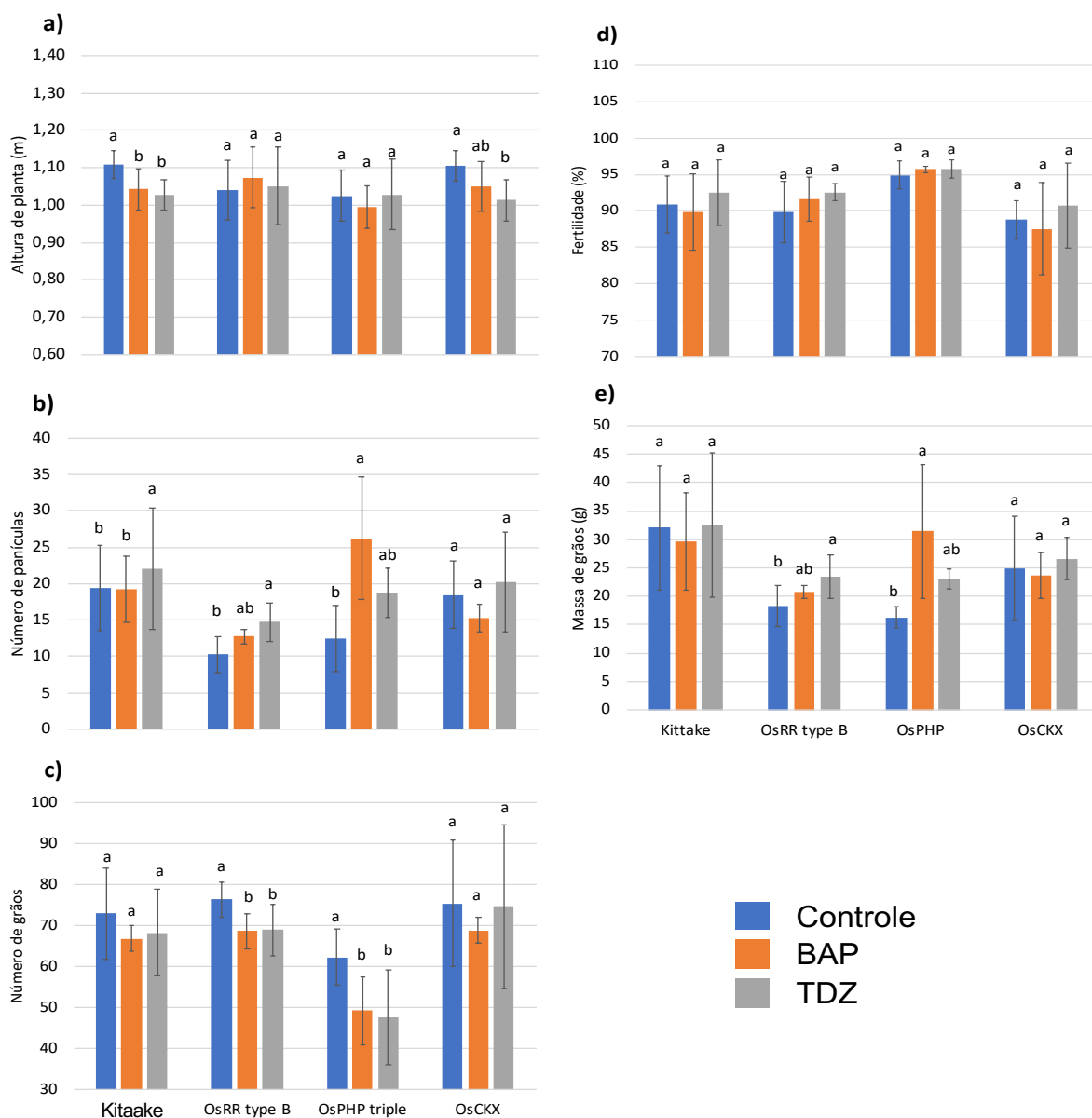
As diferenças encontradas no número de grãos por panícula, para os mutantes RR tipo B e OsPHP, estão relacionadas ao número de panículas por plantas desses cultivares (Figura 6c). Yoshida (1981) afirma que o tamanho das panículas oriundas dos perfilhos subsequentes tendem a diminuir e como o número de grãos foi calculado dividindo o número total de grãos por planta pelo número de panículas, houve diluição no número de grãos entre as panículas, embora, as panículas primárias, secundárias e terciárias tiveram tamanho e número de grãos semelhantes aos demais cultivares.

