



**AMANDA MENDES DE MOURA**

**PHENOTYPING AND DROUGHT TOLERANCE IN UPLAND  
RICE**

**LAVRAS - MG  
2022**

**AMANDA MENDES DE MOURA**

**PHENOTYPING AND DROUGHT TOLERANCE IN UPLAND RICE**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Fitotecnia, área de concentração em Produção Vegetal, para a obtenção do título de Doutor.

Profa. Dra. Flávia Barbosa Silva Botelho  
Orientadora

**LAVRAS – MG**  
**2022**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca  
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Moura, Amanda Mendes de.

Phenotyping and drought tolerance in upland rice / Amanda  
Mendes de Moura. - 2021.

78 p. : il.

Orientador(a): Flávia Barbosa Silva Botelho.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2021.

Bibliografia.

1. *Oryza sativa*. 2. Estresse abiótico. 3. Melhoramento genético.

I. Botelho, Flávia Barbosa Silva. II. Título.

**AMANDA MENDES DE MOURA**

**PHENOTYPING AND DROUGHT TOLERANCE IN UPLAND RICE**  
**FENOTIPAGEM E TOLERÂNCIA A SECA EM ARROZ DE TERRAS ALTAS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Fitotecnia, área de concentração em Produção Vegetal, para a obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 31 de agosto de 2021.

Dr. Adriano Pereira de Castro	EMBRAPA
Dra. Isabela Volpi Furtini	EMBRAPA
Dr. Sebastião Márcio de Azevedo	UFLA
Dr. Vinícius Quintão Carneiro	UFLA

Profa. Dra. Flávia Barbosa Silva Botelho  
Orientadora

**LAVRAS – MG**  
**2022**

## AGRADECIMENTOS

À Deus, pela minha vida e pela bondade e misericórdia em ter colocado pessoas tão queridas ao longo da minha jornada.

Aos meus pais pelo amor incondicional, pela minha educação, valores e ensinamentos que proporcionaram eu chegar até aqui. E aos meus irmãos pelo amor, amizade e irmandade ao longo de toda a minha vida.

À minha orientadora Flávia, que sempre foi mais que uma orientadora, tornou-se uma amiga, confidente, sempre otimista que nunca desistiu e sempre lutou por mim. A essa profissional que tanto me ensinou e treinou e sempre foi exemplo de ética, dedicação, profissionalismo e empatia. Faltarão linhas para descrever o quanto eu sou grata por tudo que fez e continua fazendo por mim. A ti meu eterno carinho, amizade, gratidão e admiração.

Aos meus amigos, que tanto dividiram as minhas alegrias e estiveram comigo nos momentos das maiores tristezas. Que nunca me deixaram desistir e sempre me encorajaram a me manter forte em busca do meu sonho. Vocês foram a minha família fora de casa e sempre serão meu segundo lar, onde quer que eu esteja.

Ao grupo de pesquisa Melhor Arroz UFLA, fonte de grandes amizades, foram seis anos de companheirismo, apoio e união. Sem a ajuda de todos vocês esse trabalho não seria possível.

Ao pesquisador Dr. Adriano Pereira de Castro pelo grande apoio na realização dos experimentos a campo, por todas as orientações e exemplo profissional e À Embrapa Arroz e Feijão, especialmente à equipe do Melhoramento de Arroz de Terras Altas por todo o apoio na condução dos meus experimentos, pela simpatia e acolhimento. À EPAMIG pelo auxílio na execução dos experimentos.

A toda a equipe da EMATER-GO que auxiliou na condução dos experimentos em Porangatu.

À Universidade Federal de Lavras, especialmente ao Programa de Fitotecnia/Agronomia, funcionários e professores, que foram tão importantes para a minha formação.

À FAPEMIG pela concessão de bolsa nível doutorado no país e fomento para a realização deste trabalho, à Capes, pela concessão da bolsa de doutorado no exterior e ao CNPq pelo fomento para a realização deste trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG).

*“The greater the difficulty the more glory in surmounting it.  
Skillful pilots gain their reputation from storms and tempests.” (Epictetus)*

## RESUMO

O estresse por déficit hídrico tem sido considerado um dos maiores riscos para a segurança alimentar e a sustentabilidade para a cultura do arroz em todo o mundo. Porém, tolerância ao déficit hídrico é considerada uma característica complexa e os experimentos envolvendo este tipo de avaliação são de difícil condução. Para a recomendação de genótipos com maior tolerância é necessário que a avaliação, destes, seja feita em um número grande de ambientes, associando diferentes condições hídricas, locais e anos agrícolas. Entretanto, a maioria dos estudos envolvendo multi-ambientes leva em consideração apenas um caráter, o que pode tornar a recomendação de genótipos menos eficiente. Assim, este trabalho, dividido em dois enfoques, teve como objetivo a fenotipagem e o estudo do comportamento agrônômico de genótipos de arroz, cultivados em ambientes de terras altas com e sem estresse hídrico, bem como a identificação de genótipos com tolerância ao déficit hídrico, utilizando diferentes técnicas de avaliação. E estudar a estabilidade associada ao alto desempenho produtivo para multi-caracteres destes genótipos em ambientes com diferentes condições hídricas utilizando-se a metodologia WAASB. Foram avaliadas três cultivares testemunhas, Douradão, BRS Esmeralda e BRS Soberana, e 22 linhagens contrastantes pertencentes ao cruzamento entre BRS Soberana e Douradão, cultivares com diferentes respostas à tolerância ao déficit hídrico. Os experimentos foram realizados em dois locais, em Lavras-MG e Porangatu-GO, sudeste e centro-oeste do Brasil, em dois anos agrícolas consecutivos. Em cada ano, os experimentos foram realizados em duas condições hídricas, condição hídrica favorável (WWC) e condição de estresse hídrico na fase reprodutiva (WSC). No primeiro estudo, foram avaliadas nove características: produtividade de grãos (GY), número de dias para o florescimento (DF), altura das plantas (PH), peso de 1000 grãos (GW), número de espiguetas por panícula (SP), taxa de esterilidade de espiguetas (SS), comprimento da folha da bandeira (FLL), largura da folha da bandeira (FLW) e relação comprimento e largura da folha da bandeira (FLR). O estresse aplicado foi considerado severo, resultando em redução de 67% da produtividade de grãos em condição de estresse hídrico. Verificou-se que GY e SS foram os caracteres mais afetados pelo déficit hídrico e devem ter o maior peso durante a seleção para tolerância à seca. Além disso, foi possível a associação entre genótipos que combinaram alta produtividade e tolerância à seca. Douradão, BRS Esmeralda e as linhagens 19, 15, 6, 3 e 5 foram considerados as mais tolerantes e se apresentam como candidatas a parentais para o programa de melhoramento visando a tolerância à seca. Já no segundo estudo, foram avaliados os caracteres: GY, DF, SP, SS e GW. E a metodologia WAASB mostrou-se útil para a seleção visando multi características e indicou que Douradão e as linhagens 2, 21 e 11 foram os genótipos com maior estabilidade associados à um maior desempenho fenotípico para o conjunto de caracteres em ambientes com e sem estresse ao déficit hídrico.

**Palavras-chave:** *Oryza sativa*. Estresse abiótico. Melhoramento genético. Produtividade de grãos.

## ABSTRACT

Drought stress has been considered one of the greatest risks to food security and sustainability for the rice crop worldwide. However, tolerance to this stress is considered complex and trails involving this trait are difficult to conduct. Furthermore, to recommend genotypes with greater tolerance, it is necessary evaluations be carried out in a large number of environments, associating different water conditions, locations and agricultural years. Is common in studies involving multi-environment with this propose only use one trait for evaluation, which can lead to a less efficient genotype recommendation. Thus, this work, divided into two parts, aimed to phenotyping and study of the agronomic behavior of rice genotypes, cultivated in upland environments with stress and non-stress conditions, further, the identification of genotypes with drought tolerance, using different index. Moreover, conduct a study of stability associated with high productive performance for multi-traits and multi-environments using the WAASB method. It was evaluated three cultivars chekcs, Douradão, BRS Esmeralda and BRS Soberana, and 22 contrasting lines of a cross between BRS Soberana and Douradão, cultivars with different responses to tolerance to water deficit. The trails were carried out in two locations, in Lavras-MG and Porangatu-GO, Southeast and Midwest of Brazil, in two consecutive agricultural years. for each year, the experiments were carried out under two water conditions, well water conditions (WWC) and drought stress condition during reproductive phase (WSC). In the first study, nine characteristics were evaluated: grain yield (GY), number of days to flowering (DF), plant height (PH), 1000-grains weight (GW), number of spikelets per panicle (SP), spikelet sterility ratio (SS), flag leaf length (FLL), flag leaf width (FLW) and flag leaf length to width ratio (FLR). The stress applied during the reproductive growth stage was classified as severe, resulting in a 67% grain yield reduction in water stress conditions. GY and SS were the characters most affected by water deficit and should have the greater consideration on selection for drought tolerance. In addition, it was possible to associate genotypes that combined high grain yield and drought tolerance. Douradão, BRS Esmeralda and lines 19, 15, 6, 3 and 5 were considered the most tolerant and presented the highest parental candidates for the breeding program for drought tolerance. In the second study, the following characters were evaluated: GY, DF, SP, SS and GW. The WAASB methodology proved to be useful for selection targeting multi-traits and indicated that Douradão and lines 2, 21 and 11 were the ones with greater stability associated with higher performance for set of environments studied.

**Keywords:** *Oryza sativa*. Abiotic stress. Plant breeding. Grain yield.



## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1</b> .....	10
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	11
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	13
<b>2.1 Importância do arroz de terras altas no Brasil</b> .....	13
<b>2.2 Melhoramento genético do arroz de terras altas visando tolerância ao déficit hídrico</b> .....	15
<b>2.3 Adaptabilidade e estabilidade e interação GxA no melhoramento</b> .....	18
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	20
<b>CAPÍTULO 2 UPLAND RICE PHENOTYPING AND SELECTION FOR DROUGHT TOLERANCE</b> .....	25
<b>1 INTRODUCTION</b> .....	26
<b>2 MATERIALS AND METHODS</b> .....	28
<b>2.1 Locations</b> .....	28
<b>2.2 Germoplasm</b> .....	28
<b>2.3 Field trails description</b> .....	28
<b>2.4 Traits evaluated</b> .....	29
<b>2.5 Data analysis</b> .....	30
<b>2.5.1 Mathematical formulation</b> .....	31
<b>2.5.2 Drought Tolerance Index (DTI)</b> .....	32
<b>2.5.3 Classification chart for drought tolerance response</b> .....	33
<b>2.5.4 Coincidence index estimates (CI)</b> .....	33
<b>2.5.5 Pearson and Spearman correlation</b> .....	33
<b>3 RESULTS</b> .....	33
<b>4 DISCUSSION</b> .....	39
<b>5 CONCLUSION</b> .....	44
<b>REFERENCES</b> .....	44
<b>ANNEX A</b> .....	49
<b>APPENDIX A</b> .....	50
<b>CAPÍTULO 3 – ESTABILIDADE E DESEMPENHO FENOTÍPICO DE ARROZ DE TERRAS ALTAS SUBMETIDOS AO DÉFICIT HÍDRICO UTILIZANDO ÍNDICE PARA MÚLTIPLAS CARACTERÍSTICAS</b> .....	54
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	55
<b>2 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	57
<b>2.1 Locais</b> .....	57
<b>2.2 Germoplasma</b> .....	57

<b>2.3</b>	<b>Descrição dos Experimentos</b> .....	<b>57</b>
<b>2.4</b>	<b>Análise de Dados</b> .....	<b>59</b>
<b>3</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>61</b>
<b>4</b>	<b>DISCUSSÃO</b> .....	<b>66</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>69</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>69</b>
	<b>ANEXO A</b> .....	<b>72</b>
	<b>APÊNDICE A</b> .....	<b>73</b>

## CAPÍTULO 1

## 1 INTRODUÇÃO

Um dos grandes desafios do século é o incremento na produção de alimentos, empregando em menor área e com melhor aproveitamento dos recursos, principalmente o que se diz respeito à água (JUNG *et al.*, 2021). À medida que a população mundial aumenta, os efeitos das mudanças climáticas se intensificam e a crescente escassez desse recurso torna-se um desafio para o desenvolvimento sustentável (FAO, 2017).

O arroz é uma cultura chave na segurança alimentar mundial, sendo alimento base para mais de 3,5 bilhões de pessoas em todo o mundo. O Brasil é o principal produtor fora da Ásia (FAO, 2021) e possui dois principais sistemas de produção da cultura, o arroz de terras altas e terras baixas. O arroz de terras altas, ressalta-se como uma importante alternativa para a produção do cereal no país com maior sustentabilidade econômica e ecológica (CARVALHO *et al.* 2020). Entretanto, o melhoramento genético de arroz de terras altas ainda precisa superar alguns desafios, como a consolidação da cultura nos diferentes sistemas de produção de grãos e desenvolvimento de cultivares menos sensíveis aos estresses bióticos e abióticos.

Dentre os estresses abióticos, o estresse por déficit hídrico é considerado o mais nocivo para o desenvolvimento das plantas (ZHU, 2016; HU e XIONG, 2014). O arroz pode ter sua produtividade severamente reduzida devido aos efeitos pelo déficit hídrico, principalmente quando este afeta a fase reprodutiva da cultura (KUMAR *et al.*, 2020). Assim, a tolerância à seca com ampla adaptação às adversidades climáticas deve ser considerada como uma estratégia para a manutenção e expansão do cultivo do arroz.

Os experimentos envolvendo déficit hídrico são complexos e de difícil condução, além disso, para produtividade de grãos nota-se baixa herdabilidade para o caráter. Assim, é importante, na seleção, a associação de características secundárias que permitam uma avaliação mais fácil e ou ágeis associadas à alta herdabilidade (BABU *et al.* 2003). Castro *et al.* (2013) ressaltam ainda, que a tolerância à seca deve estar associada à alta performance quando sob condições adequadas de água.

No arroz, a maioria dos caracteres avaliados é de ordem quantitativa e possuem herança poligênica sendo muito influenciados pelo ambiente. A presença da interação pode dificultar a seleção de genótipos superiores, uma vez que, o valor genotípico de um determinado caráter varia dependendo do ambiente. Assim, faz-se necessário a avaliação desses genótipos em diferentes condições ambientais, associando ampla adaptabilidade e estabilidade dos materiais ao longo dos ambientes (MANUKYAN *et al.*, 2019; STRECK *et al.*, 2018).

Olivoto *et al.* (2019a) propuseram um novo modelo chamado WAASB para melhor caracterização dos genótipos ideais com base na estabilidade e no desempenho fenotípico. Este modelo é uma combinação dos recursos do AMMI (Additive Main Effects and Multiplicative Interaction Analyses) e BLUP (Best Linear Unbiased Prediction) em um único índice. Uma vantagem da utilização deste método diz respeito às informações utilizadas para compor às análises. Na maioria dos métodos, utilizam-se informações de apenas um caráter e, ao se utilizar este método, as informações dos multi-caracteres são levadas em consideração para a seleção, fato que auxilia, sobremaneira, a recomendação de genótipos com superiores desempenhos fenotípicos.

Neste trabalho serão apresentados dois estudos, o primeiro envolvendo genótipos de arroz de terras altas contrastantes para a tolerância à seca, submetidos a diferentes condições hídricas, visando fenotipar e estudar o comportamento agrônômico, bem como a identificação de linhagens tolerantes ao déficit hídrico. O segundo estudo, objetivou-se estimar a estabilidade desses genótipos conduzidos em ambientes divergentes para estresse por déficit hídrico e a adaptabilidade, empregando análises com avaliação de múltiplas características.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Importância do arroz de terras altas no Brasil

O arroz (*Oryza sativa* L.) desempenha um papel fundamental na nutrição e cultura humana há pelo menos 10.000 anos (STEIN *et al.*, 2018). Este cereal possui uma rica diversidade que permite sua produção em uma gama de locais e sob diferentes condições ecológicas e geográficas, com o cultivo da latitude 40° Sul à 53° Norte e em mais de 100 países no mundo (CHANG, 2003).

A cultura insere como fonte primária da dieta de mais da metade da população mundial (FAO, 2017). Fornecendo 20% da energia na dieta global per capita, sendo ainda fonte de proteínas, gorduras, vitaminas e sais minerais (NIKAM *et al.*, 2014). A produção mundial do arroz em 2019 atingiu marco de mais de 500 milhões de toneladas e seu consumo per capita é de aproximadamente 54kg.ano/hab, com projeções para uma crescente demanda do consumo desde cereal (FAO, 2021; USDA, 2021).

Tanto a estabilidade quanto à sustentabilidade da produção de arroz é um assunto de segurança alimentar mundial. O arroz tem importância muito relevante principalmente em países subdesenvolvidos. Nestes países, a cultura pode influenciar diretamente na renda, saúde, no meio ambiente e bem-estar social, como no caso do Brasil, uma vez que é considerado, juntamente com o feijão, a base da dieta dos brasileiros (SILVA; WANDER, 2014).

O Brasil corresponde ao maior produtor de arroz fora da Ásia, com produção na safra 2020/21 de aproximadamente 11,8 milhões de toneladas de arroz em casca, em uma área de 1,7 milhões de hectares, com rendimento de 7,0 toneladas por hectare. O consumo per capita oscila entre 40 a 60 kg.ano/hab, dependendo da região do país (CONAB, 2021).

A cultura no país é dividida em dois principais ecossistemas de produção denominados de terras baixas (também conhecido como irrigado) e terras altas (arroz de sequeiro). A maior parcela da produção nacional é proveniente de terras baixas, sendo a região Sul responsável por 83% da produção nacional do grão, com destaque para o Rio Grande do Sul e Santa Catarina. O arroz de terras altas corresponde a aproximadamente 30% da área plantada no Brasil (CONAB, 2021). Este sistema de cultivo caracteriza-se por cultivo aeróbico, sem inundação e por ter suas necessidades hídricas atendidas pela precipitação pluvial ou, de forma suplementar, pela irrigação por aspersão.

O arroz de terras altas é cultivado na Ásia, África e na América Latina (MACLEAN; DAWES; HETTEL, 2002). No Brasil, esse sistema de cultivo encontra-se de sobremaneira nas

regiões de cerrado, sendo os estados do Mato Grosso e Maranhão os principais produtores (CONAB, 2021). Segundo Guimarães *et al.* (2006), a instabilidade climática durante o período do cultivo, e a ocorrência de doenças, principalmente a brusone (*Magnaporthe grisea*), têm contribuído para a baixa produção da cultura em terras altas. A média nacional nesse sistema de cultivo é de 2,5 t ha<sup>-1</sup>, bem inferior ao sistema irrigado, que possui produtividade média de 7,9 t ha<sup>-1</sup> em nível nacional (CONAB, 2021).

Segundo Villar *et al.* (2005), há uma heterogeneidade tecnológica na condução do arroz de terras altas, podendo variar de um baixo nível tecnológico até áreas com alta tecnologia. Quando manejada adequadamente a cultura do arroz de terras altas é capaz de atingir produtividades acima de 5 t ha<sup>-1</sup> (GUIMARÃES; FAGERIA; BARBOSA FILHO, 2001; INÁCIO *et al.*, 2018; TOMÉ *et al.*, 2019). Além disso, nota-se que nos últimos anos houve um incremento na produtividade média em sistema de terras altas de 32%, comparado a apenas 19% em terras baixas (CARVALHO *et al.*, 2020). O cultivo de arroz de terras altas possui inúmeras vantagens em relação ao sistema irrigado como, por exemplo, a diluição de custos, utilização de áreas com solos de baixa fertilidade e menores investimentos iniciais (DHARMAPPA *et al.*, 2019; VILLAR *et al.*, 2005).

Ainda, condições aeróbicas, no qual o arroz de terras altas é cultivado, possui menor acúmulo de arsênio (As) nos grãos do que em cultivo anaeróbico, com concentrações 10 a 15 vezes menores. Isso porque, as condições de solo inundado são propícias para a mobilização de As nas plantas (XU *et al.*, 2008). Este elemento químico é classificado como um metal pesado tóxico e cancerígeno, o qual em altos níveis e com uma exposição em longo prazo podem levar a danos no sistema nervoso, vasos sanguíneos e ao câncer nos seres humanos (DI *et al.*, 2021; DUAN *et al.*, 2017). O arroz é uma importante fonte de ingestão de arsênio inorgânico, principalmente em populações cujo arroz se insere como alimento básico, como no caso do Brasil (HU *et al.*, 2015; XU *et al.*, 2017). Desta forma, a redução de acúmulo de As é um assunto de extrema importância de segurança e saúde pública (DUAN *et al.*, 2017).