A fertilidade das espiguetas é uma característica altamente afetada por estresse abiótico (YOSHIDA, 1981; SANTOS et al., 2006). Devido às condições ideais na casa de vegetação onde o experimento foi conduzido, não foi possível observar o provável efeito da citocinina em aliviar estresse, promovendo o aumento na fertilidade das espiguetas. Em contrapartida, no trabalho de Alves et al. (2015), o uso de citocinina promoveu aumento na fertilidade das espiguetas, porém, o experimento foi conduzido no ecossistema de terras altas, onde é comum a ocorrência de estresses abióticos.

A produtividade de grãos seguiu o mesmo comportamento do número de panículas por planta, onde o mutante tipo B e o OsPHP triplo apresentaram respostas positivas em função das doses, enquanto o selvagem e o OsCKX não tiveram

diferença significativa (Figura 6e). Fageria (2014) relata que os componentes da produção são compostos por número de panículas por planta, espiguetas por panícula, fertilidade de espiguetas e massa de grãos. Assim, qualquer oscilação nesses componentes pode refletir no rendimento de grãos. Neste caso, plantas com maior número de panículas tiveram os maiores resultados de produtividade de grãos.

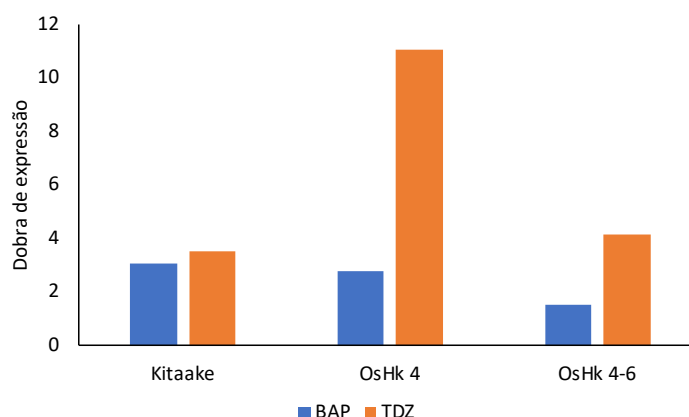
Figura 6 - Altura de plantas, número de panículas por planta, número de grãos por panícula, fertilidade das espiguetas e produtividade de grãos de plantas de arroz selvagem e mutantes (OsRR type B, OsPHP triple e OsCKX) tratados com 6-benzialminopurina (BAP) e thidiazuron (TDZ)



4.3.4 Expressão gênica do OsRR4

A aplicação de BAP e TDZ resultou no aumento da expressão do gene OsRR4 no cultivar selvagem, OsHK4 e OsHK4-6 (Figura 7). Com o uso da BAP, a maior expressão do gene OsRR4 aconteceu no Kitaake, OsHK4 e OsHK4-6, nesta sequência. Já o TDZ proporcionou maior expressão do gene em questão nos cultivares mutantes do que no selvagem. Isso confirma a superioridade do TDZ em relação à BAP reportada por Meyer; Kernsh (1986).

Figura 7 - Expressão do gene OsRR4 em de arroz do tipo selvagem, HK4 e HK4-6 tratados com citocinina exógena. A dobra de expressão para 6-benzialminopurina (BAP) e thidiazuron (TDZ) é em relação ao tratamento controle



O sensor HK localiza-se na membrana plasmática e é responsável por perceber estímulos ambientais e fosforilar o RR (KIEBER; SCHALLER, 2014). Logo, deveria ocorrer diminuição da expressão do gene OsRR4 como consequência da interrupção dos genes OsHK. Tendo em vista que houve dobra na expressão do OsRR4 quando ambas as citocininas foram aplicadas, deduz-se que a aplicação de citocinina afeta positivamente a via de sinalização na célula, estimulando as características da planta governadas por esse hormônio.