Outra vantagem do cultivo em terras altas diz respeito a não contribuição para a emissão de metano (CH<sub>4</sub>). O metano é produzido em condições anaeróbicas associadas a solos inundados. Esse é um gás de efeito estufa, o qual é uma das principais causas do aquecimento global e das mudanças climáticas. O cultivo de arroz irrigado é uma fonte de metano e contribui atualmente com 11% da emissão global. Anualmente, no Brasil, o arroz inundado contribui com a emissão de aproximadamente 460 mil toneladas do gás (BRASIL, 2019; RUNKLE *et*

*al.*, 2019; SETYANTO *et al.*, 2018). Dessa forma, a ampliação da produção pelo sistema de terras altas pode contribuir para a mitigação desse cenário.

Segundo Carvalho *et al.* (2020) é de extrema importância a expansão do cultivo de arroz de terras altas a fim de favorecer uma melhor distribuição da produção com menor risco à segurança alimentar. Visto, pois, esta produção encontra-se hoje concentrada na região Sul do país e sujeita a vulnerabilidades ambientais que, porventura, podem afetar o abastecimento interno. Além disso, a descentralização da produção também proporcionaria vantagens logísticas ao aproximar a produção das regiões consumidoras no país.

Outra vantagem diz respeito ao uso da água, o cultivo de arroz irrigado chega a requerer 3000 a 5000 L de água para a produção de 1 kg do grão. Em nível global, 70 a 80% da água potável é usada na agricultura e somente o arroz utiliza 85% dessa água (PATHAK *et al.*, 2011). Sendo imprescindível cada vez mais a utilização de cultivares e sistemas produtivos mais eficientes no uso da água.

Diante do exposto, o arroz em sistema de terras altas é uma importante alternativa para a segurança alimentar, com maior sustentabilidade econômica e ecológica à produção da cultura. Para isto, o melhoramento genético ainda precisa superar alguns desafios, como a consolidação da cultura nos diferentes sistemas de produção de grãos e desenvolvimento de cultivares menos sensíveis a estresses bióticos e abióticos.

## **2.2 Melhoramento genético do arroz de terras altas visando tolerância ao déficit hídrico**

Dentre os fatores que interferem nas estimativas de produtividade das culturas, os estresses abióticos apresentam grande relevância, principalmente, a ocorrência de déficit hídrico. O déficit hídrico pode ser considerado o estresse abiótico mais nocivo ao crescimento e desenvolvimento das plantas e, conseqüentemente, à produtividade de grãos (BOYER, 1982; HU; XIONG, 2014; TOKER *et al.*, 2007; ZHU, 2016). Por sua vez, o déficit hídrico é causado pela ausência de precipitação ou ao regime irregular com períodos de seca ao longo do ciclo da cultura, também conhecidos como veranicos.

Estes veranicos são comuns em regiões tropicais e podem promover prejuízos consideráveis na agricultura. Além disso, a gestão de recursos hídricos e os impactos relacionados às mudanças climáticas, provavelmente, tornarão ainda mais grave os prejuízos ocasionados por déficit hídrico nos próximos anos (FANG; XIONG, 2015; STOCKER *et al.*, 2014).



Entretanto, as respostas das plantas a essas condições são variáveis e dependem de uma série de fatores, como: espécie, genótipo, tempo e grau de exposição ao estresse, dentre outras características (NASCIMENTO *et al.*, 2011). O melhoramento de plantas visando à tolerância à seca é considerado complexo, uma vez que, há certa dificuldade em se estabelecer quais os mecanismos da planta estão envolvidos no processo, uma vez que se abrangem mudanças bioquímicas, fisiológicas e morfológicas das plantas (FANG; XIONG, 2015; HADIARTO; TRAN, 2011; ZU *et al.*, 2016).

Diversos processos fisiológicos das plantas podem ser afetados com o estresse, como: aceleração da senescência e abscisão foliar; fechamento estomático; e redução da transpiração. Estes processos dificultarão a difusão de CO<sub>2</sub> ao cloroplasto e, por consequência, diminuirão a taxa fotossintética, refletindo na produtividade de grãos (GERIK *et al.* 1996; PINHEIRO; CHAVES, 2011; TAIZ *et al.*, 2017; ZU, 2016).

Cattivelli *et al.* (2008) citam ainda que as modificações nas estruturas das raízes para maior eficiência na absorção de água e conservação desta no sistema; a capacidade fotossintética; o tempo das fases fenológicas da cultura; a disponibilidade de amido durante o desenvolvimento do ovário e do embrião; a permanência da coloração verde; área foliar total; a profundidade e densidade do enraizamento; e mobilização de reservas das hastes, são outras das características morfofisiológicas importantes para a tolerância a seca.

Para Min-Thu *et al.* (2018) o tempo até o florescimento é uma das estratégias-chave de ajuste das plantas nesses casos. Isso porque, reflete significativamente no sucesso reprodutivo dos indivíduos frente às diversidades e condições climáticas. Esse mecanismo de sobrevivência é denominado escape ao estresse hídrico e é definido como a antecipação do florescimento pelas plantas face ao estresse hídrico, completando assim, o seu ciclo antes das condições adversas serem fatais (RIBONI *et al.*, 2013).

Uma planta poderá ser mais eficiente também ao possuir maior remobilização de suas reservas das hastes para o enchimento de grãos. Isso porque compensaria a redução da taxa fotossintética causada pelo estresse (BLUM, 2005; SLAFER *et al.*, 2005). Além disso, os genótipos mais tolerantes tendem a permanecer verdes por mais tempo (*stay-green*), de forma a prolongar a atividade fotossintética e o enchimento de grãos, atrasando a senescência de folhas. Essa característica estaria relacionada à sinalização da citocinina, suprimindo os sinais de produção de etileno, ácido abscísico e outros fitohormônios relacionados (KUSABA; TANAKA; TANAKA, 2013; SERBA; YADAV, 2016).

Um dos conceitos de tolerância à seca associa-se à capacidade pela planta em produzir mesmo sob condições de déficit hídrico (BLUM, 2005), desta forma, o rendimento de grãos sem dúvida é o caráter primário durante a seleção. Porém não existe apenas uma única característica a ser observada como indicativa da tolerância à seca.

Outro ponto a ser considerado ao se trabalhar com tolerância ao déficit hídrico é a dificuldade na realização de experimentos em campo envolvendo essa característica. Isso porque esses experimentos são normalmente onerosos e difícil de condução, devido à grande variação na quantidade e distribuição das chuvas, levando muitas vezes a uma incapacidade de controlar o tempo e a intensidade do estresse. Isso torna esses experimentos restritos e muito dependentes das características edafoclimáticas dos locais de condução (FAN *et al.*, 2015; KOECH *et al.*, 2019; RIBAUT *et al.*, 1997). Mohammadi, Ceccarelli e Naghavi (2006) apontam também que há dificuldade em se identificar o nível crítico de água que proporciona o estresse, visto que, este nível é variável com a espécie, localização geográfica e fase de desenvolvimento da cultura.

Uma estratégia que pode ser utilizada é a criação de populações segregantes entre parentais tolerantes e parentais com alto potencial produtivo, fazendo-se a seleção direta das progênes em ensaios em condições ideais e estressados concomitantemente e utilizando níveis de estresse capazes de reduzir a produtividade de grãos em torno de 65 a 85% em relação ao ambiente sem estresse (KUMAR *et al.*, 2008). Pela dificuldade envolvendo experimentos de campo com déficit hídrico e a baixa herdabilidade do caráter produtividade de grãos, faz-se necessário a utilização de alternativas pelos programas de melhoramento na avaliação destes experimentos, como, por exemplo, a utilização de caracteres secundários para a seleção (BABU *et al.* 2003).

Segundo Edmeades, Bolanos e Chapman (1997) esses caracteres secundários devem apresentar alguns requisitos, como por exemplo: ser geneticamente variáveis e geneticamente correlacionados ao rendimento de grãos; possuírem alta herdabilidade; serem de fácil medição; que possam ser observados antes e ou durante o florescimento; e que forneçam uma boa estimativa prévia do potencial de produção. ZU *et al.* (2017) comentam que métodos de avaliação que sejam simples e acurados para avaliação e distinção de genótipos tolerantes são atualmente a chave para o sucesso no melhoramento visando tolerância à seca em arroz de terras altas. TERRA *et al.* (2015) observaram ainda que a esterilidade de espiguetas é também uma variável importante a ser considerada durante a seleção em ambientes com ou sem estresse ao déficit hídrico.

Assim, o melhoramento visando à tolerância a seca e o desenvolvimento de genótipos resilientes com ampla adaptação às adversidades climáticas devem ser considerados com uma das mais promissoras estratégias para a manutenção e expansão do cultivo do arroz em sistema de terras altas, auxiliando na manutenção da produção de arroz no Brasil e no mundo.

### **2.3 Adaptabilidade e estabilidade e interação GxA no melhoramento**

O fenótipo de um caráter é o resultado dos efeitos ambientais, genéticos como também da interação entre eles. A resposta não coincidente de um determinado indivíduo em diferentes ambientes é devido à existência do efeito da interação Genótipos x Ambientes (GxA) (RAMALHO *et al.*, 2012). Interação GxA é, então, compreendida como a variação do comportamento de um determinado genótipo em diferentes ambientes e geneticamente é explicada devido à influência do ambiente na expressão dos genes relacionados ao caráter (SHARIFI *et al.*, 2017).

Devido à existência da interação GxA, dentro dos programas de melhoramento torna-se essencial a avaliação do comportamento dos genótipos às variações do ambiente (COLOMBARI *et al.*, 2013), isso porque, a essa interação pode afetar nos ganhos genéticos e na recomendação e seleção dos genótipos, uma vez que o valor genotípico de um determinado caráter pode flutuar dependendo do ambiente (NAMORATO *et al.*, 2009).

Diferentes estratégias para minimizar o problema relacionados à presença da interação GxA têm sido propostas. A primeira delas, segundo Ramalho *et al.* (2012), é a identificação de cultivares específicas para cada ambiente. O grande entrave na utilização desta estratégia diz respeito a esta alternativa ser restrita a apenas algumas situações e não seria indicada para grande parte das culturas anuais atualmente.

Uma segunda proposta seria a utilização de zoneamento e estratificação dos ambientes e, neste caso, os ambientes seriam avaliados e agrupados em zonas ou sub-regiões. Neste caso, a recomendação seria feita não mais para cada ambiente em específico, mas para um conjunto de ambientes. E, por fim, uma terceira proposta seria a utilização de cultivares com maior estabilidade fenotípica, isto é, que ao longo dos diferentes ambientes sua média fenotípica não varie ou que essa variação seja de baixa magnitude (RAMALHO *et al.*, 2012).

Embora a estabilidade seja desejável, um genótipo apresentar-se estável não é garantia de superioridade fenotípica. Isto, porque, esse genótipo se manterá pouco variável independente do ambiente. Desta forma, dada às melhorias nas condições ambientais o genótipo se manterá

estável ou, em outras palavras, não responsivo. No melhoramento de plantas essa situação pode ser uma desvantagem. Pois se espera que, a exemplo do caráter produtividade de grãos, um genótipo venha a produzir em ambientes adversos, porém ao ser introduzido em um ambiente favorável deseja-se que este genótipo produza concomitantemente às melhorias do ambiente. Em outras palavras, que este possua plasticidade fenotípica. Neste caso, além de estável é necessário que os genótipos sejam também adaptados (MANUKYAN *et al.*, 2019).

Assim, diferentes metodologias foram propostas para estudar a adaptabilidade e estabilidade ao longo do tempo, dentre elas, Olivoto *et al.* (2019a) propuseram um novo modelo chamado WAASB (Weighted Average of Absolute Scores) para melhor caracterização genótipos ideais com base na estabilidade e no desempenho fenotípico. Este modelo é uma combinação dos recursos do AMMI (Additive Main Effects and Multiplicative Interaction Analyses) e BLUP (Best Linear Unbiased Prediction) em um único índice.

O AMMI é uma técnica de análise multivariada que se baseia na estimação dos efeitos de ambientes e genótipos por meio de análise de variância (efeitos aditivos), e utilizando de análise de componentes principais, faz-se a análise de efeitos multiplicativos, sendo este a interação GxA (DUARTE; VENCOVSKY, 1999). Entretanto a natureza dos efeitos no modelo AMMI são fixas.

A proposta apresentada por Olivoto *et al.* (2019a), permite que se use fatores de efeito fixo e aleatório em um mesmo modelo, por meio de modelos mistos lineares (LMM) e estimativa dos valores genotípicos preditos (BLUP's). AMMI e BLUP já são duas técnicas comumente utilizadas para a análise de experimentos multi-ambientes, porém de maneira separada (OLIVOTO *et al.*, 2019b), o que se sugere pelos autores é utilizar das vantagens de cada uma em uma única metodologia. Além disso, a maioria dos métodos utiliza-se de informações de apenas um caráter e, já neste modelo, pelo índice de MTSI (Multi-trait stability index) as informações de todos os caracteres são levadas em consideração para a seleção.

No arroz, existem poucos trabalhos envolvendo esta técnica (HUANG *et al.*, 2021; SHARIFI *et al.*, 2020), e não há ainda relatos deste estudo em genótipos de arroz de terras altas. Desta forma, por todas as vantagens apresentadas, esta técnica pode ser considerada uma ferramenta com alta utilidade para os melhoristas, sobretudo na cultura do arroz de terras altas.

## REFERÊNCIAS

- BABU, R.C. *et al.* Genetic analysis of drought resistance in rice by molecular markers: association between secondary traits and field performance. **Crop Science**, v. 43, n. 4, p. 1457-1469, 2003.
- BLUM, A. Drought resistance, water-use efficiency, and yield potential—are they compatible, dissonant, or mutually exclusive?. **Australian Journal of Agricultural Research**, v. 56, n. 11, p. 1159-1168, 2005.
- BOYER, J. S. Plant productivity and environment. **Science**, v. 218, n. 4571, p. 443-448, 1982.
- BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. Secretaria de Políticas para a Formação e Ações Estratégicas. Coordenação-Geral do Clima. **Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil - Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, 71 p. 2019.**
- CARVALHO, M. T. *et al.* O arroz de terras altas como estratégia para segurança alimentar, intensificação ecológica e adaptação à mudança do clima: rumo aos objetivos de desenvolvimento sustentável para o milênio. **Embrapa Arroz e Feijão-Comunicado Técnico (INFOTECA-E)**, 2020.
- CASTRO, A. P. *et al.* Avaliação de cultivares de arroz (*Oryza sativa*) de terras altas quanto à deficiência hídrica. In: **Embrapa Arroz e Feijão-Artigo em anais de congresso (ALICE)**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MELHORAMENTO DE PLANTAS, 7., 2013, Uberlândia. Variedade melhorada: a força da nossa agricultura: anais. Viçosa, MG: SBMP, 2013., 2013.
- CATTIVELLI, L. *et al.* Drought tolerance improvement in crop plants: An integrated view from breeding to genomics. **Field Crops Research**, v. 105, p. 1-14.
- CHANG, T. T. Origin, domestication, and diversification. In: **Rice: Origin, History, Technology, and Production**. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ.3–25, 2003.
- COLOMBARI, J. M. F. *et al.* Upland rice breeding in Brazil: a simultaneous genotypic evaluation of stability, adaptability, and grain yield. **Euphytica**, v. 192, n. 1, p. 117-129, 2013.
- CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**, v. 8 – Safra 2021/21, n. 10 – Décimo Levantamento, jul. 2021.
- DHARMAPPA, P. M., *et al.* Introgression of root and water use efficiency traits enhances water productivity: An evidence for physiological breeding in rice (*Oryza sativa* L.). **Rice**, v. 12, n. 1, p. 1-14, 2019.
- DUAN, G. *et al.* Genotypic and environmental variations in grain cadmium and arsenic concentrations among a panel of high yielding rice cultivars. **Rice**, v. 10, n. 1, p. 1-13, 2017.
- DUARTE, J.; VENCOSKY, R. (1999). Interação genótipos x ambientes: uma introdução à análise AMMI. **Ribeirão Preto: Sociedade Brasileira de Genética**, 1999.

EDMEADES G. O.; BOLAÑOS J.; CHAPMAN S. C. Value of secondary traits in selecting for drought tolerance in tropical maize. *In: Developing drought and low-n tolerant maize: Book of Abstracts: Symposium; El Batan, Mex.(Mexico); 24-29 Mar, 1996.*

FAN, Y. *et al.* Using QTL mapping to investigate the relationships between abiotic stress tolerance (drought and salinity) and agronomic and physiological traits. **BMC genomics**, v. 16, n. 1, p. 1-11, 2015.

FANG, Y.; XIONG, L. General mechanisms of drought response and their application in drought resistance improvement in plants. **Cellular and molecular life sciences**, v. 72, n. 4, p. 673-689, 2015.

FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. The Future of Food and Agriculture. **Trends and Challenges. Food and Agriculture Organization of the United Nations Rome.**, 2017.

FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS STATISTICS. **Statistics Database**. Disponível em: <<http://faostat.fao.org>.> Acesso em 15 de julho de 2021.

GERIK, T. J. *et al.* Late season water stress in cotton: I. Plant growth, water use, and yield. **Crop science**, v. 36, n. 4, p. 914-921, 1996.

GUIMARÃES, C. M.; FAGERIA, N. K.; BARBOSA FILHO, M. P. Como a planta de arroz de desenvolve. **Arquivo do Agrônomo**, Campinas, n. 13, p.1-12, 2001.

GUIMARÃES, C. M. *et al.* A cultura do arroz no Brasil. Santo Antônio de Goiás: **Embrapa Arroz e Feijão**, p. 53-96, 2006.

HADIARTO, T.; TRAN, L-S. P. Progress studies of drought-responsive genes in rice. **Plant cell reports**, v. 30, n. 3, p. 297-310, 2011.

HU, H.; XIONG, L. (2014). Genetic engineering and breeding of drought-resistant crops. **Annual review of plant biology**, v. 65, p. 715-741, 2014.

HU, P. *et al.* Effects of water management on arsenic and cadmium speciation and accumulation in an upland rice cultivar. **Journal of Environmental Sciences**, v. 27, p. 225-231, 2015.

HUANG, X. *et al.* Evaluating Genotype× Environment Interactions of Yield Traits and Adaptability in Rice Cultivars Grown under Temperate, Subtropical and Tropical Environments. **Agriculture**, v. 11, n. 6, p. 558, 2021.

JUNG, J. *et al.* he potential of remote sensing and artificial intelligence as tools to improve the resilience of agriculture production systems. **Current Opinion in Biotechnology**, v. 70, p. 15-22, 2021.

KOECH, R. K. *et al.* Functional annotation of putative QTL associated with black tea quality and drought tolerance traits. **Scientific reports**, v. 9, n. 1, p. 1-11, 2019.

KUMAR, A. *et al.* Breeding for drought tolerance: direct selection for yield, response to selection and use of drought-tolerant donors in upland and lowland-adapted populations. **Field Crops Research**, v. 107, n. 3, p. 221-231, 2008.

KUMAR, S. *et al.* Anatomical, agro-morphological, and physiological changes in rice under cumulative and stage specific drought conditions prevailed in eastern region of India. **Field Crops Research**, v. 245, p. 107658, 2020.

KUSABA, M.; TANAKA, A.; TANAKA, R. (2013). Stay-green plants: what do they tell us about the molecular mechanism of leaf senescence. **Photosynthesis Research**, v. 117, n. 1, p. 221-234, 2013.

MACLEAN J. L.; DAWE, D. C.; HETTEL, G. P. (Ed.). **Rice almanac: Source book for the most important economic activity on earth**. Int. Rice Res. Inst., 2002.

MANUKYAN I. R. *et al.* Complex evaluation of productivity and environmental plasticity of the winter wheat breeding material for the conditions of the submontane zone of Central Caucasus. **Scientific Papers: Management, Economic Engineering in Agriculture & Rural Development**, v. 19, n. 4, 2019.