As respostas positivas ou negativas à ação da citocinina são desencadeadas pela fosforilação do RR tipo B (SCHALLER et al., 2014). Em arroz, foram encontrados 13 diferentes RR do tipo B (Tsai et al., 2012). Tendo em vista que as características morfológicas e fisiológicas da citocinina na planta são governadas pela expressão dos RR do tipo B, e que a citocinina exógena aumenta a expressão desses genes, fica difícil determinar exatamente quais as modificações na planta são causadas pelo aporte externo de citocinina. Isso também explica a variabilidade de resposta nos

pigmentos fotossintéticos, aspectos morfológicos e produtividade de grãos observadas entres os cultivares estudados.

4.4 CONCLUSÃO

O cultivar de arroz Kitaake apresenta resistência a altas doses de citocinina exógena, sendo necessários estudos que elucidem este mecanismo de resistência, bem como a persistência da ação dessa substância na planta. As diferenças morfológicas nos cultivares mutantes foram mínimas, porém, todos tiveram efeito do thidiazuron e 6-benzilaminopurina. A quantificação da expressão do gene OsRR4 reafirma a influência de citocinina externa na rota celular de sinalização desse hormônio, notadamente, maior com o uso de thidiazuron. Em casa de vegetação o desenvolvimento da panícula não é influenciado como acontece em campo, o que limita o efeito da citocinina em aliviar estresse abiótico e garantir estabilidade na produtividade de grãos.

REFERÊNCIAS

- ALVAREZ, R. de C. F.; CRUSCIOL, C. A. C.; NASCENTE, A. S. Produtividade de arroz de terras altas em função do uso de reguladores de crescimento. **Revista Ceres**, v. 61, p. 42–49, 2014.
- ALVES, C. et al. Thidiazuron aumenta a produtividade em arroz de terras altas. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 45, n. 3, p. 333–339, 2015.
- ARF, O. et al. Influência da época de semeadura no comportamento de cultivares de arroz irrigado por aspersão em selvíria, MS. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 35, n. 10, p. 1967–1976, 2000.
- ARF, O. et al. Resposta de cultivares de arroz de sequeiro ao preparo do solo e à irrigação por aspersão. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 36, n. 6, p. 871–879, 2001.
- ARF, O. et al. Uso de etil-trinexapac em cultivares de arroz de terras altas. **Pesquisa Agropecuaria Tropical**, v. 42, n. 2, p. 150–158, 2012.
- ČERNÝ, M. et al. Proteome and metabolome profiling of cytokinin action in Arabidopsis identifying both distinct and similar responses to cytokinin down- and up-regulation. **Journal of Experimental Botany**, v. 64, n. 14, p. 4193–4206, 2013.
- CHOMCZYNSKI, P. et al. RNazol® RT: a new single-step method for isolation of RNA. **Nature Methods**, v. 7, p. 1026, 2010.

CORTLEVEN, A.; VALCKE, R. Evaluation of the photosynthetic activity in transgenic tobacco plants with altered endogenous cytokinin content: lessons from cytokinin. **Physiologia Plantarum**, v. 144, n. 4, p. 394–408, 2012.

CRUSCIOL, C. A. C. et al. Yield of upland rice cultivars in rainfed and sprinkler-irrigated systems in the Cerrado region of Brazil. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, v. 46, n. 11, p. 1515–1520, 2006.

FAGERIA, N. K. **Mineral nutrition of rice**. [s.l.] CRC Press, 2014.

FARBER, M.; ATTIA, Z.; WEISS, D. Cytokinin activity increases stomatal density and transpiration rate in tomato. **Journal of Experimental Botany**, v. 67, n. 22, p. 6351–6362, 2016.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 35, n. 6, p. 1039–1042, 2011.