MOHAMMADI, M.; CECCARELLI, S.; NAGHAVI, M.R. Variability and genetic parameters for related traits to drought tolerance in doubled haploid population of barley (*Hordeum vulgare*). **International Journal of Agriculture and Biology**, v. 5, p. 694-697, 2006.

NAMORATO, H. *et al.* Comparing Biplot Multivariate Analyses with Eberhart and Russell's method for genotype x environment interaction. **Crop Breeding & Applied Biotechnology**, v. 9, n. 4, 2009.

NASCIMENTO, S. P. do *et al.* Tolerância ao déficit hídrico em genótipos de feijão-caupi. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, p. 853-860, 2011.

NIKAM, V. S. *et al.* Genetic analysis and character association studies of physical and cooking quality traits in rice (*Oryza sativa* L.). **Electronic Journal of Plant Breeding**, v. 5, n. 4, p. 765-770, 2014.

OLIVOTO, T. *et al.* Mean performance and stability in multi-environment trials II: Selection based on multiple traits. **Agronomy Journal**, v. 111, n. 6, p. 2961-2969, 2019a.

OLIVOTO, T. *et al.* Mean performance and stability in multi-environment trials I: Combining features of AMMI and BLUP techniques. **Agronomy Journal**, v. 111, n. 6, p. 2949-2960, 2019b.

PATHAK, H. *et al.* Direct-seeded rice: potential, performance and problems-Areview. **Current Advances in Agricultural Sciences (An International Journal)**, v. 3, n. 2, p. 77-88, 2011.

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

- RAMALHO, M.A.P. *et al.* **Genética na agropecuária**. 5 ed., Lavras: Ed. UFLA, 2012. 566p.
- RIBAUT, J.M. *et al.* Identification of quantitative trait loci under drought conditions in tropical maize .2. Yield components and marker-assisted selection strategies. **Theoretical and Applied Genetics**, New York, v. 94, n. 6-7, p. 887-896, 1997.
- RIBONI, M. *et al.* GIGANTEA enables drought escape response via abscisic acid-dependent activation of the florigens and SUPPRESSOR OF OVEREXPRESSION OF CONSTANS1. **Plant physiology**, v. 162, n. 3, p. 1706-1719, 2013.
- RUNKLE, B. R. K. *et al.* Methane emission reductions from the alternate wetting and drying of rice fields detected using the eddy covariance method. **Environmental Science Technology**, v. 53, p. 671-681.
- SERBA, D. D.; YADAV, R. S. Genomic tools in pearl millet breeding for drought tolerance: status and prospects. **Frontiers in plant science**, v. 7, p. 1724, 2016.
- SETYANTO, P. *et al.* Alternate wetting and drying reduces methane emission from a rice paddy in Central Java, Indonesia without yield loss. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 64, n. 1, p. 23-30, 2018.
- SHARIFI P. *et al.* Evaluation of genotype× environment interaction in rice based on AMMI model in Iran. **Rice Science**, v. 24, n. 3, p. 173-180, 2017.
- SILVA, O. F.; WANDER, A. EO arroz no Brasil: evidências do censo agropecuário 2006 e anos posteriores. **Documentos**, n. 299, 2014.
- SLAFER, G. A. *et al.* Promising eco-physiological traits for genetic improvement of cereal yields in Mediterranean environments. **Annals of applied biology**, v. 146, n. 1, p. 61-70, 2005.
- STEIN, J. C. *et al.* Genomes of 13 domesticated and wild rice relatives highlight genetic conservation, turnover, and innovation across the genus *Oryza*. **Nature genetics**, v. 50, n. 2, p. 285-296, 2018.
- STOCKER, T. F. *et al.* **Climate change 2013: the physical science basis: Working Group I contribution to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge university press, 2014.
- STRECK, E. A. *et al.* Adaptability and stability of flood-irrigated rice cultivars released to the subtropical region of Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 53, p. 1140-1149, 2018.
- TAIZ, L. *et al.* Fisiologia e desenvolvimento vegetal. Artmed Editora, 2017.
- TERRA, T. *et al.* Características de tolerância à seca em genótipos de uma coleção nuclear de arroz de terras altas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, p. 788-796, 2015.
- MIN-THU, P. T. A WUSCHEL homeobox transcription factor, OsWOX13, enhances drought tolerance and triggers early flowering in rice. **Molecules and cells**, v. 41, n. 8, p. 781, 2018.



TOKER, C.; CANCI, H.; YILDIRIM, T. O. L. G. A. Evaluation of perennial wild Cicer species for drought resistance. **Genetic resources and crop evolution**, v. 54, n. 8, p. 1781-1786, 2007.

TOMÉ, L. M. *et al.* Grain Yield in Indirect Selection for Multiple Characters in Upland Rice. **Journal of Agricultural Science**, v. 11, p. 516, 2019.

USDA, Production, Supply, & Distribution Online Data Base, Foreign Agricultural Service, Disponível em: <<http://www.fas.usda.gov/psdonline/psdHome.aspx>> Acesso em 10 de julho de 2021.

VILLAR, P. M *et al.* Competitividade entre o arroz irrigado e o de terras altas no Brasil. *In: Desenvolvimento tecnológico e dinâmica da produção do arroz de terras altas no Brasil.* Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2005.

XU, X.Y. *et al.* Growing rice aerobically markedly decreases arsenic accumulation. **Environmental science & technology**, v. 42, n. 15, p. 5574-5579, 2008

XU, J. *et al.* OsHAC4 is critical for arsenate tolerance and regulates arsenic accumulation in rice. **New Phytologist**, v. 215, n. 3, p. 1090-1101, 2017.

ZHU, J. K. Abiotic stress signaling and responses in plants. **Cell**, v. 167, n. 2, p. 313-324, 2016.

## CAPÍTULO 2 UPLAND RICE PHENOTYPING AND SELECTION FOR DROUGHT TOLERANCE

### ABSTRACT

Upland rice is a sustainable alternative for rice production in Brazil and worldwide, with less impact on the environment. However, drought stress has been considered one of the greatest risks for the crop maintenance. Studies involving it are considered a challenge within a breeding program. Since this characteristic is considered complex and experiments, at the field level, are difficult to conduct, as well as the determination of the phase for stress application, intensity, and period. Thus, this work aimed to phenotyping and to study the agronomic behavior of rice genotypes, cultivated in upland environments with drought stress and non-stress, as well as the identification of genotypes with tolerance to water deficit, using different evaluation techniques. It was evaluated three cultivar checks, Douradão, BRS Esmeralda, and BRS Soberana, and 22 drought contrasting lines belonging from the cross between BRS Soberana and Douradão, cultivars with different responses to drought. The trials were carried in two locations, in Lavras-MG and Porangatu-GO, southeast and midwest of Brazil, in two consecutive crop years. Each year, trials were carried out in two water conditions, well-water conditions (WWC) and water-stress condition (WSC). Nine traits were evaluated, grain yield (GY), number of days to flowering (DF), plant height (PH), 1000-grain weight (GW), number of spikelets per panicle (SP), spikelet sterility rate (SS), flag leaf length (FLL), flag leaf width (FLW), and flag leaf length to width ratio (FLR). Stress was applied during the reproductive growth stage, and it was classified as severe, resulting in 67% reduction of grain yield in drought stress condition. GY and SS were the traits more affected by drought and should be the highest weight during selection for drought tolerance. Furthermore, the association between lines that combine high yields and drought tolerance was possible. Two tolerance classification methods evaluated presented efficiency in selecting tolerant genotypes and when applied high selection intensity both were coincident. Douradão, BRS Esmeralda, and the lines 19, 15, 6, 3, and 5 were considered the most tolerant and responsive and presented as potential parents for drought tolerance breeding program.

**Keywords:** *Oryza sativa*. Abiotic stress. Plant breeding.

## 1 INTRODUCTION

Drought is among of the most important and harmful abiotic stress to plant growth and development and, consequently, to grain yield (ZHU, 2016). Moreover, the management of water resources and the impacts related to climate change will likely increase damages caused by drought in the coming years (FANG; XIONG, 2015). Thus, one of the priority research roles in breeding programs should be the development of genotypes which presents drought tolerance mechanisms.

Rice is ranked third highest production cereal globally (KHAN *et al.*, 2021) and a staple food for more than half of the world's population (FAO, 2019). At a global level, 70 to 80% of fresh water is used in agriculture and only rice uses 85% of this water (PATHAK *et al.*, 2011; RITCHIE; ROSER, 2020). In addition, rice production is largely depending on the irrigated lowland rice system. However, growing the crop in this system is becoming increasingly uneconomical and threatened by freshwater scarcity, water pollution and competition for water use (BASHIR *et al.*, 2018; DHARMAPPA *et al.*, 2019; GEORGE, 2018).

This way, cultivate upland rice has advantages over the irrigated lowland system, such as: less accumulation of arsenic in the grains (DUAN *et al.*, 2017; HU *et al.*, 2015; XU *et al.*, 2017) non-contribution to methane (CH<sub>4</sub>) emission (RUNKLE *et al.*, 2019; SETYANTO *et al.*, 2018); especially in case of Brazil, where approximately 81% of production is held by two states (Rio Grande do Sul and Santa Catarina), upland rice will be very favorable to a better production distribution taking less risk to food security (CARVALHO *et al.*, 2020); and regarding all, better water use efficiency.

Upland rice system is an important alternative for food security, with greater economic and ecological sustainability. Consequently, it will be necessary to launch genotypes with more efficient use of water and tolerant to water deficit stress, that will help to maintain rice production in Brazil and in the world (NASCIMENTO *et al.*, 2011).

Plant breeding for drought tolerance is complex, and there is difficulty to establishing which plant mechanisms are involved in the process, which include biochemical, physiological, and morphological changes in plants (FANG; XIONG, 2015; HADIARTO; TRAN, 2011; ZU *et al.*, 2016).

Additionally, plant responses to drought are variable and depend to several factors, such as: genotype, time, and intensity of stress exposure, among other characteristics. Drought stress in vegetative stage is known to affect the plant development, generating delays in flowering,

however it presents less harm to yield than in reproductive stage, which is considered the most critical and sensible stage, and significantly reduce yield (KUMAR *et al.*, 2020).

The level stress applied must be severe enough to distinguish the tolerant genotypes, for Kumar *et al.* (2008) this stress should result in, at least, 65% of yield reduction in the mean yield of the stress trial as compared to the non-stress trial. However, the struggle involving drought stress field experiments and the low heritability of this trait brings the necessity to use alternative evaluation on these experiments, such as the use of secondary traits for selection. In this case, these traits must be related to grain yield, have an easy or an anticipated measurement, and with high heritability (BABU *et al.* 2003).

Thus, this work aimed to phenotyping and to study the agronomic behavior of upland rice genotypes, cultivated in environments with drought stress and non-stress, as well as the identification of genotypes with tolerance to water deficit, using different selection methods.

## 2 MATERIALS AND METHODS

### 2.1 Locations

The trials were carried out on soils classified as Oxisol in the following locations: a) Lavras-MG, Brazil, latitude 21°14'S, longitude 44°59'W, altitude 919 m and climate Cwa according to the Köppen's classification (monsoon-influenced humid subtropical climate), at the Center for scientific and technological development in agriculture of the Federal University of Lavras (UFLA). Growing season between November to March; and b) Porangatu-GO, Brazil, latitude 13° 18' S latitude and 49° 06' W longitude, altitude 391 m and climate Aw (megathermic tropical savanna) at the Experimental Station of Emater. Growing season is between April to September, when the rainfall is essentially absent (ANNEX A).

### 2.2 Germoplasm

It was used 25 accessions, which 22 were contrasting drought tolerance accessions from Embrapa upland rice breeding program's panel. This panel was originated by a cross between BRS Soberana and Douradão, two cultivar controls with distinct drought response (GUIMARÃES *et al.*, 2016). Among the panel accessions, it was selected 11 drought tolerant and 11 sensitive accessions based on previous experiment (VILLELA, 2017). Three checks were also included: BRS Soberana, BRS Esmeralda and Douradão, considered as a sensitive to drought, moderate tolerant and tolerant, respectively (CASTRO *et al.*, 2014; GUIMARÃES *et al.*, 2016; HEINEMANN *et al.*, 2019).

### 2.3 Field trails description

In Lavras, trials were carried out in two consecutive crop years, 2017/2018 and 2018/2019, and in two water conditions each. In Porangatu, in 2018 trials were carried out with two water conditions, and in 2019, instead of one, two trial for each water condition were carried out. So, Porangatu-1 will be reported as for the first trial set, and Porangatu-2, the second.

Well-water conditions trials (WWC) were maintained throughout the cycle of plant development, in which, when the soil water potential reached -25 kilopascals (kPa), at 0.15 m in depth, irrigation were applied to maintain the recommended water conditions for cultivation (600-700 mm). In water-stress condition trails (WSC), the irrigation was maintained until

approximately the 50th days after sowing, which is before panicle emission. After that a water stress were applied, which corresponded to let the soil water potential reach to -50 kPa, which indicates drought stress in rice (STONE, LIBARDI; REICHARDT, 1986; STONE; MOREIRA; SILVA, 1997). Then soil moisture reaches this value, irrigation was applied. In overall, it is possible to affirm that during stress period half of the water depth utilized on the non-stressed was provided to stress trail. The stress remained up to the end of the plant cycle.

In all trails a 5x5 simple lattice experimental design was used with two replications. In Porangatu, plots were consisted of four 4-meters length rows. In Lavras, in the first crop year, plots were two 3-meters length rows, and in the second, four 5-meters length rows.

All the others cultural managements used in the trails were the same as recommended for the rice culture in their locations.

## 2.4 Traits evaluated

Throughout of the conduction of trails, the following traits were evaluated:

- *Grain yield (GY, in kg ha<sup>-1</sup>):* plot grain weight after harvesting and drying to 13% moisture, transformed into kg ha<sup>-1</sup>;
- *Number of days to flowering (DF):* number of days from sowing to heading (when 50% of the plants in the plot emitted panicles);
- *Plant height (PH, in cm):* average of five plants measured from the ground to the tip of the highest panicle;
- *1000-grain weight (GW, in g):* eight samples with one hundred filled grains were weighed separately, the mean was multiplied by ten and estimated the weight of a thousand grains, according to the seeds analysis rules - RAS (BRASIL, 2009).
- *Number of spikelet per panicle (SP):* five panicles were randomizing collected by the end of cycle and the average of number of spikelet was estimated.
- *Spikelet sterility rate (SS, in %):* five panicles were randomizing collected by the end of cycle and the total number of grains, both empty and full, was counted.

$$SS (\%) = \frac{\text{empty spikelet number}}{\text{total spikelet number}} \times 100$$

- *Flag leaf length (FLL, in cm), flag leaf width (FLW, in cm), and flag leaf length to width ratio (FLR):* at full flowering, five randomized plants per plot have their flag leaf length and width measured, using an experimental ruler. Flag leaf length to width ratio was estimated by:  $FLR = FLL/FLW$ .

## 2.5 Data analysis

It was used linear mixed effects models (LMM) to test the effects of water condition, environment (location/crop year), genotype and their interactions on variables of interest (response variables). Water conditions (WWC and WSC) was placed as fixed effect while environments and genotypes was treated as random effects.

Also, it was controlled the random effects of blocks and replications (see the design). For flag-leaf response traits it was observed only three levels of environment, thus, for them, environment was treated as fixed effect because it is necessary to have at least 4-5 levels of the random factor to estimate a reliable variance parameter.

It was departed from a LMM containing the fixed effect of water condition and the random effects of environment, block and replicate because they are intrinsic of the experiment design, and because adding the fixed effect after the selection of the random effect can cause bias in the results, due to the Restricted Maximum Likelihood method. At this point it was tested the significance of water condition using the Wald chi-square type II test. Then, it was tested the inclusion of the random effect of genotype using parametric bootstrap likelihood ratio test (LRT). Parametric bootstrap was used because LRT null hypothesis tests are conservative when the null value (such as  $\sigma^2 = 0$ ) is on the boundary of the feasible space (SELF; LIANG, 1987), whereby, in simpler cases, the LRT p-value is approximately twice as large as it should be (PINHEIRO; BATES, 2000).

The model was expanded containing the fixed effect of water condition and the random effects of environments, replicates, blocks, and genotypes to include all possible random effects interactions between our predictors of interest: genotypes x environments, genotypes x water conditions, environments x water conditions, genotypes x environments x water conditions. These interactions are random because an interaction between a fixed and a random effect is always random. In the models where environment was treated as fixed effect, the interaction environments x water conditions was placed in the fixed component and tested its inclusion using Wald chi-square type III tests. From the expanded model it was constructed models for all possible combinations of these random terms listed above and used conditional Akaike Information Criterion (cAIC) to select the best model. cAIC was choose because it is more appropriate to select mixed models when the inference will rely in the conditional modes/means (BLUPs) (GREVEN; KNEIB, 2010; VAIDA; BLANCHARD, 2005). Models with singularities were not considered.

In the selected model it was tested the significance of each random term using LRT. To obtain the pairwise comparisons between the levels of the fixed effects an estimated marginal means to perform the contrasts was used. For sterility spikelet rate (SS) response, it used Generalized Mixed Effects Models (GLMM) with the binomial distribution and logit link function because it is more appropriate to deal with this type of data. The same steps above were applied to the GLMM, however the model selection was performed using 10-fold cross validation because there is not a consensus about using cAIC for GLMM.

The residuals normality and homoscedasticity were checked by residuals inspection and checked the distribution of the random effects. In the GLMM also was checked for over dispersion using simulated residuals. Moreover, it was obtained the percentage of explained variance ( $R^2$ ) for both fixed and random effects. Also, it was plotted and checked the correlation between predicted and observed values. Note that a logarithmic transformation (except in the GLMM) was applied in all response variables to achieve normality and/or homoscedasticity and to ensure positive predictions (when back transformed), because all response variables are continuous and constrained to positive values. The logit link function from the GLMM also ensures that the predictions will be constrained between 0 and 1 (0 – 100%).

All analyses were performed in R (R CORE TEAM, 2021). The LMM and GLMM were fitted using lme4 package (BATES *et al.*, 2015), for the LMM it was used Restricted Maximum Likelihood (REML) method. The parametric bootstrap-based LRT were performed using pbkrtest package (HALEKOH; HØJSGAARD, 2014), Wald chi-square type II and III tests using car package (FOX; WEISBERG, 2019) and the estimated marginal means pairwise comparisons were obtained from emmeans package (LENTH *et al.*, 2020). The cAIC was computed using cAIC4 package (SAEFKEN *et al.*, 2018) and the  $R^2$  was computed using MuMIn package (BARTON, 2020). Simulated residuals and over dispersion were performed using DHARMA (HARTIG, 2020). To obtain the graphics ggplot2 was used (WICKHAM, 2016).

### 2.5.1 Mathematical formulation

From the fitted models it was obtained the conditional means (Best Linear Unbiased Prediction-BLUP) and conditional standard deviations for each level of each grouping (random) factor. Also, it was obtained the predicted values of each response variable by combining all random effects and fixed effects.

$$y = X\beta + Zu + \varepsilon$$



Where  $y$  is  $N \times 1$  column vector, the response variable;  $X$  is a  $N \times p$  matrix of  $p$  predictors variables (or the levels of the predictor if it as a factor);  $\beta$  is  $p \times 1$  column vector of the fixed effects coefficients (the estimated  $\beta$ 's);  $Z$  is the  $N \times qJ$  design matrix for the  $q$  random effects and  $J$  groups;  $u$  is a  $qJ \times 1$  vector of  $q$  random effects (the random complement to the fixed  $\beta$ ) for  $J$  groups; and  $\varepsilon$  is a  $N \times 1$  columns vector of residuals, which is the part of  $y$  not explained by the model  $X\beta + Zu$ ; and  $u$  come from a normal distribution with mean equals zero and variance  $\sigma_r^2$ , so,  $u \sim N(0, \sigma_r^2)$  when  $q = 1$ , which is our case. This model formula can be generalized for the cases where there is more than one random factor by adding more matrices and vector combinations as  $Zu$ . For example, if there is two random factors, then:  $X\beta + Z_1u_1 + Z_2u_2 + \varepsilon$ ; and then:  $u_1 \sim N(0, \sigma_{r1}^2)$  and  $u_2 \sim N(0, \sigma_{r2}^2)$ . Therefore,  $u$  contains the random deviations from the population mean of each level of each random factor and  $\sigma_r^2$  are the variance parameter estimated by the LMM.