GITTI, D. de C. et al. Glyphosate como regulador de crescimento em arroz de terras altas. **Pesquisa Agropecuaria Tropical**, v. 41, n. 4, p. 500–507, 2011.

GORMUS, O.; KURT, F.; SABAGH, A. El. Impact of defoliation timings and leaf pubescence on yield and fiber quality of cotton. **Journal of Agricultural Science and Technology**, v. 19, n. 4, p. 903–915, 2017.

HWANG, I.; SHEEN, J.; MÜLLER, B. Cytokinin Signaling Networks. **Annual Review of Plant Biology**, v. 63, n. 1, p. 353–380, 2012.

KIEBER, J. J.; SCHALLER, G. E. Cytokinins. **The Arabidopsis Book**, v. 12, p. e0168, 2014.

KRISHNAN, P. et al. High-Temperature Effects on Rice Growth, Yield, and Grain Quality. **Advances in Agronomy**, v. 111, p. 87–206, 2011.

LAZOVA, G.; YONOVA, P. Photosynthetic Parameters Were Modified in Wheat (*Triticum aestivum* L.) Flag Leaves by Two Phenylurea Cytokinins. **International Journal of Plant Sciences**, v. 171, n. 8, p. 809–817, 2010.

LICHTENTHALER, H. K. Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes. In: **Plant Cell Membranes**. Methods in Enzymology. [s.l.] Academic Press, 1987. 148p.

MAHONEN, A. P. Cytokinin Signaling and Its Inhibitor AHP6 Regulate Cell Fate During Vascular Development. **Science**, v. 311, n. 5757, p. 94–98, 2006.

MEYER, M. M. J.; KERNSH, R. Thidiazuron and in vitro shoot proliferation of *Celtis occidentalis*. In: International Congress of Plant Tissue and cell culture, Minneapolis. **Anais...** Minneapolis: 1986.

MONAKHOVA, O. F.; CHERNYAD'EV, I. I. A protector effect of cytokinin preparations on the photosynthetic apparatus of wheat plants under water deficiency conditions. **Applied Biochemistry and Microbiology**, v. 43, n. 6, p. 641–649, 2007.

NASCIMENTO, V. et al. Uso do regulador de crescimento etil-trinexapac em arroz de terras altas. **Bragantia**, v. 68, n. 4, p. 921–929, 2009.

PAVLŮ, J. et al. Cytokinin at the Crossroads of Abiotic Stress Signalling Pathways. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 19, n. 8, p. 2450, 2018.

SANTOS, A. B.; STONE, L. F.; VIEIRA, N. R. A. **The rice crop in Brazil**. 2. ed. Santo Antônio de Goiás, GO, Brazil: Embrapa Arroz e Feijão, 2006. 1000 p.

SCHALLER, G. E.; STREET, I. H.; KIEBER, J. J. Cytokinin and the cell cycle. **Current Opinion in Plant Biology**, v. 21, p. 7–15, 2014.

SONG, W. et al. Increased photosynthetic capacity in response to nitrate is correlated with enhanced cytokinin levels in rice cultivar with high responsiveness to nitrogen nutrients. **Plant and Soil**, v. 373, n. 1–2, p. 981–993, 2013.

STONE, L. F.; LIBARDI, P. L.; REICHARDT, K. Deficiência hídrica, vermiculita e cultivares I. Efeito na produtividade do arroz. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 19, n. 6, p. 695–707, 1984.

SUTTLE, J. C. Involvement of Ethylene in the Action of the Cotton Defoliant Thidiazuron. **Plant physiology**, v. 78, n. 2, p. 272–276, 1985.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 858 p.

TANIGUCHI, M. et al. ARR1 Directly Activates Cytokinin Response Genes that Encode Proteins with Diverse Regulatory Functions. **Plant and Cell Physiology**, v. 48, n. 2, p. 263–277, 2007.

TO, J. P. C.; KIEBER, J. J. Cytokinin signaling: two-components and more. **Trends in Plant Science**, v. 13, n. 2, p. 85–92, 2008.

TSAI, Y.-C. et al. Characterization of Genes Involved in Cytokinin Signaling and Metabolism from Rice. **Plant Physiology**, v. 158, n. 4, p. 1666–1684, 2012.

WELLBURN, A. R. The Spectral Determination of Chlorophylls a and b, as well as Total Carotenoids, Using Various Solvents with Spectrophotometers of Different Resolution. **Journal of Plant Physiology**, v. 144, n. 3, p. 307–313, 1994.

YEH, S.-Y. et al. Down-Regulation of Cytokinin Oxidase 2 Expression Increases Tiller Number and Improves Rice Yield. **Rice**, v. 8, n. 1, p. 36, 2015.

YOSHIDA, S. Fundamentals of rice crop science. **Growth and development of the rice plant**, Los Baños: International Rice Research Institute, 1981. p. 268.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O fator climático foi o responsável pela grande diferença observada entre os resultados das duas safras. Mesmo com irrigação por aspersão não foi possível garantir produtividades regulares nas duas safras, ficando claro que, além do estresse hídrico, o estresse térmico ocasionado por altas temperaturas diminui significativamente a produtividade de grãos. A aplicação de thidiazuron promove aumento nos teores foliares de 6-benzialminopurina e trans-zeatina ribosídeo, além de ter interação com condições ambientais, aliviando efeitos de estresses abiótico, quando estes acontecem de forma moderada. As doses de thidiazuron aumentam os teores foliares de potássio, notadamente em anos com condições térmicas desfavoráveis. Os teores de potássio na panícula também aumentam, favorecendo o fluxo de fotoassimilados para aquele órgão, tendo como consequência, aumento na produtividade. Por ter função direta em aspectos relacionados à fotossíntese, a aplicação foliar de citocinina acresce o acúmulo de matéria seca nas folhas e colmo da planta, auxiliando na redistribuição dessa matéria seca para as estruturas reprodutivas, gerando maior massa de grãos, mesmo em anos com condições climáticas desfavoráveis para o crescimento e desenvolvimento da planta. A expressão do gene OsRR4 mostra que a citocinina exógena aumenta a sinalização celular desse hormônio, em resultado a isso, manifesta-se na planta diversas características regidas por esse gene. De forma geral, a planta de arroz responde à aplicação foliar de citocinina, melhorando características fisiológicas e nutricionais, que por sua vez interagem positivamente com a produtividade de grãos.