The predicted outcome is defined by:

$$Y_{ijk} = \beta_0 + u_j + \beta_k + \varepsilon_i$$

Where  $Y_{ijk}$  is predicted value of the response variable of the  $i$ -th observation of the  $j$ -th level of the random factor of the  $k$ -th level of the fixed factor (if present);  $u_j$  is the random effect (deviation from the population mean) of the  $j$ -th level of the random factor;  $\beta_0$  is the population mean or the mean of the first level of the fixed factor in alphabetical order;  $\beta_k$  is the fixed effect of the  $k$ -th level of the fixed factor and  $\varepsilon_i$  is the residual error associated with the prediction. If there is more than one random factor in the model the formula can be generalized by adding the random deviation from the population mean of each level of the other random factor. For the GLMM the predictions are made in the logit scale and then back transformed to probabilities.

### 2.5.2 Drought Tolerance Index (DTI)

It was calculated using the following relationship according to Fernandez (1992):

$$DTI = \frac{(Y_p Y_s)}{\tilde{Y}_p^2}$$

Where  $Y_s$  is the yield of genotype under stress (WSC);  $Y_p$  is the yield of genotype under non-stress (WWC); and  $\tilde{Y}_p$  is the mean grain yield of all genotypes under non-stress (WWC).

### 2.5.3 Classification chart for drought tolerance response

Using the BLUP grain yield means for each genotype, a graph to classify the genotypes regarding the response to drought was made. The X axis corresponds to the GY under non-stress (WWC), and the Y axis to the GY under stress conditions (WSC). All genotypes were classified into the quadrants (Quad).

### 2.5.4 Coincidence index estimates (CI)

The equation proposed by Humblin and Zimmerman (1986) was utilized to evaluate the coincidence between quadrants chart classification (Quad) and drought tolerance index (DTI), and Quad with grain yield's correlated traits.

### 2.5.5 Pearson and Spearman correlation

Pearson correlation analyses were carried out among nine traits observed. Spearman correlation was used among traits with high coincidence index to Quad and other traits candidates to be used for drought selection.

## 3 RESULTS

Two measures to assess the precision of a model were estimated, the determination coefficient of observed versus predicted values ( $R^2$ ) and the root mean squared error (RMSE). RMSE measures the error rate of a regression model, while  $R^2$  is a measure of strength of relative relation between predict and observed values. Therefore, is expected that a well-adjusted model have high  $R^2$  values and low RMSE estimates (INIYAN; JEBAKUMAR, 2021; RANE *et al.*, 2021).

For DF, PH, GW, and FLW, it was observed simultaneously high values to  $R^2$  (98%, 99%, 90%, and 90%) and low RMSE (3.51, 3.98, 6.48, and 6.05), respectively, which indicates high accuracy. GY and SS presented high  $R^2$ , 0.95 and 0.90, but RMSE, 36.30 and 18.94, was also high, indicating major error rate for the model's prediction. FLL, SP, and FLR had the lowest precision models, with a value to  $R^2$  accuracy of 81%, 73%, 65% (FIGURE 7, APPENDIX A).

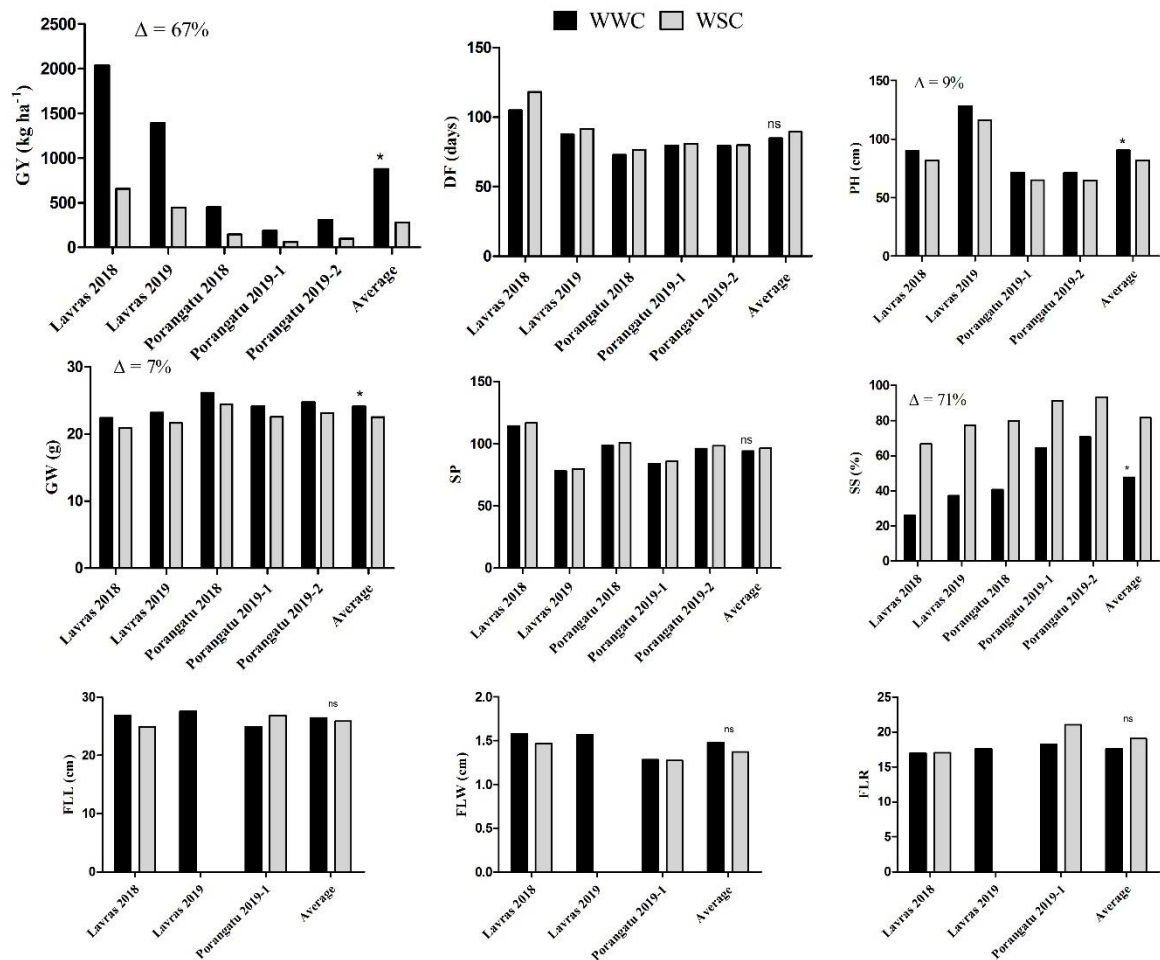
In each selected model it was tested the significance of each random effects using LRT, it is important to remember the dataset was transformed and the variance estimates presented

in Table 2 (APPENDIX A) is log transformed estimate. For effect of genotype, it was observed difference for all the traits evaluated. The interaction genotypes x environments was observed to FLW, FLR, and DF was significant. For this last trait environments x water conditions interaction was also observed. GY and WG presented genotypes x water condition interaction as well. The triple interaction between genotypes x environments x water conditions was significantly noted for GY, DF, PH, SP, and WG.

### **Drought effects on evaluated traits**

With the application of water deficit after 50th days after sowing it was observed an effect of drought over four traits: GY, PH, GW, and SS (FIGURE 1). For this experiment a severe drought stress was applied, which resulted in 67% of grain yield reduction comparing non-stressed and stressed environments, which is classified as a severe stress (KUMAR *et al.*, 2008).

Figure 1 – Impact of drought stress on grain yield (GY, in  $\text{kg ha}^{-1}$ ), number of days to flowering (DF), plant height (PH, in cm), 1000-grain weight (GW, in g), number of spikelets per panicle (SP), spikelet sterility (SS), flag leaf length (FLL, in cm), flag leaf width (FLW, in cm), and flag leaf length to width ratio (FLR).  $\Delta$ : trait reduction rate between the main in well-water condition (WWC) and the main in water stress conditions (WSC).



Source: The author (2021).

Analyzing the interaction genotypes x water conditions BLUP's for grain yield, there were positive selection gains for three genotypes under stress condition, Douradão, lines 5 and 3. In order hand, the lines 22, 16, 13, and 8 in WSC, and line 20 in WWC, and BRS Soberana in both water conditions had a negative gain estimate (FIGURE 8, APPENDIX A). Also, is noted Porangatu site experiments had lower BLUP estimates compared to Lavras, being below zero. This result indicates that using only these environments it can lead to a negative selection gain for grain yield, being this location, possibly, not favorable to genotype selection.

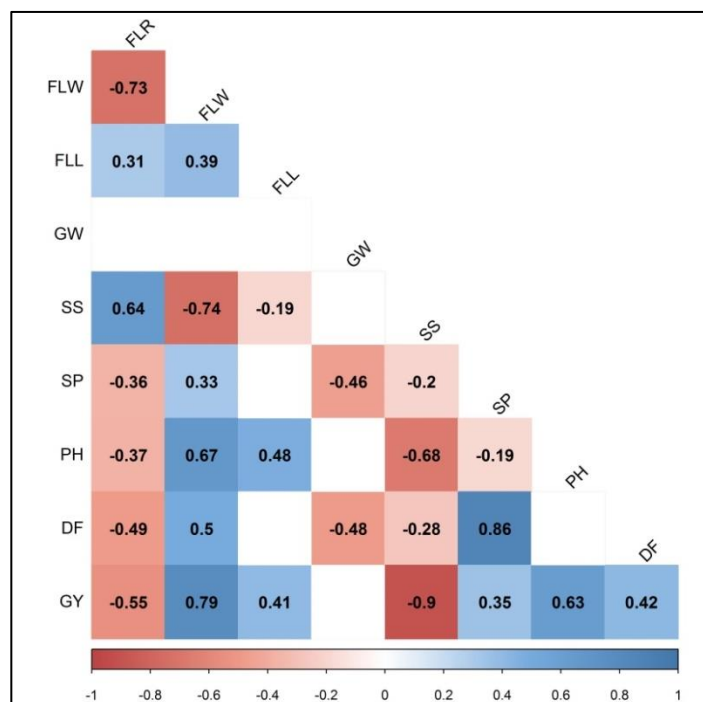
DF, SP, and flag-leaf measures, FLL, FLW and FLR had no difference between the water conditions (FIGURE 1).

For GW, a grain yield component, and PH is also observed a decrease of values in drought stress environments of 7% and 9%, respectively. In addition, spikelet sterility (SS), from 48% sterility in WWC went to approximately 82% in WSC, a rise of 71%. When observed the BLUPs, 10 genotypes had significant lower estimates for SS, lines 16, 19, 3, 4, 15, 17, 22, 2, and BRS Esmeralda and Douradão cultivar checks (FIGURE 9, APPENDIX A). BRS Soberana had the higher BLUP estimative between all the genotypes, it means, more spikelet sterility rate, indicating a negative gain selection.

### Pearson's correlation

To understand the behavior of the traits and their relationships, a Pearson correlation was performed on the BLUP's means and the results are showed in the Figure 2. It was observed that GY has a high positive relationship with DF, PH, SP, FLL and FLW and highly negative to FLR and SS. Flag leaf ratio (FLR) had a negative relationship with mostly traits except for FLL and SS. Both FLW and FLL presented relationships to the traits in the same direction, being FLW highly negative correlated to SS. Also is possible to highlight the DF, which was high related to SP.

Figure 2 – Significant Pearson's correlation coefficients ( $P < 0.05$ ).

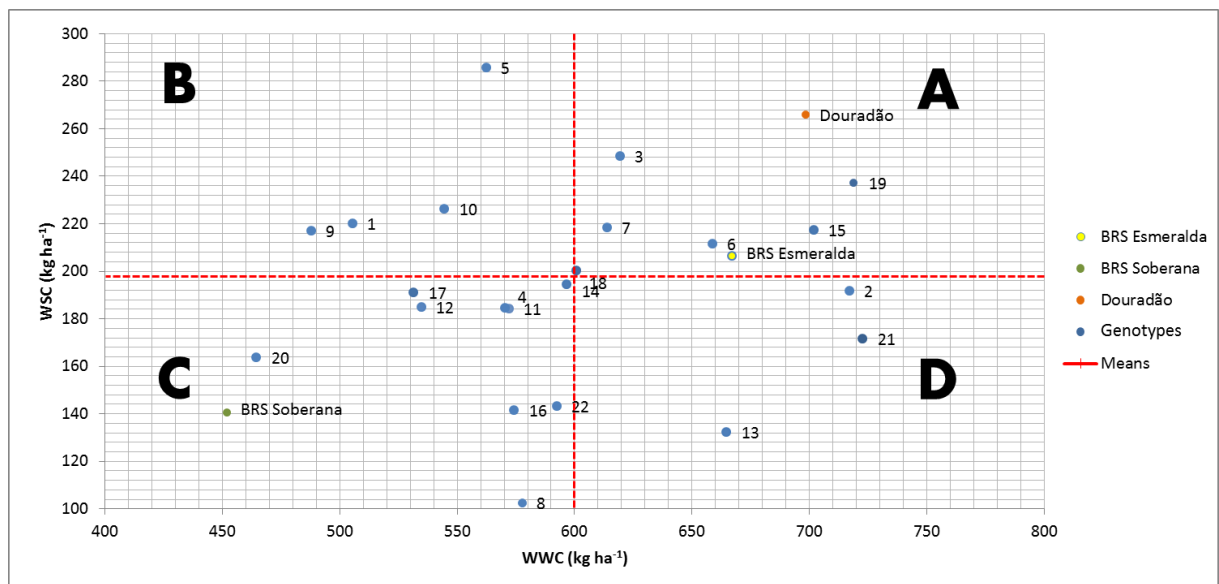


Source: The author (2021).

### Classification chart for drought tolerance response

In Figure 3 is showing how genotypes responded to the drought. This chart was splitted in quadrants (A, B, C e D). The D quadrant is composed by genotypes that are well productive in good environmental conditions, but susceptible to drought. The C, they are considered susceptible and not well adapted to the environmental conditions evaluated. The B quadrant, genotypes with drought tolerance with no response to the environmental improvement, and A quadrant, drought tolerant that respond well in favorable environments. The two tolerant cultivar checks, BRS Esmeralda and Douradão, were classified in quadrant A. In addition to them, genotypes 19, 15, 6, 7, 3, and 18 also were included. In quadrant B, the genotypes found as tolerant but not responsive to well-water improvement was: 5, 10, 1 and 9. On the other hand, BRS Soberana was classified as drought sensitive and not well adapted to the locations evaluated.

Figure 3 – Response classification to the drought, abscissa axis correspond to grain yield (kg ha<sup>-1</sup>) in well water conditions (WWC) and ordinate axis, to water stress conditions (WSC).



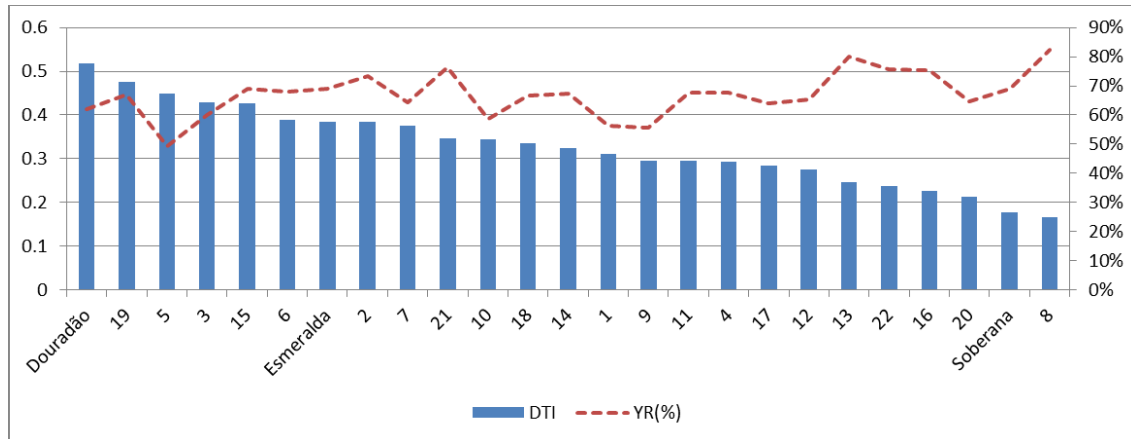
Source: The author (2021).

### Drought tolerance index (DTI)

Figure 4 shows the drought tolerance index (DTI) and percentage of yield reduction (YR %). Genotypes with higher DTI values are considerate tolerant. Douradão and BRS Esmeralda were between the higher DTI values found. Besides them, is possible to point out the lines 19, 5 and 3, which were the most tolerant accessions after Douradão.

The genotype 5 and 3 had the lower YR evaluated with 49% and 60% reduction, respectively, which is lower than the YR average of 67%. BRS Soberana and BRS Esmeralda both had the same YR of 69%, however BRS Soberana, as expected, was classified as the second more susceptible genotype in this experiment, only being better classified than the line 8.

Figure 4 – Drought tolerance index (DTI) and percentage of yield reduction (YR)



Source: The author (2021).

### Coincidence Index and Spearman's correlation

To test the possibility to identify drought tolerant genotypes utilizing another trait or index, a coincidence index was calculated between the drought tolerance chart quadrants and DTI, FLR and FLW (TABLE 1).

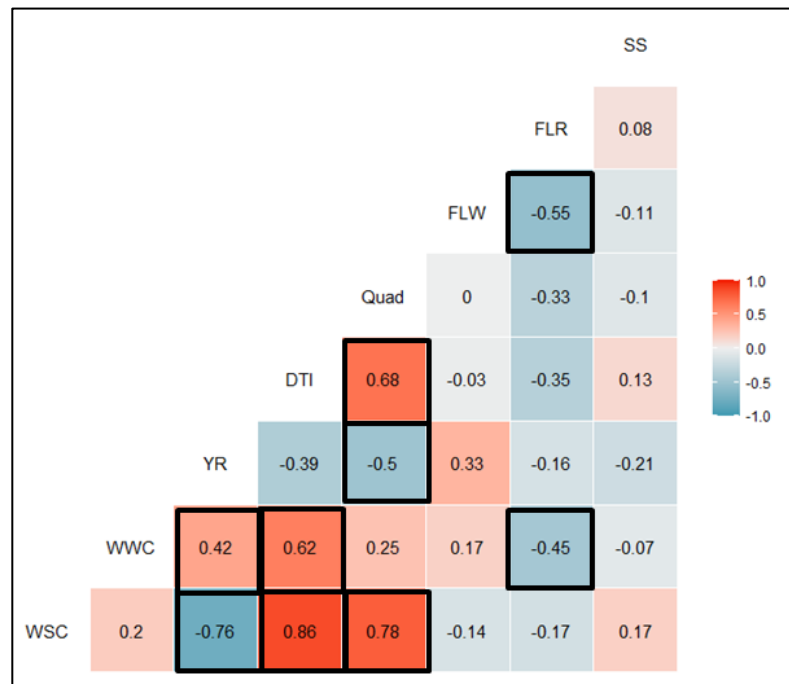
Table 1 - Coincidence index estimates (CI) between quadrants and DTI, FLR, FLW, and YR (%).

Selection Interval	Quad/DTI	Qua/FLR	Quad/FLW	Quad/YR
Quad (A + B) (12 genotypes)	81.4%	62.8%	44.2%	72.1%
Quad A (8 genotypes)	100.0%	70.4%	40.7%	55.6%

Source: The author (2021).

Due to the estimate values for CI, it was decided to apply Spearman's correlation to verify the relationships between the quadrant classification and DTI methods with others highly GY's related traits. It was observed that FLR is negative correlated to well-water condition grain yield (WWC) and flag leaf width. Quadrants classification is high correlated with grain yield in water stress condition (WSC) and with drought tolerance index. And yield reduction (YR %) was negatively correlated to quadrants classification.

Figure 5 – Spearman's correlation coefficients



\*Coefficients with black squares are significant ( $P < 0.05$ ).

Source: The author (2021).

#### 4 DISCUSSION

The drought stress was applied around 50th days after sowing, in reproductive growth stage letting the soil water potential reaches to -50 kPa, that indicates drought stress in rice (STONE; LIBARDI; REICHARDT, 1986; STONE; MOREIRA; SILVA, 1997). The drought stress applied in this work significantly harmed grain yield, reducing it in 67% (FIGURE 1). For Kumar *et al.* (2008), this stress is considered severe enough to distinguish tolerant genotypes from the ones with high-yield potential. Same authors also pointed that this stress level is not always easy to be reach by most of breeding programs, which leads to a failed tolerant genotypes selection. However, in Figure 2 it is show that is possible to associate these both qualities in a single genotype. Douradão and genotype 19 presented two of the highest performances in both water conditions.

It was observed that Porangatu environments had lower BLUP estimates for grain yield than Lavras and being under zero. Porangatu is a site widely used for drought phenotyping, because during the experiment conduction is not expect rainfall and all the water offered to the plants is from irrigation source. In addition, this site has high temperatures and low relative humidity during this period, which was considered a not favorable environment to explore the yield potential and the expression of favorable genes to grain yield for the evaluated lines.



Plant height (PH) is a morphological trait controlled by quantitative trait loci (QTL's), and is very affected by environmental conditions (ZENG *et al.*, 2019). This trait was significantly affected by drought tolerance and several authors have been reported this fact in crop plants (FAHAD *et al.*, 2017; HUSSAIN *et al.*, 2018; KHAN *et al.*, 2021). The drought stress causes a loss of turgor in the cells, and one the first response by the plants is the growth reduction, including PH (KUMAR *et al.*, 2020; MEDEIROS *et al.*, 2012; TODAKA; SHINOZAKI; YAMAGUCHI-SHINOZAKI, 2015;).

Specifically in upland rice, under ideal water-growing conditions, is desirable that lines do not exceed 100 cm height (SAITO *et al.*, 2018), once taller plants have high risk of lodging (MARTINS *et al.*, 2021). Like that, a reduction of 9% in PH, as observed in this work, would not be such problem. However, all genotypes evaluated in this experiment already had adequate height averages. And a reduction in height under drought stress will lead to a reduction in the photosynthetic area, reducing the utilization of light energy efficiency, consequently leading to lower yield (CAO *et al.*, 2017). Guimarães *et al.* (2010) further suggests that grain yield under drought stress conditions is determined, among other characteristics, by plant height. Which in fact, it was observed in Figure 3 once PH and GY had a positive correlation coefficient of 0.63 ( $p < 0.05$ ) (FIGURE 2).

Depending on timing the drought stress is applied the plant response will differ. In vegetative stage, the stress will affect the plant development, reducing tillering, and postponing flowering. However, stress at this stage, even with growth delay, is not so aggressive to grain yield, principally, if the water supply occurs in time to allow plant recover. On the other hand, drought stress at reproductive stage is considered the most critical and sensible stage, leading to an increase in grain sterility, reducing grain filling and can significantly reduce yield (KUMAR *et al.*, 2020; PANTUWAN *et al.*, 2002).

For Thu *et al.* (2018) the day to flowering is one of key-strategies of adjustments utilized by plants, however it hasn't observed differences in days to flowering (DF) between stressed and non-stressed environments. The stage which stress was applied, with 50th after sowing, it represents reproductive stage-growth, and might be a reason why wasn't observed these differences in flowering, once plants already started the flowering process.

In R1, which is the second reproductive stage, is known as the panicle initiation phase (COUNCE; KEISLING; MITCHELL, 2000). In this stage the number of spikelets per panicle will be defined and, once it happens, drought stress will affect forward processes. Although, stress in such phase will affect the fertilization of spikelet, leading to a high sterility spikelet

rate (SS). In this work it was not observed difference in number of spikelets per panicle (SP), but significantly effect of drought for spikelet sterility.

Under stress the mean for spikelet sterility rate was 82%, against 48% in well water conditions, a rise of sterility 71%. Some authors reported the maintenance of water potential in leaves is highly associated with de ability of plant to keep lower spikelet sterility under drought stress (FUKAI *et al.*, 1999; RANG *et al.*, 2011). Mishra, Chaturvedi and Hindu (2018) commented also that is very probable this highly sterility is due to induced stress male sterility and hampered pollen fertilization. For Guimarães *et al.* (2010) SS is one of the highest informative and determinant traits for drought tolerance selection.

Spikelet sterility is one of the four yield components, are they: number of panicles/m<sup>2</sup>, spikelets/panicle, spikelet fertility and 1000-grain weight. It was observed that in this work, between the components evaluated SS was the one with higher correlation to grain yield ( $r = -0.9$ ).

For 1000-grain weight (WG), other yield components, it was affected by drought with a decrease of 7% in stress conditions, being less expressive than the losses in spikelet fertility. Liu *et al.* (2006) commented is necessary to attend to plant grow stage subjected to stress, once it can be affecting differently each yield component. In experiments with stress during reproductive phases spikelet fertility was the one most affected by drought, the same was observed in this work. GW had no significant correlation with none of these three characteristics (FIGURE 2).

In the same figure is observed that GW and SP as a negative correlation, indicating the greater number of spikelets, lower the 1000-grain weight. Ripening growth stage or spikelet filling extends from flowering to physiological maturity, and it has about 30 days growth duration in most of cultivars. The amount of assimilates available to be transported and endosperm number of cells will determine the weight of grains (FAGERIA, 2007).

As commented before, drought stress will affect several biochemical, morphological and physiological mechanisms, decreasing plant's photoassimilates, interfering in the spikelet filling and, consequently, 1000-grains weight. However, once it is observed higher sterility spikelet as well, is possible to assume the 1000-grains weight was not so affected once there was less fertilized spikelet to it.

In addition to these traits, some authors have reported that the leaf development also is affected by drought stress (DEVI; TALIERCIO; SINCLAIR, 2015; KUMAR *et al.*, 2021; LIMA, 2018; WANG *et al.*, 2016). For Biswal and Kohli (2013) the flag leaf plays an important

role in the translocation of nutrients for grain filling, especially under stress conditions, and various traits related to it have been used or proposed for selecting drought tolerant plants. One advantage to use such traits is because they have high heritability and well correlated to grain yield (SOHRABI *et al.*, 2012). Zu *et al.* (2017) investigated the leaf length is correlated to stomata density and can used as tolerance indicators and a parameter for drought tolerance genotypes selection. Although it was tested three flag-leaf dimensions in this experiment, flag leaf length (FLL), flag leaf width (FLW), flag leaf length to width ratio (FLR), and it was not found evidence in the experiment of drought effect in these traits.

However, it was that found that both FLL and FLW are positive correlated to GY, specially FLW, (FIGURE 2), FLW has also a negative relationship with GY. This goes in the same way that is found in literature, indicating these traits might be a good candidate to indirect selection to grain yield (DELONG YANG *et al.*, 2016). Also, it was observed that FLW had a high negative correlation to sterility spikelet rate (SS) when lower values for FLW indicates plants with high sterility rates.

The genotypes were classified by its response to drought (FIGURE 3). The dotted lines in the graph define the average of all genotypes in each water conditions. Genotypes framed within the A quadrant had high performance in both water conditions and are classified as tolerant and well and responsive. While in B quadrant, the genotypes are tolerant but not responsive, it means, they will not produce more in response to water availability. The highlight genotypes were: Douradão, BRS Esmeralda, both checks, and the lines 19, 15, 6, 7, 3, and 5. All the genotypes in both quadrants are good candidates for parental, to donate favorable alleles within upland rice breeding programs for drought tolerance. Once rice is a self-pollinated crop, mainly inbred that generates homogeneous and homozygous populations, hybridization breeding method, it is selecting parents, is the predominant for this crop (PRIYADARSHAN, 2019).

Drought tolerance is one of the most complex and challenging traits to breed it with various adaptation mechanisms with distinct genetic controls, which have been associated and mapped as quantitative trait loci (QTLs) (VINOD *et al.*, 2019). For quantitative genetics, the improvement of traits like that is done through an “accumulation of advantages”, that is, at each crossing, it is expected to gradually accumulate genes with small and large effects favorable to the character. Furthermore, this information may open the way for a study of gene expression in these genotypes, helping in breeding programs for identification of candidate genes for the development of marker-assisted selection.

Other method for tolerance identification has been suggested, the drought tolerance index (DTI) (FIGURE 4). This method was proposed by Fernandez (1992) and the high value of DTI implies higher tolerance to drought stress, with genotype with high yield under both stress and non-stress conditions. In wheat Taleb *et al.* (2009) said this method was more effective in identifying high yielding cultivars under different water conditions.

According to DTI, Douradão was the most tolerant cultivar, followed by the genotypes 19, 5, 3, 15, and BRS Esmeralda. These results are not surprise, once Douradão and BRS Esmeralda is known by theirs withstand to drought stress. Castro *et al.* (2013) in a trail with 54 accesses of upland rice reported these two cultivars had the greater drought tolerance associated with high performance in well water conditions.

Furthermore, it was reported that Douradão has a greater root length density with no difference between water conditions, which contributes for a better water uptake capacity maintained the higher water potential in these plants. Also, was showed that Douradão has stomatal sensitivity, closing its stomata fast, being the opposite what was observed of BRS Soberana, which goes concomitantly with the results presented in this work (GUIMARÃES *et al* 2018; HEINEMANN *et al.*, 2017; HEINEMANN *et al.*, 2019).

A complementary result that also is showed in Figure 4 is the yield reduction rate (YR %). Comparing the genotypes, it is noted that lines 5 and 3 had the lower YR, being below than experiment average, which was 67% of YR. It is interest that these two lines plus Douradão were classified as tolerant in wall methods as well as the higher BLUPs for grain yield in drought enviroments, being strong evidence, these lines have mechanisms of drought tolerance.

And, to cross-reference the methods information, it was performed a coincidence index between them (TABLE 1). It was choosing to utilize the information of quadrants A and B of chart classification graph, and the traits DTI, YR, FLR and FLW. These two lasts were choosing once they had high correlation to yield. It is observed that when low selection intensity was used, selecting all the 12 genotypes classified as tolerant by quadrants A and B, the efficiency of DTI was 81%. But once the intensity of selection increased to only quadrant A, DTI and Quad A had 100% of match. FLR and Quad A had a good coincidence as well, with 70.4%. FLW was not good coincident with Quad A, either YR with high intensity selection.

This could be explored with Figure 5 when Spearman correlation was applied between these methods. And in this case, it was decided to present grain yield to each water condition. It was observed that DTI, Quad, and YR were more influenced by grain yield in water stress (WSC) than in WWC, positively for the two first, and negatively for YR. And the three are

correlated. Although FLR, not differs between the water conditions in this experiment it shows to be more affected by WWC than WSC.

## 5 CONCLUSION

Grain yield (GY) and spikelet sterility (SS) are the traits with the highest weight during selection for drought tolerance.

The association between lines that combine high yields and drought tolerance is possible in the rice breeding.

Douradão, BRS Esmeralda, and the lines 19, 15, 6, 3, and 5 were considered the most tolerant and can be used as parental within the breeding program for allele donation for drought tolerance.

## REFERENCES

- BABU, R. C. *et al.* Genetic analysis of drought resistance in rice by molecular markers: association between secondary traits and field performance. **Crop Science**, v. 43, n. 4, p. 1457-1469, 2003.
- BARTOŃ, K. MuMIn: multi-model inference. R package version 1.43. 17. **Retrieved May**, v. 11, p. 2021, 2020.
- BATES, D. *et al.* Fitting linear mixed-effects models using lme4. **arXiv preprint arXiv:1406.5823**, 2014.
- BISWAL, A. K.; KOHLI, A. Cereal flag leaf adaptations for grain yield under drought: knowledge status and gaps. **Molecular Breeding**, v. 31, n. 4, p. 749-766, 2013.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. **Regras para análise de sementes**. Brasília, DF: MAPA: SDA, 2009. 395 p.
- CAO, X. *et al.* Effects of watering regime and nitrogen application rate on the photosynthetic parameters, physiological characteristics, and agronomic traits of rice. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 39, n. 6, p. 1-12, 2017.
- CARVALHO, M. T. de M. *et al.* O arroz de terras altas como estratégia para segurança alimentar, intensificação ecológica e adaptação à mudança do clima: rumo aos objetivos de desenvolvimento sustentável para o milênio. **Embrapa Arroz e Feijão-Comunicado Técnico (INFOTECA-E)**, 2020.
- CASTRO, A. P. *et al.* Avaliação de cultivares de arroz (*Oryza sativa*) de terras altas quanto à deficiência hídrica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MELHORAMENTO DE PLANTAS, 7., 2013, Uberlândia. **Anais...** Viçosa: SBMP, 2013, p. 1918-1922.

CASTRO, A. P. *et al.* BRS Esmeralda: cultivar de arroz de terras altas com elevada produtividade e maior tolerância à seca. **Embrapa Arroz e Feijão-Comunicado Técnico (INFOTECA-E)**, 2014.

COUNCE, P. A.; KEISLING, T. C.; MITCHELL, A. J. A uniform, objective, and adaptive system for expressing rice development. **Crop Science**, v. 40, n. 2, p. 436-443, 2000.

DELONG YANG, Y. L. *et al.* Genetic dissection of flag leaf morphology in wheat (*Triticum aestivum* L.) under diverse water regimes. 2016.

DHARMAPPA, P. M. *et al.* Introgression of root and water use efficiency traits enhances water productivity: An evidence for physiological breeding in rice (*Oryza sativa* L.). **Rice**, v. 12, n. 1, p. 1-14, 2019.

FAGERIA, N. K. Yield physiology of rice. **Journal of plant nutrition**, v. 30, n. 6, p. 843-879, 2007.

FAHAD, S. *et al.* Crop production under drought and heat stress: plant responses and management options. **Frontiers in plant science**, p. 1147, 2017.

FANG, Y.; XIONG, L. General mechanisms of drought response and their application in drought resistance improvement in plants. **Cellular and molecular life sciences**, v. 72, n. 4, p. 673-689, 2015.

FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS STATISTICS. **Statistics Database**. Disponível em: <<http://faostat.fao.org>> Acesso em: 15 de julho de 2021.

FERNANDEZ, G. C. J. Effective selection criteria for assessing plant stress tolerance. In: **Proceeding of the International Symposium on Adaptation of Vegetables and other Food Crops in Temperature and Water Stress, Aug. 13-16, Shanhua, Taiwan, 1992**. 1992. p. 257-270.

FOX, J.; WEISBERG, S.; AN, R. Companion to Applied Regression, Third. 2019.

FUKAI, S. *et al.* Screening for drought resistance in rainfed lowland rice. **Field Crops Research**, v. 64, n. 1-2, p. 61-74, 1999.

GEORGE, D. Aerobic rice: Rice for future. **Int. J. Chem. Stud**, v. 6, n. 6, p. 481-485, 2018.

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.

GUIMARÃES, C. M. *et al.* Termometria infravermelha na fenotipagem para resistência à seca de linhagens inter e intraespecíficas de arroz. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 2, p. 148-154, 2010.

GUIMARÃES, C. M.; STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M. Morphological and physiological traits of upland rice cultivars affected by water deficit. **Embrapa Arroz e Feijão-Artigo em periódico indexado (ALICE)**, 2018.

- GREVEN, S.; KNEIB, T. On the behaviour of marginal and conditional AIC in linear mixed models. ***Biometrika***, v. 97, n. 4, p. 773-789, 2010.
- HADIARTO, T.; TRAN, L. S. P. Progress studies of drought-responsive genes in rice. ***Plant cell reports***, v. 30, n. 3, p. 297-310, 2011.
- HALEKOH, U.; HØJSGAARD, S. A kenward-roger approximation and parametric bootstrap methods for tests in linear mixed models—the R package pbkrtest. ***Journal of Statistical Software***, v. 59, p. 1-32, 2014.
- HARTIG, Florian. DHARMA: residual diagnostics for hierarchical (multi-level/mixed) regression models. ***R package version 0.3***, v. 3, 2020.
- HEINEMANN, A. B. *et al.* Upland rice breeding led to increased drought sensitivity in Brazil. ***Field Crops Research***, v. 231, p. 57-67, 2019.
- HEINEMANN, A. B. *et al.* Upland rice cultivar responses to row spacing and water stress across multiple environments. ***Experimental Agriculture***, v. 53, n. 4, p. 609-626, 2017.
- HUSSAIN, H. A. *et al.* Chilling and drought stresses in crop plants: implications, cross talk, and potential management opportunities. ***Frontiers in plant science***, v. 9, p. 393, 2018.
- INIYAN, S.; JEBAKUMAR, R. Mutual Information Feature Selection (MIFS) Based Crop Yield Prediction on Corn and Soybean Crops Using Multilayer Stacked Ensemble Regression (MSER). ***Wireless Personal Communications***, p. 1-30, 2021.
- KARTHIK, L. *et al.* Protease inhibitors from marine actinobacteria as a potential source for antimalarial compound. ***PloS one***, v. 9, n. 3, p. e90972, 2014.
- KUMAR, A. *et al.* Breeding for drought tolerance: direct selection for yield, response to selection and use of drought-tolerant donors in upland and lowland-adapted populations. ***Field Crops Research***, v. 107, n. 3, p. 221-231, 2008.
- KUMAR, S. *et al.* Anatomical, agro-morphological and physiological changes in rice under cumulative and stage specific drought conditions prevailed in eastern region of India. ***Field Crops Research***, v. 245, p. 107658, 2020.
- LENTH, R. *et al.* Herve M. emmeans: estimated marginal means, aka least-squares means. R package version 1.3. 5. 2020.
- LIMA, I. P. de. **Phenotyping and morpho-physiological behavior of rice genotypes under water deficit**. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Lavras, Lavras. 2018.
- LIU, J. X. *et al.* Genetic variation in the sensitivity of anther dehiscence to drought stress in rice. ***Field Crops Research***, v. 97, n. 1, p. 87-100, 2006.
- MARTINS, J. T. *et al.* Doses and application times of trinexapac-ethyl in upland rice. ***Revista Ceres***, v. 68, p. 172-179, 2021.

- MISHRA, B. K.; CHATURVEDI, G. S.; HINDU, B. Flowering stage drought stress resistance in upland rice in relation to physiological, biochemical traits and yield. **Int J Curr Microbiol App Sci**, v. 7, n. 2, p. 781-782, 2018.
- NASCIMENTO, S. P. do *et al.* Tolerância ao déficit hídrico em genótipos de feijão-caupi. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, p. 853-860, 2011.
- PATHAK, H. *et al.* Direct-seeded rice: potential, performance and problems-Areview. **Current Advances in Agricultural Sciences (An International Journal)**, v. 3, n. 2, p. 77-88, 2011.
- PINHEIRO, J. C.; BATES, D. M. Linear mixed-effects models: basic concepts and examples. **Mixed-effects models in S and S-Plus**, p. 3-56, 2000.
- RANE, J. *et al.* Use of phenomics for differentiation of mungbean (*Vigna radiata* L. Wilczek) genotypes varying in growth rates per unit of water. **Frontiers in plant science**, v. 12, 2021.
- R Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria: URL <https://www.R-project.org/>. [Google Scholar], 2017.
- RITCHIE, H.; ROSER, M. Environmental impacts of food production. **Our world in data**, 2020.
- RUNKLE, B. R. K. K. *et al.*, 2019. Methane emission reductions from the alternate wetting and drying of rice fields detected using the eddy covariance method. **Environ. Sci. Technol.**, v. 53, p. 671-681.
- SAEFKEN, B. *et al.* cAIC4: Conditional Akaike information criterion for lme4. **R package version 0.3**, 2018.
- 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.
- SELF, S. G.; LIANG, K. Y. Asymptotic properties of maximum likelihood estimators and likelihood ratio tests under nonstandard conditions. **Journal of the American Statistical Association**, v. 82, n. 398, p. 605-610, 1987.
- PANTUWAN, G. *et al.* Yield response of rice (*Oryza sativa* L.) genotypes to different types of drought under rainfed lowlands: Part 1. Grain yield and yield components. **Field Crops Research**, v. 73, n. 2-3, p. 153-168, 2002.
- PRIYADARSHAN, P. M. Breeding self-pollinated crops. In: **Plant Breeding: Classical to Modern**. Springer, Singapore, 2019. p. 223-241.
- SOHRABI, M. *et al.* Genetic diversity of upland rice germplasm in Malaysia based on quantitative traits. **The Scientific World Journal**, v. 2012, 2012.
- STONE, L.F.; LIBARDI, P.L.; REICHARDT, K. Produtividade do arroz e absorção de nitrogênio afetadas pelo veranico e pela adição de vermiculita ao solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília**, v.21, n.2, p.117-25, 1986.