REFERÊNCIAS

- ALVES, C. et al. Thidiazuron aumenta a produtividade em arroz de terras altas. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 45, n. 3, p. 333–339, 2015.
- ARF, O. et al. Influência da época de semeadura no comportamento de cultivares de arroz irrigado por aspersão em selvíria, MS. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 35, n. 10, p. 1967–1976, 2000.
- ARF, O. et al. Resposta de cultivares de arroz de sequeiro ao preparo do solo e à irrigação por aspersão. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 36, n. 6, p. 871–879, 2001.
- ARF, O. et al. Uso de etil-trinexapac em cultivares de arroz de terras altas. **Pesquisa Agropecuaria Tropical**, v. 42, n. 2, p. 150–158, 2012.
- ARGUESO, C. T. et al. Two-component elements mediate interactions between cytokinin and salicylic acid in plant immunity. **PLoS Genetics**, v. 8, n. 1, 2012.
- ARTIGIANI, A. C. C. A. et al. Produtividade e qualidade industrial do arroz de terras altas em função da disponibilidade hídrica e adubação. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 42, n. 3, p. 340–349, 2012.
- ASHIKARI, M. Cytokinin Oxidase Regulates Rice Grain Production. **Science**, v. 309, n. 5735, p. 741–745, 2005.
- BOUMAN, B. A. M. et al. Rice and Water. **Advances in Agronomy**, v. 92, p. 187–237, 2007.
- CORTLEVEN, A.; VALCKE, R. Evaluation of the photosynthetic activity in transgenic tobacco plants with altered endogenous cytokinin content: lessons from cytokinin. **Physiologia Plantarum**, v. 144, n. 4, p. 394–408, 2012.
- CRUSCIOL, C. et al. Water supplied by sprinkler irrigation system for upland rice seed production. **Bioscience Journal**, v. 28, n. 1, 2012.
- CRUSCIOL, C. A. C. et al. Produtividade e qualidade industrial de grãos de arroz de terras altas em função de lâminas de água no sistema irrigado por aspersão. **Acta Scientiarum: Agronomy**, v. 25, n. 1, p. 125–130, 2003a.
- CRUSCIOL, C. A. C. et al. Influência de lâminas de água e adubação mineral na nutrição e produtividade de arroz de terras altas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 4, p. 647–654, ago. 2003b.
- CRUSCIOL, C. A. C. et al. Yield of upland rice cultivars in rainfed and sprinkler-irrigated systems in the Cerrado region of Brazil. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, v. 46, n. 11, p. 1515–1520, 2006.
- CRUSCIOL, C. a C. et al. Root distribution, nutrient uptake, and yield of two upland rice cultivars under two water regimes. **Agronomy Journal**, v. 105, n. 1, p. 237–247, 2013.

DAWE, D.; PANDEY, S.; NELSON, A. Emerging trends and spatial patterns of rice production. In: PANDEY, S. et al. (Ed.). **Rice in the global economy: Strategic research and policy issues for food security**. Los Baños: International Rice Research Institute, 2010. p. 15–37.

FAO. **FAOSTAT**. 2019. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC/visualize>. Acesso em: 13 set. 2019.

FORNASIERI FILHO, D.; FORNASIERI, J. L. **Manual da cultura do arroz**. Jaboticabal: Funep, 1993. 221 p.

GHORBANI JAVID, M. et al. Effects of the exogenous application of auxin and cytokinin on carbohydrate accumulation in grains of rice under salt stress. **Plant Growth Regulation**, v. 65, n. 2, p. 305–313, 2011.

GUO, B. et al. Thidiazuron: A multi-dimensional plant growth regulator. **African Journal of Biotechnology**, v. 10, n. 45, p. 8984–9000, 2011.

HEINEMANN, A. B. et al. Evaluation of physiological traits in upland rice for adaptation to no-tillage system. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 21, n. 2, p. 113–122, 2009.

HEINEMANN, A.; STONE, L. Efeito da deficiência hídrica no desenvolvimento e rendimento de quatro cultivares de arroz de terras altas. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 39, n. 2, 2009.

KIEBER, J. J.; SCHALLER, G. E. Cytokinins. **The Arabidopsis Book**, v. 12, p. e0168, 2014.

KRISHNAN, P. et al. High-Temperature Effects on Rice Growth, Yield, and Grain Quality. **Advances in Agronomy**, v. 111, p. 87–206, 2011.

LAZOVA, G.; YONOVA, P. Photosynthetic Parameters Were Modified in Wheat (*Triticum aestivum* L.) Flag Leaves by Two Phenylurea Cytokinins. **International Journal of Plant Sciences**, v. 171, n. 8, p. 809–817, 2010.

LIU, Y. et al. The relationship between nitrogen, auxin and cytokinin in the growth regulation of rice (*Oryza sativa* L.) tiller buds. **Australian Journal of Crop Science**, v. 5, n. 8, p. 1019–1026, 2011.

MENDES, C. dos A. et al. Análise de associação quanto à produtividade e seus caracteres componentes em linhagens e cultivares de arroz de terras altas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 49, n. 10, p. 771–782, 2014.

MONAKHOVA, O. F.; CHERNYAD'EV, I. I. A protector effect of cytokinin preparations on the photosynthetic apparatus of wheat plants under water deficiency conditions. **Applied Biochemistry and Microbiology**, v. 43, n. 6, p. 641–649, 2007.