STONE, Luís Fernando; MOREIRA, J. A. A.; DA SILVA, S. C. **Tensão da água do solo adequada para controle da irrigação do arroz de terras altas**. EMBRAPA-CNPAP, 1997.

VAIDA, F.; BLANCHARD, S. Conditional Akaike information for mixed-effects models. **Biometrika**, v. 92, n. 2, p. 351-370, 2005.

VILLELA, G. M. **Eficiência no uso da água em linhagens de arroz de terras altas: eficiência no uso da água em linhagens de arroz de terras altas**. Dissertação (Mestrado em Genética e Melhoramento de Plantas)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2017.

VINOD, K. K. *et al.* Genetics of drought tolerance, mapping QTLs, candidate genes and their utilization in rice improvement. In: **Genomics Assisted Breeding of Crops for Abiotic Stress Tolerance, Vol. II**. Springer, Cham, 2019. p. 145-186.

WANG, Y. *et al.* Contribution of ear photosynthesis to grain yield under rainfed and irrigation conditions for winter wheat cultivars released in the past 30 years in North China Plain. **Journal of integrative agriculture**, v. 15, n. 10, p. 2247-2256, 2016.

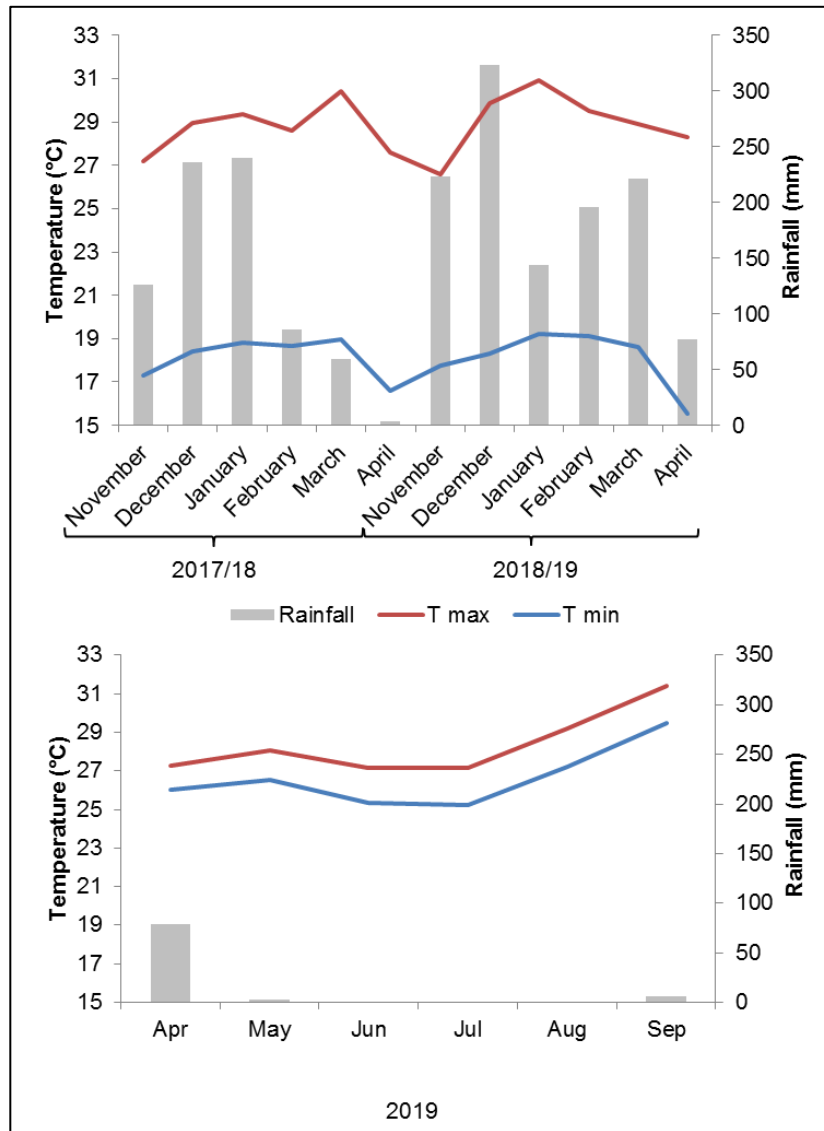
WICKHAM H. **ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis**. Springer-Verlag New York, 2016.

ZENG, Y. *et al.* Control of plant height by 24 alleles at 12 quantitative trait loci in rice. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 19, p. 200-207, 2019.

ZHU, J. Abiotic stress signaling and responses in plants. **Cell**, v. 167, n. 2, p. 313-324, 2016.

ANNEX A

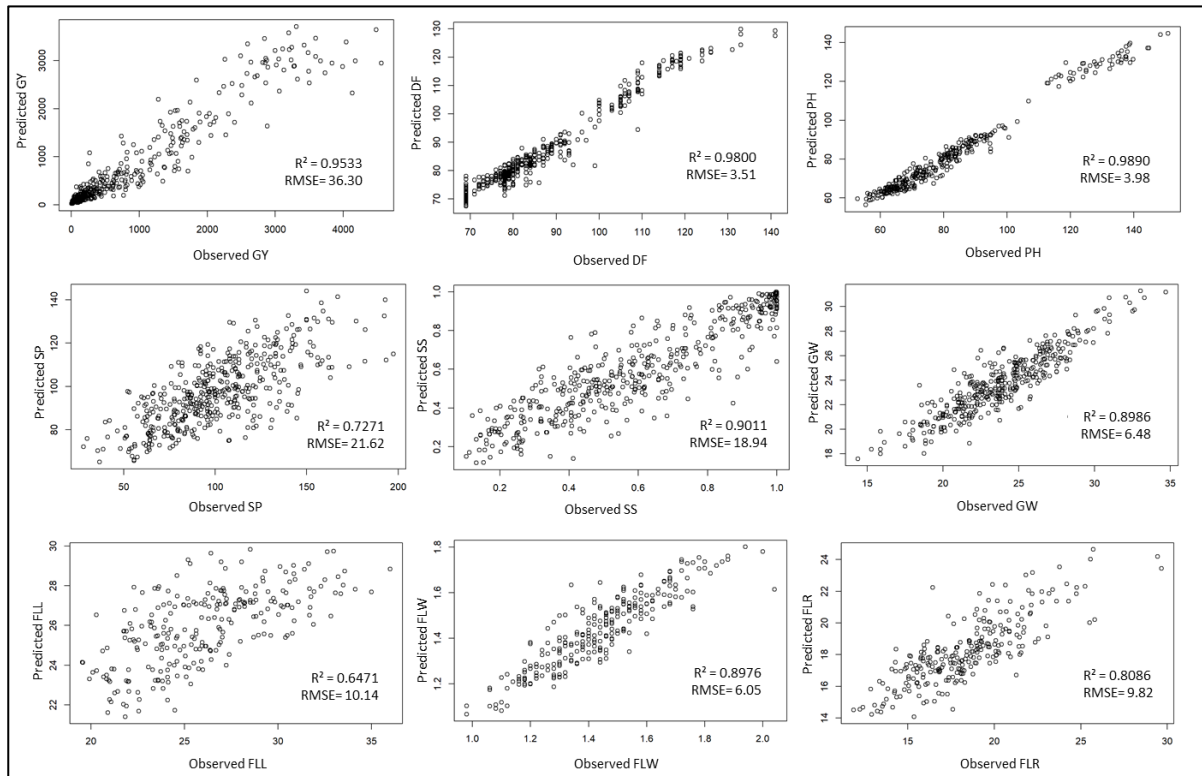
Figure 6 – Rainfall, maximum (Tmax) and minimum (Tmin) temperature obtained during the experimental period in the crop years 2017/18 and 28/19 at Center for scientific and technological development in agriculture of the Federal University of Lavras (UFLA), Lavras, Minas Gerais state, and at the Experimental Station of Emater, Porangatu, Goiás State.



Source: BDMEP - INMET (2021)

## APPENDIX A

Figure 7 – Quantitative relationship between the predicted and the observed of grain yield (GY, in  $\text{kg ha}^{-1}$ ), number of days to flowering (DF), plant height (PH, in cm), 1000-grain weight (GW, in g), number of spikelet per panicle (SP), spikelet sterility (SS), flag leaf length (FLL, in cm), flag leaf width (FLW, in cm), and flag leaf length to width ratio (FLR). The prediction models were evaluated by root mean square error (RMSE), and the determination coefficient of observed versus predicted values ( $R^2$ ).



Source: The author (2021).

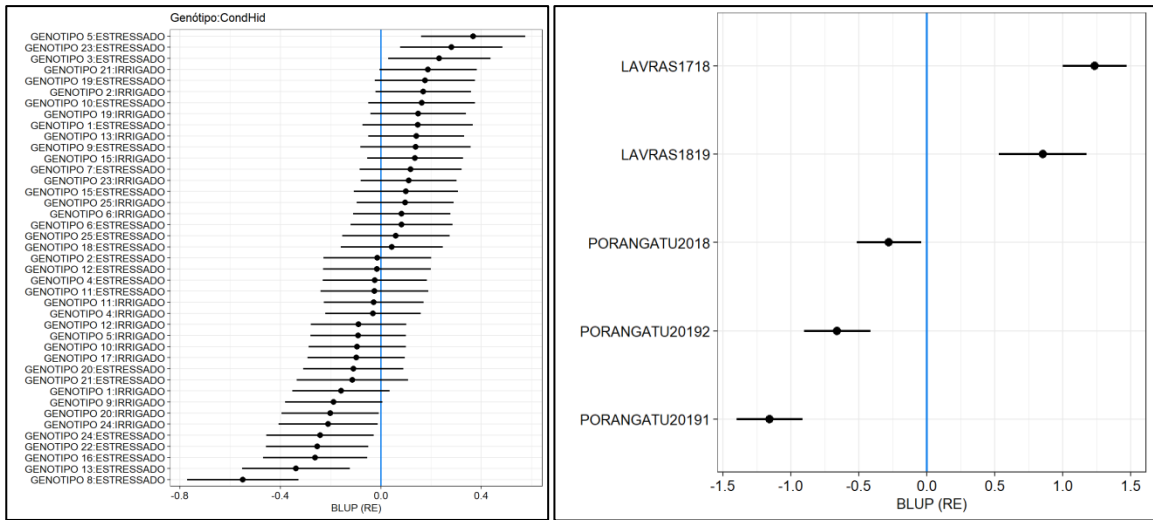
Table 2 - Variance components and likelihood ratio test (LRT).

Trait	Source	Variance components		
		Estimate	Std.Dev.	p-value
GY	Genotype (G)	0.0093	0.0964	0.0063**
	G x E x WC	0.0982	0.3133	0.0266*
	G x WC	0.0685	0.2618	0.0291*
	Environments (E)	1.0918	1.0449	
	Residual	0.3827	0.6186	
DF	Genotype (G)	0.0012	0.0348	0.0030**
	G x E x WC	0.0002	0.0127	0.2669 <sup>ns</sup>
	L x WC	0.0014	0.0378	0.0109*
	G x E	0.0008	0.0286	0.0028**
	Environments (E)	0.0242	0.1557	
PH	Residual	0.0017	0.0412	
	Genotype (G)	0.0013	0.0355	0.0027**
	G x E x WC	0.0013	0.0357	0.0029**
	Environments (E)	0.0770	0.2775	
	Residual	0.0026	0.0512	
SP	Genotype (G)	0.0039	0.0628	0.0029**
	G x E x C	0.0095	0.0973	0.0404*
	Environments (E)	0.0242	0.1554	
SS	Residual	0.0627	0.2504	
	Genotype (G)	0.1059	0.3255	0.0041**
	Environments (E)	0.6481	0.8050	
WG	Genotype (G)	0.0039	0.0622	0.0030**
	G x E x WC	0.0017	0.0410	0.0174*
	G x WC	0.0018	0.0419	0.0114*
	Environments (E)	0.0039		
	Residual	0.0067	0.0817	
FLL	Genotype (G)	0.0025	0.0016	0.0052**
	Residual	0.0110	0.1048	
FLW	Genotype (G)	0.0034	0.0581	0.0017**
	GxE	0.0015	0.0389	0.0030**
	Residual	0.0047	0.0683	
FLR	Genotype (G)	0.0055	0.0744	0.0018**
	G x E	0.0024	0.0488	0.0279*
	Residual	0.0118	0.1086	

\* and \*\* Significant at  $P < 0.05$  and  $0.01$  levels, respectively; ns: no significant.

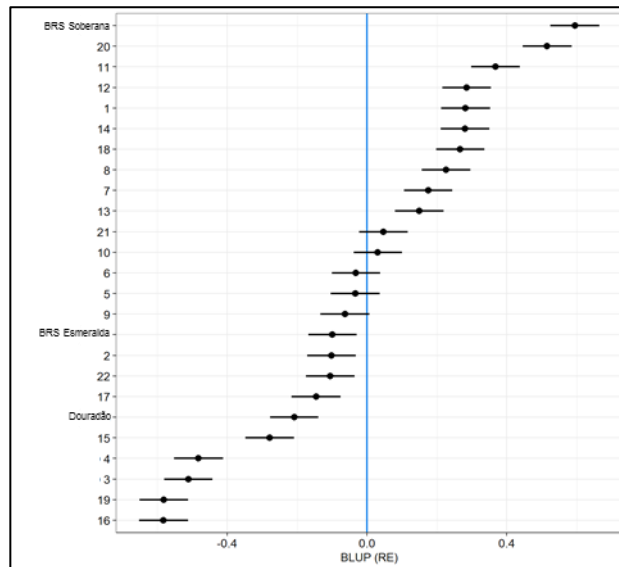
Source: The author (2021).

Figure 8 - Grain yield BLUP's estimates for genotypes x water condition interaction (left) and environments (right)



Source: The author (2021).

Figure 9 - Spikelet sterility rate BLUP's estimates for genotypes evaluated.



Source: The author (2021).

Table 3 - Analysis of types II and III Wald  $\chi^2$  tests reporting significant effects corresponding to the fixed-effect models, presenting  $\chi^2$  estimates, degrees of freedom (Df) and probability values Pr(>Chisq).

Trait	Source	$\chi^2$	Df	Pr(>Chisq)
GY		22.947	1	0.0000**
DF		9.3484	1	0.0022**
PH		48.071	1	0.0000**
SP		0.2761	1	0.5993 <sup>ns</sup>
SS	Water Condition (WC)	25.366	1	0.0000**
GW		11.61	1	0.0007**
FLL		6.8831	1	0.0087**
FLW		10.529	1	0.0012**
FLR		0.0078	1	0.9296 <sup>ns</sup>
FLL		7.8888	2	0.0194*
FLW	Environments (E)	34.911	2	0.0000**
FLR		33.599	2	0.0000**
FLL		28.836	1	0.0000**
FLW	WC x E	4.3713	1	0.0366*
FLR		7.2974	1	0.0069**

\* and \*\* Significant at P < 0.05 and 0.01 levels, respectively; ns: no significant.

Source: The author (2021).

### **CAPÍTULO 3 – ESTABILIDADE E DESEMPENHO FENOTÍPICO DE ARROZ DE TERRAS ALTAS SUBMETIDOS AO DÉFICIT HÍDRICO UTILIZANDO ÍNDICE PARA MÚLTIPLAS CARACTERÍSTICAS**

#### **RESUMO**

O estresse por déficit hídrico tem sido considerado um dos maiores riscos para a segurança alimentar e a sustentabilidade para a cultura do arroz em todo o mundo. Porém, tolerância ao déficit hídrico é considerada uma característica complexa e os experimentos envolvendo este tipo de avaliação são de difícil condução. Para a recomendação de genótipos com maior tolerância é necessário que a avaliação, destes, seja feita em um número grande de ambientes, associando diferentes condições hídricas, locais e anos agrícolas. Entretanto, a maioria dos estudos envolvendo multi-ambientes leva em consideração apenas um caráter, o que pode tornar a recomendação de genótipos menos eficiente. Desta forma, o presente trabalho teve como objetivo estudar a estabilidade associada ao alto desempenho produtivo para multi-caracteres em genótipos de arroz de terras altas avaliados em ambientes com condições hídricas favoráveis e não favoráveis à cultura utilizando-se da metodologia WAASB. Foram avaliados 25 genótipos em nove ambientes com e sem deficiência hídrica. Foram avaliados: produtividade de grãos, número de dias decorridos da semeadura ao florescimento, número de espiguetas/panícula, peso de 1000 grãos e porcentagem de esterilidade de espiguetas. A metodologia WAASB mostrou-se útil para a seleção visando multi características e indicou que Douradão e as linhagens 2, 21 e 11 foram os genótipos com maior estabilidade associados a um maior desempenho para o conjunto de caracteres em ambientes com e sem estresse ao déficit hídrico.

**Palavras-chave:** *Oryza sativa*. WAASB. MTSI. Adaptabilidade.

## 1 INTRODUÇÃO

O arroz está entre as culturas mais importantes no mundo e é alimento base para grande parte da população mundial, sendo cultivado em uma gama de regiões no globo e em diferentes sistemas de produção (FAO, 2019; KHAN *et al.*, 2021). O Brasil se estabelece como o oitavo maior produtor deste cereal, com dois principais sistemas de produção, de terras altas e inundado (CONAB, 2021).

O arroz de terras altas vem sendo considerado uma importante alternativa para a produção no país, como um melhor aproveitamento do uso da água e melhores vantagens em relação à distribuição da produção. Isto, pois, 81% desta produção atualmente concentra-se em dois estados brasileiros, o que se considera um alto risco à sustentabilidade da cultura e à segurança alimentar no país (CARVALHO *et al.*, 2020). Ainda, condições aeróbicas, no qual o arroz de terras altas é cultivado, possui menor acúmulo de arsênio (As) nos grãos do que em cultivo anaeróbico, com concentrações 10 a 15 vezes menores (XU *et al.*, 2008).

Outra vantagem do cultivo em terras altas diz respeito a não contribuição para a emissão de metano (CH<sub>4</sub>). O metano é produzido em condições anaeróbicas associadas a solos inundados. Esse é um gás de efeito estufa, o qual é uma das principais causas do aquecimento global e das mudanças climáticas. O cultivo de arroz irrigado é uma fonte de metano e contribui atualmente com 11% da emissão global. Anualmente, no Brasil, o arroz inundado contribui com a emissão de aproximadamente 460 mil toneladas do gás (BRASIL, 2019; RUNKLE *et al.*, 2019; SETYANTO *et al.*, 2018).

O cultivo de arroz irrigado chega a requerer 3000 a 5000 L de água para a produção de 1 kg do grão. Em nível global, 70 a 80% da água potável é usada na agricultura e somente o arroz utiliza 85% dessa água (PATHAK *et al.*, 2011). Sendo imprescindível cada vez mais a utilização de cultivares e sistemas produtivos mais eficientes no uso da água. Entretanto, o arroz pode sofrer com os estresses, principalmente o déficit hídrico, o qual é considerado o mais prejudicial à cultura (ZHU, 2016).

Desta forma, dentro dos programas de melhoramento, faz-se necessário a avaliação dos genótipos em condições hídricas contrastantes em busca de genótipos com maior tolerância e adaptabilidade ao referido estresse. Entretanto, grande parte dos caracteres avaliados no arroz é de ordem quantitativa, ou seja, são controlados por muitos genes, sofrendo grande variação ambiental e geralmente apresentam interação genótipos por ambientes (G x A) (MISHRA *et*



*al.*, 2019). A presença da interação pode dificultar a seleção de genótipos superiores, uma vez que, o valor genotípico de um determinado caráter varia dependendo do ambiente. Desta forma, buscam-se genótipos que associem alta estabilidade associados a altos desempenhos, ou seja, adaptáveis (MANUKYAN *et al.*, 2019).

Dentre as metodologias para estudo da estabilidade, Olivoto *et al.* (2019b) propuseram o WAASB (Weighted Average of Absolute Scores) para melhor caracterização dos genótipos ideais com base na estabilidade e no desempenho fenotípico. Este modelo é uma combinação dos recursos do AMMI (Additive Main Effects and Multiplicative Interaction Analzes) e BLUP (Best Linear Unbiased Prediction) em um único índice. Uma vantagem da utilização deste método diz respeito às informações utilizadas para compor às análises. Na maioria dos métodos, utilizam-se informações de apenas um caráter e, ao se utilizar o método proposto por esses autores, as informações dos multi-caracteres são levadas em consideração para a seleção, fato que auxilia, sobremaneira, a recomendação de genótipos com superiores desempenhos fenotípicos.

Nesse sentido, propõem-se o estudo da estabilidade associada ao alto desempenho para multi-caracteres em genótipos de arroz de terras altas avaliados em ambientes com condições hídricas favoráveis e não favoráveis à cultura, utilizando-se da metodologia WAASB.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Locais

Os experimentos foram conduzidos em latossolos nas localidades de: a) Lavras- MG, Brasil, latitude 21°14'S, longitude 44°59'W, altitude 919 m e clima Cwa de acordo com a classificação de Köppen (clima subtropical úmido influenciado pelas monções), no Centro de Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Agropecuária da UFLA (CDCT) – Fazenda Muquém. Época de cultivo entre os meses de Novembro a Março; e b) Porangatu-GO, Brasil, latitude 13° 18' S latitude e 49° 06' W longitude, altitude 391 m e clima Aw (clima de savana com invernos secos) na Estação Experimental da Emater - GO. Época de cultivo entre Abril a Setembro, quando a precipitação é praticamente nula (ANEXO A).

### 2.2 Germoplasma

Foram utilizados 25 genótipos, dos quais 22 são acessos contrastantes de um painel para a tolerância à seca, desenvolvido pelo Programa de Melhoramento de Arroz de Terras Altas da EMBRAPA. Esse painel foi originado pelo cruzamento entre as cultivares BRS Soberana e Douradão, as quais são duas cultivares com respostas divergentes para a tolerância à seca (GUIMARÃES *et al.*, 2016). Três cultivares testemunhas também compuseram o experimento: BRS Soberana, BRS Esmeralda e Douradão, consideradas como susceptível, mediantemente tolerante e tolerante ao déficit hídrico (CASTRO *et al.*, 2014; GUIMARÃES *et al.*, 2016; HEINEMANN *et al.*, 2019).

### 2.3 Descrição dos Experimentos

Foram testados nove ambientes, sendo que em Lavras, os experimentos foram implantados em dois anos agrícolas, em 2017/18, um experimento sob efeito de déficit hídrico e outro sob condições hídricas ideais de cultivo. Em 2018/19, somente um experimento com condições hídricas ideais. Em Porangatu, em 2018 foram instalados dois experimentos com condições hídricas divergentes e, em 2019, dois experimentos para cada condição hídrica foram

conduzidos. Porangatu-1 denominou-se o primeiro conjunto de ambientes e, Porangatu-2 o segundo (TABELA 1).

Tabela 1 – Relação de ambientes avaliados, sendo ambientes determinados pela combinação entre Locais x Anos agrícolas x Condições hídricas.

<b>Local</b>	<b>Ano agrícola</b>	<b>Condição hídrica</b>	<b>Ambiente</b>
LAVRAS	2017/18	ESTRESSADO	A1
LAVRAS	2017/18	IRRIGADO	A2
LAVRAS	2018/19	IRRIGADO	A3
PORANGATU	2018	ESTRESSADO	A4
PORANGATU	2018	IRRIGADO	A5
PORANGATU - 1	2019	ESTRESSADO	A6
PORANGATU - 2	2019	ESTRESSADO	A7
PORANGATU - 1	2019	IRRIGADO	A8
PORANGATU - 2	2019	IRRIGADO	A9

Fonte: Do autor (2021).

O estresse foi aplicado durante a fase reprodutiva da cultura, por volta dos 50 dias após a semeadura, permanecendo até o final do ciclo. Os experimentos foram monitorados por meio de leitura em tensiômetros aplicados a uma profundidade de 15 cm. Em que, sob condição hídrica ideal os experimentos foram irrigados quando a leitura do tensiômetro alcançava -25 kilopascals (kPa). Nos ambientes sob estresse, a irrigação era acionada apenas quando o potencial hídrico do solo era igual a -50 kPa, o que representa estresse para o arroz (STONE; LIBARDI; REICHARDT, 1986; STONE; MOREIRA; SILVA, 1997). De modo geral é possível se dizer que os ambientes estressados, receberam metade da água provida em ambiente de condições hídricas ideais.

Um látice simples 5x5 foi utilizado em todos os experimentos. Em Porangatu as parcelas foram constituídas por quatro linhas de quatro metros. Já em Lavras, no primeiro ano de cultivo, as parcelas foram constituídas por duas linhas de três metros, já no segundo ano, quatro linhas de cinco metros. Todos os demais manejos culturais utilizados nos experimentos foram os mesmos recomendados para a cultura do arroz em suas localidades, exceto pelo uso de fungicida, o qual não é utilizado dentro do programa de melhoramento. Ao longo da condução dos experimentos foram avaliados os caracteres:

- *Produtividade de grãos (GY, em kg ha<sup>-1</sup>):* peso dos grãos da parcela após colheita e secagem para 13% de umidade, transformados em kg.ha<sup>-1</sup>.
- *Número de dias para o florescimento (DF):* número de dias entre a semeadura ao florescimento médio, quando 50% das plantas da parcela emitiram panículas;
- *Altura de plantas (PH, em cm):* média de cinco plantas da parcela, medida do solo à extremidade da panícula mais alta;
- *Peso de 1000 grãos (GW, em g):* oito amostras contendo cem grãos cheios foram pesadas separadamente e a média geral das amostras foi multiplicada por dez, de acordo com as Regras para Análise de Sementes - RAS (BRASIL, 2009);
- *Número de espiguetas por panícula (SP):* estimado a partir de cinco panículas coletadas aleatoriamente na parcela ao final do ciclo das plantas;
- *Esterilidade de Espiguetas (SS, em %):* cinco panículas foram aleatoriamente coletadas ao final do ciclo e o total do número de espiguetas cheias e vazias foi contabilizado, em que:

$$SS (\%) = \frac{\text{número de espiguetas vazias}}{\text{número total de espiguetas}} \times 100$$

## 2.4 Análise de Dados

Devido ao grande desbalanceamento dos dados, optou-se pela abordagem via modelos mistos. O modelo estatístico proposto foi:

$$y = Xb + Zg + Wc + Vd + Uk + e$$

em que b, g, c, d, k e e correspondem aos vetores, respectivamente, de ambientes (efeito fixo), efeito dos genótipos (aleatório), efeitos da interação genótipos x ambientes (aleatório), efeito de repetição dentro de ambientes (fixo), efeito de blocos dentro de repetição dentro de ambientes e de erros (aleatórios). X, Z, W, V e U representam as matrizes de incidência que associam os parâmetros desconhecidos b, g, c, d, k, respectivamente, para o vetor y de dados. Ressalta-se que uma transformação logarítmica foi aplicada para as variáveis resposta GY, DF, GW e SP uma vez que estas variáveis contínuas e restritas a valores positivos. Assim, além de assegurar a normalidade e/ou homoscedasticidade, ao serem transformadas novamente, todas as predições serão positivas.

Em seguida, o índice de estabilidade multi-caracter WAASB (Média Ponderada dos Scores Absolutos) foi calculado de acordo com a equação (OLIVOTO *et al.*, 2019b):

$$WAASB_i = \frac{\sum_{k=1}^p |IPCA_{ik} \times EP_k|}{\sum_{k=1}^p EP_k}$$

em que,  $WAASB_i$  é a média ponderada dos scores absolutos dos  $i$  genótipos;  $IPCA_{ik}$  é o score do genótipo  $i$  no  $k$  eixo de componente principal da interação (IPCA); e  $EP_k$  é variância explicada pelo  $k$  IPCA. Sendo considerados mais estáveis os genótipos com os menores valores para WAASB.

Para a seleção de genótipos que combinem estabilidade e alto desempenho, foi calculado o índice WAASBY proposto por (OLIVOTO *et al.*, 2019a), o qual é um índice de superioridade que permite ponderar entre desempenho dos múltiplos caracteres e a estabilidade (índice WAASB).

$$WAASBY_i = \frac{(rG_i \times \theta_Y) + (rW_i \times \theta_S)}{\theta_Y + \theta_S}$$

em que  $WAASBY_i$  é o índice de superioridade para o  $i$  genótipo que pondera entre desempenho e estabilidade,  $\theta_Y$  e  $\theta_S$  são os pesos para as variáveis respostas e estabilidade, respectivamente, assumidos como sendo 50 e 50 neste estudo;  $rG_i$  é o valor redimensionado (0-100) da variável resposta; e  $rW_i$  é o score WAASB.

Olivoto *et al.* (2019a) propõem o uso do índice MTSI (multi-trait stability index) que permite em um único índice a seleção para multi caracteres associando estabilidade e desempenho. Este índice é calculado considerando um agrupamento por similaridade entre os caracteres avaliados em fatores e considera a distância existente entre o valor encontrado para um determinado genótipo e o ideótipo para cada caráter, ou para cada conjunto de fatores. O genótipo com menores desvios entre o ideótipo e o observado terá maior índice MTSI. O número de genótipos selecionados no MTSI será influenciado pelo índice de seleção. Para este trabalho, considerou-se uma intensidade de seleção de 15%, segundo equação:

$$MTSI_i = \left[ \sum_{j=1}^f (F_{ij} - F_j)^2 \right]^{0.5}$$

em que  $MTSI_i$  é o índice de estabilidade multi-trait para o genótipo  $i$ ;  $F_{ij}$  é o score  $j$  do genótipo  $i$ ; e  $F_j$  é o score  $j$  ideótipo.

As análises estatísticas foram realizadas com o auxílio do software R (R CORE TEAM, (2021) utilizando-se o pacote metan (OLIVOTO, 2019). Além disso, de modo a avaliar a precisão experimental foram estimados quatro parâmetros utilizados em experimentos

envolvendo melhoramento de plantas: acurácia seletiva (rgg), coeficiente de variação genético (CVg), coeficiente de variação residual (CVe) e coeficiente de variação relativa (CVr).

### 3 RESULTADOS

Para a acurácia, as estimativas variaram entre 0,63 a 0,94, para SS e GW, respectivamente, e foram consideradas de moderadas a altas (RESENDE; DUARTE, 2007). O coeficiente de variação genético, que se refere à variabilidade genética presente, observou-se baixo entre todos os caracteres (GUIMARÃES *et al.*, 2021). Ao se observar o coeficiente de variação residual, SS apresentou a maior estimativa, com 45% de variação, já dias para o florescimento (DF) obteve às menores magnitudes, sendo esta segunda estimativa considerada de alta precisão segundo o método de classificação para a cultura do arroz de terras altas proposto por Costa, Seraphin; Zimmermann (2002). O coeficiente de correlação relativa (CVr) é a razão entre CVg e CVe. Neste experimento o CVr variou entre 0.1972 e 0.8939, sendo que para DF e GW as razões foram próximas de 1. Valores de CVr  $\geq 1$  indicam situação favorável para a seleção do caráter (SILVA *et al.*, 2017).

Tabela 2 - p-valor para análise de deviance e teste F e parâmetros estatísticos em caracteres de arroz de terras altas para análise conjunta para nove ambientes divergentes para condição hídrica.

<b>Teste de máxima verossimilhança restrita (LRT)</b>					
<b>Fonte de Variação</b>	<b>GY</b>	<b>DF</b>	<b>SP</b>	<b>GW</b>	<b>SS</b>
Genótipos (G)	0,1024	0,0000	0,0330	0,0000	0,1004
Bloco/Rep/Ambientes	0,0002	0,1478	0,1540	0,0152	0,0000
G x A	0,0020	0,0000	0,1037	0,0013	0,7483
<b>Teste F - Componentes de efeito fixo</b>					
Ambientes (A)	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Rep/Ambientes	0,0000	0,0595	0,1102	0,1571	0,0007
rgg'	0,6515	0,9345	0,6822	0,9406	0,632
CVg (%)	2,756	0,8202	1,357	2,237	8,877
Cve (%)	10,28	0,9176	5,443	2,596	45,02
CVr	0,2681	0,8939	0,2493	0,8617	0,1972

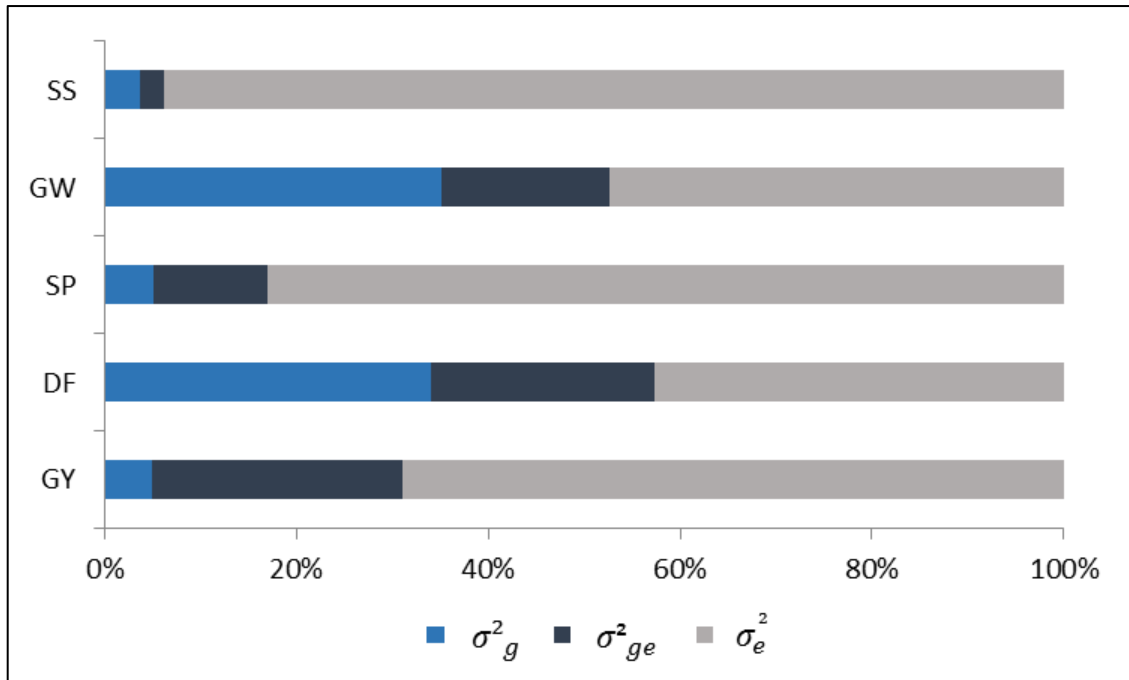
rgg: acurácia seletiva, CVg: coeficiente de variação genético, Cve: coeficiente de variação residual e CVr: coeficiente de variação relativa. GY: produtividade de grãos (kg ha<sup>-1</sup>); DF: número de dias para o florescimento; SP: número de espiguetas por panícula; GW: peso de 1000 grãos (g); SS: esterilidade de espiguetas (%).

Fonte: Do autor (2021).

Os efeitos do modelo foram testados pelo teste da máxima verossimilhança restrita (LRT), em que se mostrou significativo ( $p < 0,05$ ) para efeito de genótipos nos caracteres DF, SP e GW. Já para a interação genótipos por ambientes (G x A), GY, DF, GW apresentaram efeito significativo. O efeito de ambiente foi considerado de natureza fixa, e apresentou significância para todos os caracteres.

Foi observado que para os caracteres GW e DF, a proporção da variância genotípica contribuiu mais para a composição da variância fenotípica do que a interação (FIGURA 1). Entretanto, ainda que menor, a interação GxA foi significativa para esses caracteres. Também, se observou interação significativa para GY, e, nesse caso, o efeito da interação foi mais expressivo, e sua contribuição para a variância fenotípica foi maior que a variância genotípica. Entretanto, nota-se que nesta característica, a variância residual foi mais alta (57% da variância fenotípica), o que sugere uma grande influência ambiental para o caráter. Ainda se observa que a variância residual, também, foi a mais expressiva para os caracteres SS e SP, em que 76% e 78% da variância fenotípica foram devido à variância residual.

Figura 1 – Proporção das variâncias genotípica ( $\sigma_g^2$ ), residual ( $\sigma_e^2$ ) e da interação genótipos x ambientes ( $\sigma_{ge}^2$ ) para os caracteres produtividade de grãos (GY, em kg ha<sup>-1</sup>); número de dias para o florescimento (DF), peso de 1000 grãos (GW, em g), número de espiguetas por panícula (SP) e taxa de esterilidade de espiguetas (SS, em %).



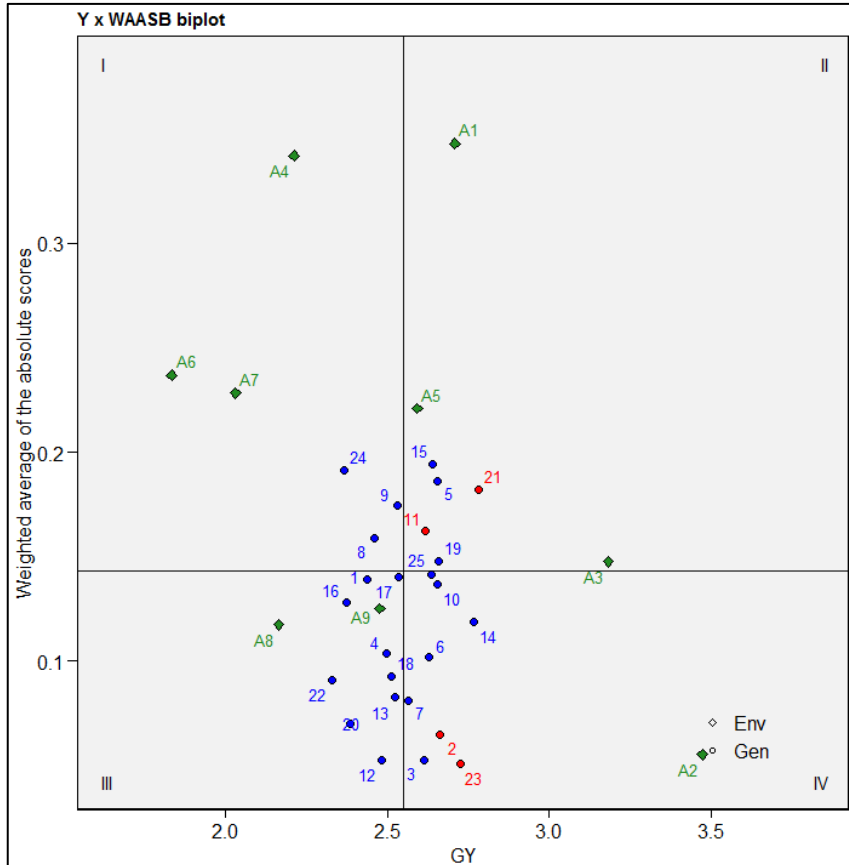
Fonte: Do autor (2021).

Os quadrantes da Figura 2 representam as quatro classes para interação genótipos x ambientes, em que no primeiro quadrante (superior esquerdo), estão classificados os genótipos mais instáveis, ou seja, com alto valor para WAASB. Neste quadrante para GY, observamos três genótipos: 24 (BRS Soberana), a qual se mostrou com maior estimativa para WAASB, linhagens 9 e 8. Além desses genótipos os ambientes A4, A6 e A7, os quais são todos ambientes estressados em Porangatu, foram classificados neste quadrante, portanto, sendo considerados como ambientes discriminativos, porém não favoráveis à expressão do caráter. No segundo quadrante (superior direito), estão classificados os genótipos com alto desempenho, porém baixa estabilidade. Neste quadrante cinco genótipos foram classificados: 15, 21, 5, 11 e 19. O ambiente A1 (Lavras 2017/18 – Estressado) foi aquele com maior valor para o índice, indicando que este ambiente possui alta capacidade discriminativa para os genótipos, além disso, contribuiu favoravelmente para a expressão do caráter. O ambiente A5, Porangatu 2018 Irrigado, ainda que muito próximo da grande média para GY também se encontra neste quadrante e é considerado favorável ao caráter. E o ambiente A3, Lavras 2018/19, próximo ao limítrofe para WAASB, foi também classificado neste quadrante.