NASCENTE, A. S.; CRUSCIOL, C. A. C.; COBUCCI, T. The no-tillage system and cover crops—Alternatives to increase upland rice yields. **European Journal of**

Agronomy, v. 45, p. 124–131, 2013.

OLIVEIRA, C. M. M. **Desenvolvimento e produtividade da cultura do arroz irrigado por aspersão sob diferentes umidades do solo e doses de nitrogênio**. 1995. Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 1995.

PANDEY, S. et al. Overview. In: PANDEY, S. et al. (Ed.). **Rice in the global economy: Strategic research and policy issues for food security**. Los Baños: International Rice Research Institute, 2010. p. 1–12.

PAVLŮ, J. et al. Cytokinin at the Crossroads of Abiotic Stress Signalling Pathways. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 19, n. 8, p. 2450, 2018.

PERES, A. R. et al. Effect of irrigation, rainfed conditions and nitrogen sources on newly released upland rice cultivar (BRS Esmeralda) with greater tolerance to drought stress. **Australian Journal of Crop Science**, v. 12, n. 07, p. 1072–1081, 2018.

PINHEIRO, B. D. S.; CASTRO, E. da M. de; GUIMARÃES, C. M. Sustainability and profitability of aerobic rice production in Brazil. **Field Crops Research**, v. 97, n. 1, p. 34–42, 2006.

PINHEIRO, B. S. et al. Tipo de planta, regime hídrico e produtividade do arroz de sequeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 20, n. 1, p. 85–87, 1985.

PINHEIRO, B. S.; MARTINS, J. F. S.; ZIMMERMANN, F. J. P. Índice de área foliar e produtividade do arroz de sequeiro. II. Manifestação através dos componentes da produção. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 25, n. 6, p. 873–879, 1990.

PRASAD, R. Aerobic Rice Systems. **Advances in Agronomy**, v. 111, p. 207–247, 2011.

SAITO, K. et al. Towards a better understanding of biophysical determinants of yield gaps and the potential for expansion of the rice area in Africa. In: WOPEREIS, M. C. S. et al. (Ed.). **Realizing Africa's rice promise**. Wallingford: CAB International, 2013. p. 188–2013.

SAITO, K. et al. Progress in varietal improvement for increasing upland rice productivity in the tropics. **Plant Production Science**, v. 21, n. 3, p. 145–158, 2018.

SONG, W. et al. Increased photosynthetic capacity in response to nitrate is correlated with enhanced cytokinin levels in rice cultivar with high responsiveness to nitrogen nutrients. **Plant and Soil**, v. 373, n. 1–2, p. 981–993, 2013.

STONE, L. F. et al. Adubação nitrogenada em arroz sob irrigação suplementar por aspersão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 34, n. 6, p. 927–932, 1999.

STONE, L. F.; LIBARDI, P. L.; REICHARDT, K. Deficiência hídrica, vermiculita e cultivares I. Efeito na produtividade do arroz. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 19, n. 6, p. 695–707, 1984.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 858 p.

VAN OORT, P. A. J. et al. Can yield gap analysis be used to inform R&D prioritisation? **Global Food Security**, v. 12, p. 109–118, 2017.

XU, G. et al. Hormonal changes are related to the poor grain filling in the inferior spikelets of rice cultivated under non-flooded and mulched condition. **Field Crops Research**, v. 101, n. 1, p. 53–61, 2007.

YANG, J. et al. Hormonal Changes in the Grains of Rice Subjected to Water Stress during Grain Filling. **Plant physiology**, v. 127, n. 1, p. 315–323, 2001.

YOSHIDA, S. Fundamentals of rice crop science. **Growth and development of the rice plant**, Los Baños: International Rice Research Institute, 1981. p. 268.

ZHANG, H. et al. Involvement of cytokinins in the grain filling of rice under alternate wetting and drying irrigation. **Journal of Experimental Botany**, v. 61, n. 13, p. 3719–3733, 2010.