O quadrante III encontram-se os acessos que são pouco produtivos e com alta estabilidade, por terem valores mais baixos para WAASB. Uma vez que, para o WAASB, quanto menor o valor do índice, maior a estabilidade. Ambientes classificados neste quadrante foram pouco discriminativos para caráter, baixo score WAASB, e não favoráveis, por estarem abaixo da média do caráter. Os ambientes A8 e A9, Porangatu 2019-1 e 2019-2 irrigado, respectivamente, se encontraram nesta classificação. E, por fim, o quadrante IV, encontra-se ambientes que foram pouco discriminativos, porém contribuíram a favor da produtividade de grãos, neste caso, o ambiente A2, Lavras 2017/18 irrigado. Os genótipos neste quadrante são os ideais para a seleção visando unicamente este caráter, uma vez que associam alta estabilidade fenotípica e produtividade. Neste quadrante encontram-se os genótipos: 23 (Douradão), 2, 3, 7, 6, 14, 10 e 25 (BRS Esmeralda), apesar de esta última cultivar estar muito próxima do limítrofe para WAASB.

Figura 2 - Biplot entre os scores WAASB para os 25 genótipos de arroz avaliados em nove ambientes. As linhas vertical e horizontal indicam a direção de aumento da magnitude do caráter GY e da estabilidade.



Fonte: Do autor (2021).

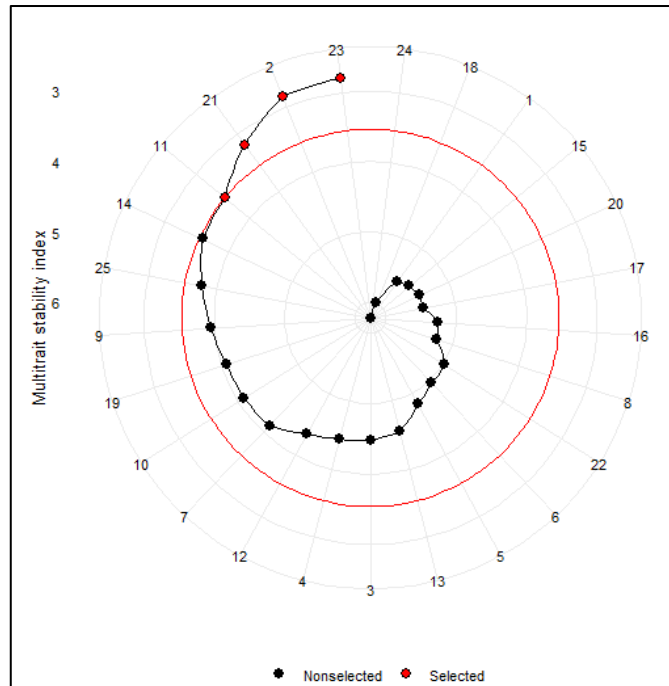
Os gráficos biplots para os demais caracteres encontram-se nas Figuras 5 a 8 (APÊNDICE A). Vale ressaltar que para DF (FIGURA 5, APÊNDICE A), nota-se que os ambientes de Lavras (A1, A2 e A3) foram os ambientes discriminativos que aumentaram o número de dias para o florescimento, já os ambientes em Porangatu contribuíram para a diminuição de DF. E os genótipos, de maneira geral ficaram muito próximos da média geral, indicando pouca variabilidade entre os genótipos.

A partir dos dados de WAASB e dos BLUPS para os caracteres, foi estimado o índice WAASBY que ranqueia os genótipos para cada caráter levando em consideração o peso atribuído para a estabilidade e desempenho fenotípico (FIGURA 9, APÊNDICE A).

Douradão (23), destacou-se entre os cinco melhores genótipos para os caracteres, GY, GW e SP. BRS Esmeralda, por sua vez, para os caracteres SP e DF. BRS Soberana esteve entre os piores scores de WAASBY para todos os caracteres. Além das cultivares testemunhas, vale ressaltar o desempenho do genótipo 21, que mostrou altos valores para GY, DF e SS.

Pelo índice MTSI foram selecionados os genótipos 23 (Douradão), 2, 21 e 11 (FIGURA 3). Portanto, sendo considerados os genótipos que associaram maior estabilidade e desempenho fenotípico considerando os caracteres GY, DF, GW, SP e SS, submetidos às diferentes condições hídricas.

Figura 3 – Genótipos selecionados pelo índice MTSI, considerando uma intensidade de seleção de 15% para os caracteres produtividade de grãos (GY), dias para o florescimento (DF), peso de 1000 grãos (GW), número de espiguetas por panícula (SP) e porcentagem de esterilidade de espiguetas (SS). Os genótipos selecionados são mostrados em vermelho.



Fonte: Do autor (2021).

#### 4 DISCUSSÃO

Acurácia é um parâmetro que mensura a correlação entre os valores genotípicos preditos e os reais, sendo assim, valores acima de 70% (0,70) podem ser considerados de alta acurácia, o que refletirá em uma alta precisão experimental (RESENDE; DUARTE, 2007). Neste experimento observou-se que os caracteres DF e GW foram aqueles que obtiveram as maiores estimativas para a acurácia. Entretanto, GY, SP e SS apresentaram valores medianos. É importante salientar que valores de baixa acurácia não necessariamente estão relacionados à baixa precisão. A baixa variabilidade genética do caráter pode influenciar em baixas estimativas para a acurácia, sendo assim, além da acurácia foram estimados os coeficientes de variação (TABELA 2).

Ao se observar o coeficiente genético ( $CV_g$ ), verifica-se uma baixa variação genética entre os genótipos para todos os caracteres. Dos acessos avaliados, 22 deles provêm do cruzamento entre BRS Soberana e Douradão, cultivares testemunhas avaliadas. Sendo apenas

um genótipo não aparentado com os demais, a BRS Esmeralda. Esse fato, a princípio explica as pequenas magnitudes das estimativas, visto que  $CV_g$  relaciona-se à variabilidade genética presente dentro do experimento.

O coeficiente de variação relativo ( $CV_r$ ), o qual é a razão entre  $CV_g/CV_e$ , indica a situação para a seleção do caráter. Valores  $\geq 1$  representam maiores ganhos à seleção, uma vez que a variação genética é igual ou maior que a variação residual no experimento. Em que quanto maiores forem os valores para este coeficiente menor será a influência ambiental sofrida pelo caráter (SANTOS *et al.*, 2019). Foi observado que nenhum dos caracteres obteve estimativas favoráveis e GY, SP e SS foram os caracteres com menor  $CV_r$ . Faz-se lembrar que SP e SS são componentes de produção e influenciáveis pelo ambiente e, juntamente com a produtividade, são de baixa herdabilidade, principalmente em experimentos com déficit hídrico (MANICKAVELU *et al.*, 2006).

Dentre os caracteres, observou-se efeito da interação ( $G \times A$ ) para GY, DF e GW. O que significa que o comportamento desses genótipos ao longo dos ambientes não foram coincidentes (RAMALHO *et al.*, 2012). Ao se avaliar experimentos de déficit hídrico é muito comum utilizar essas características para a seleção visando a tolerância à seca. Porém, tendo um baixo coeficiente de variação relativo, associados ao efeito da interação genótipos por ambientes, a seleção univariada, ou seja, uma seleção baseada apenas neste caráter e ou em apenas um ambiente pode não ser o mais indicado nestes casos.

Segundo ZUFFO *et al.* (2020), a seleção multi-ambiental e a utilização de ambientes com diferentes condições, como por exemplo de estresse, irão resultar em maiores ganhos e contribuir na seleção de genótipos com maior adaptabilidade às adversidades ambientais. Segundo os mesmos autores, a metodologia proposta por Olivoto *et al.* (2019b), mostrou-se eficiente para o melhoramento de soja na seleção de genótipos submetidos à diferentes condições de estresse. Entretanto, poucos são os estudos com esta técnica envolvendo experimentos com déficit hídrico (HUSSAIN *et al.*, 2021; SINGAMSETTI *et al.*, 2021; ZUFFO *et al.*, 2020) e ainda não há relatos na literatura sobre a aplicação desta metodologia no estudo de ambientes com estresse à seca na cultura do arroz.

O WAASB (média ponderada dos valores absolutos), parte da decomposição do valor único da matriz BLUP para efeitos da interação ( $G \times A$ ) por meio de um modelo misto linear (LMM). Os genótipos com os valores mais baixos do índice WAASB são mais estáveis. A partir destes valores é possível a representação gráfica Biplot associando os scores de estabilidade

WAASB com o desempenho fenotípico do caráter para todos os genótipos e ambientes. Dentre os caracteres avaliados para a tolerância à seca, a produtividade de grãos tem sido um caráter amplamente utilizado para a seleção. Na Figura 2, encontram-se plotados os scores de WAASB para GY dos 25 genótipos de arroz avaliados em um conjunto de nove ambientes divergentes às condições hídricas. Nota-se que os ambientes de Lavras, em geral, foram classificados como ambientes favoráveis à expressão desse caráter, já o ambiente de Porangatu, em geral, desfavorável.

Os genótipos avaliados não são adaptados às condições ambientais de Porangatu, ainda assim, optou-se pela condução dos experimentos neste ambiente. Isso porque, as condições climáticas de Porangatu não trazem grandes riscos aos experimentos com déficit hídrico, uma vez que nos meses de condução experimental a precipitação é praticamente nula. Desta forma, o controle do estresse é feito com maior rigor e segurança, o que, por exemplo, não é encontrado nos ambientes de Lavras. Assim, nota-se que apesar de Porangatu ter sido classificado como desfavorável ao caráter, este se mostrou um bom ambiente para discriminação dos genótipos para produtividade de grãos.

Além disso, os ambientes estressados, de forma geral, foram aqueles com maiores scores para WAASB, indicando maior capacidade em discriminar os genótipos nestas condições. O que é desejável, uma vez que se espera selecionar os genótipos que possam manter-se mais produtivos e estáveis nestes ambientes. Entre as cultivares testemunhas Douradão (23) e BRS Esmeralda (25), foram classificadas como produtivas e estáveis ao longo dos ambientes e, em contrapartida, BRS Soberana (24), mostrou-se instável e pouco produtiva.

Para DF, foi verificado que as linhagens se encontraram pouco divergentes com suas médias fenotípicas muito próximas à linha média do caráter (linha vertical). Fato esperado, uma vez que foi observada baixa variabilidade genética para o caráter e, que, Douradão e BRS Soberana possuem florescimento similar (HEINEMANN *et al.*, 2009) e os acessos, exceto BRS Esmeralda, são oriundos do cruzamento entre estas duas cultivares.

Olivoto *et al.* (2019b), comentam que o WAASB tem vantagens na interpretação dos resultados de análise multi-ambientes para estabilidade e desempenho isso, porque, diferentes de outros métodos ele computa a contribuição de todos os componentes principais de interação (IPCA), ponderando-os com suas contribuições, tornando possível a explicação em uma representação bidimensional a contribuição de dois ou mais IPCA's. Além disso, permite a utilização do índice WAASBY que para além da estabilidade, pondera o desempenho dos

caráteres utilizando pesos pré-definidos pelo melhorista. Considerando os scores de WAASBY (FIGURA 9, APÊNDICE A), em que, quanto maior o score melhor é o genótipo quanto à associação estabilidade e desempenho, para cada caráter foi obtido os melhores genótipos.

Nos programas de melhoramento a seleção de um genótipo é decorrente de uma seleção com base em multi-caracteres. Desta forma, o índice MTSI propõe uma análise que associa caracteres com alta e positiva correlação, agrupando-os em fatores e, a partir destes fatores, calcula o desvio existente entre cada genótipo e o ideótipo considerando tanto o desempenho quanto a estabilidade. De forma que, os genótipos com menores valores para MTSI são aqueles que estão mais próximos do ideótipo, considerando todos os caracteres (FIGURA 3).

O índice MTSI, com uma intensidade de seleção de 15%, indicou que os genótipos Douradão (23), 2, 21 e 11 foram aqueles que obtiveram os menores scores de MTSI, sendo os mais estáveis e com alto desempenho para os caracteres avaliados, podendo ser utilizados como genitores dentro do programa para tolerância à seca, visando concomitantemente associar demais caracteres favoráveis. Ressalta-se que as linhagens selecionadas por este índice são divergentes quando considerado apenas o índice WAASBY para produtividade de grãos (GY). Indicando que, outros caracteres tiveram influência para a seleção. Esse resultado também foi observado por Sharifi *et al.* (2020) trabalhando com o arroz.

Assim, o estudo da estabilidade e desempenho dos genótipos sob condições de estresse é de grande importância dentro do melhoramento de plantas. E a possibilidade de associação da informação de multi-caracteres em um único índice torna-se uma facilidade aos melhoristas no processo de interpretação e seleção.

## **5 CONCLUSÃO**

A metodologia WAASB indicou que Douradão, e as linhagens 2, 21 e 11 foram os genótipos com maior estabilidade associados a um maior desempenho conjunto para produtividade de grãos (GY), dias para o florescimento (DF), número de espiguetas/panícula (SP), peso de 1000 grãos (GW) e porcentagem de esterilidade de espiguetas (SS), em ambientes com e sem estresse por déficit hídrico.

## **REFERÊNCIAS**

CARVALHO, M. T de M. *et al.* O arroz de terras altas como estratégia para segurança alimentar, intensificação ecológica e adaptação à mudança do clima: rumo aos objetivos de desenvolvimento sustentável para o milênio. **Embrapa Arroz e Feijão-Comunicado Técnico (INFOTECA-E)**, 2020.

CASTRO, A. P. de. *et al.* BRS Esmeralda: cultivar de arroz de terras altas com elevada produtividade e maior tolerância à seca. **Embrapa Arroz e Feijão-Comunicado Técnico (INFOTECA-E)**, 2014.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**, v. 8 – Safra 2021/21, n. 10 – Décimo Levantamento, jul. 2021.

COSTA, N. H. de A. D.; SERAPHIN, J. C.; ZIMMERMANN, F. J. P. Novo método de classificação de coeficientes de variação para a cultura do arroz de terras altas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 3, p. 243-249, 2002.

FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. STAT; TradeSTAT. Disponível em: <<http://faostat.fao.org>.> Acesso em 15 de julho de 2021.

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.

GUIMARÃES, P.H.R. *et al.* Index selection can improve the selection efficiency in a rice recurrent selection population. **Euphytica**, v. 217, n. 5, p. 1-16, 2021.

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. B. *et al.* Upland rice breeding led to increased drought sensitivity in Brazil. **Field Crops Research**, v. 231, p. 57-67, 2019.

HUSSAIN, T. *et al.* Identification of drought tolerant Chickpea genotypes through multi trait stability index. **Saudi journal of biological sciences**, v. 28, n. 12, p. 6818-6828, 2021.

MANICKAVELU, A. *et al.* Drought tolerance in rice: morphological and molecular genetic consideration. **Plant Growth Regulation**, v. 50, n. 2, p. 121-138, 2006.

MANUKYAN, I. R. *et al.* Complex evaluation of productivity and environmental plasticity of the winter wheat breeding material for the conditions of the submontane zone of Central Caucasus. **Scientific Papers: Management, Economic Engineering in Agriculture & Rural Development**, v. 19, n. 4, 2019.

MISHRA, S. *et al.* Identifying superior parents and hybrids for certain quantitative traits in rice (*Oryza sativa* L.) under sodic soils. **Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry**, v. 8, n. 3, p. 01-05, 2019.

RAMALHO, M. A. P. *et al.* Genética na agropecuária. 5 ed., Lavras: Editora UFLA, 2012. 566p.

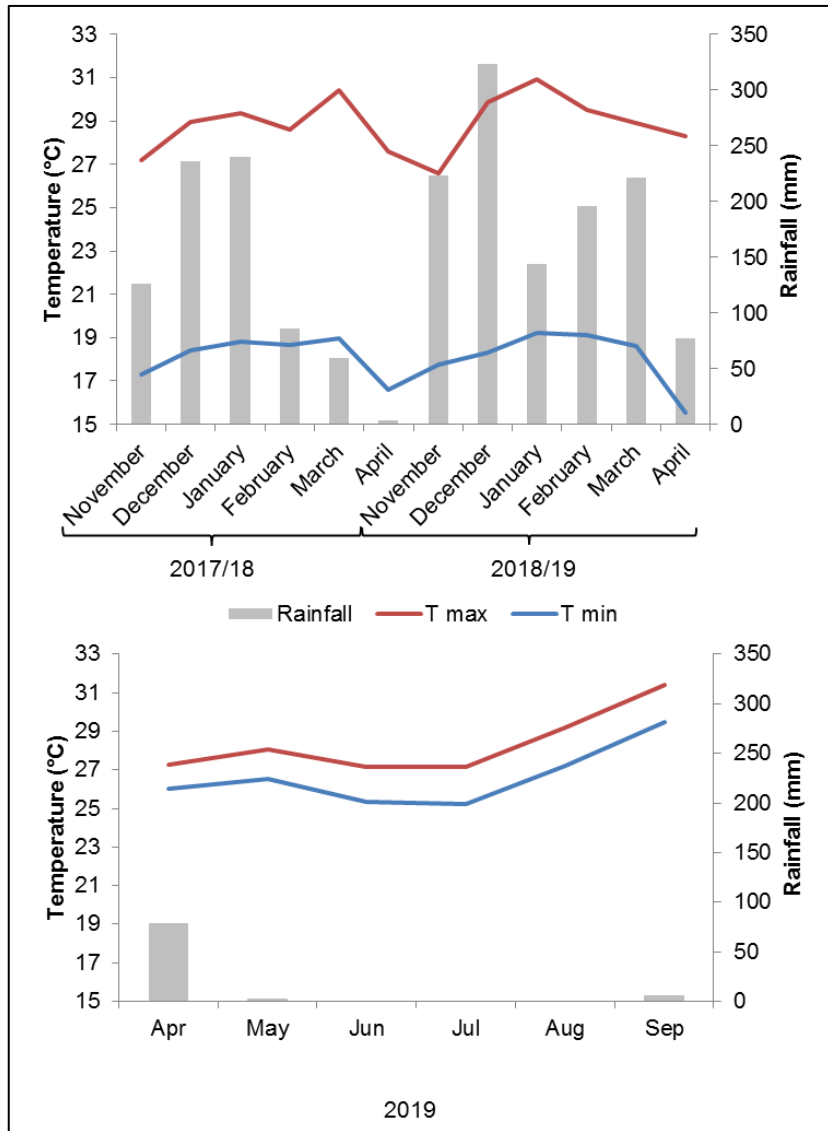
OLIVOTO, T. Metan: multi environment trials analysis. R package version 1.1. 0. 2019.

- OLIVOTO, T. *et al.* Mean performance and stability in multi-environment trials I: Combining features of AMMI and BLUP techniques. **Agronomy Journal**, v. 111, n. 6, p. 2949-2960, 2019a.
- OLIVOTO, T. *et al.* Mean performance and stability in multi-environment trials II: Selection based on multiple traits. **Agronomy Journal**, v. 111, n. 6, p. 2961-2969, 2019b.
- RESENDE, M. D. V.; DUARTE, J. B. Precisão e controle de qualidade em experimentos de avaliação de cultivares. **Embrapa Florestas-Artigo em periódico indexado (ALICE)**, 2007.
- SANTOS, E. R. *et al.* Parâmetros genéticos e avaliação agronômica em progênies F2 de soja no Distrito Federal, Brasil. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias (Agrária)**, v. 14, n. 1, p. 5625, 2019.
- SILVA, L. A. *et al.* Path analysis and canonical correlations for indirect selection of *Jatropha* genotypes with higher oil yield. 2017.
- SINGAMSETTI, A. *et al.* Genotype× environment interaction and selection of maize (*Zea mays* L.) hybrids across moisture regimes. **Field Crops Research**, v. 270, p. 108224, 2021.
- SHARIFI, P. *et al.* Stability of some of rice genotypes based on WAASB and MTSI indices. **Iranian Journal of Genetics and Plant Breeding**, v. 9, n. 2, p. 1-11, 2020.
- STONE, L. F.; LIBARDI, P. L.; REICHARDT, K. Produtividade do arroz e absorção de nitrogênio afetadas pelo veranico e pela adição de vermiculita ao solo. **Embrapa Arroz e Feijão-Artigo em periódico indexado (ALICE)**, 1986.
- STONE, L. F.; MOREIRA, J. A. A.; SILVA, S. C. da. **Tensão da água do solo adequada para controle da irrigação do arroz de terras altas**. EMBRAPA-CNPAP, 1997.
- ZHU, J. Abiotic stress signaling and responses in plants. **Cell**, v. 167, n. 2, p. 313-324, 2016.



**ANEXO A**

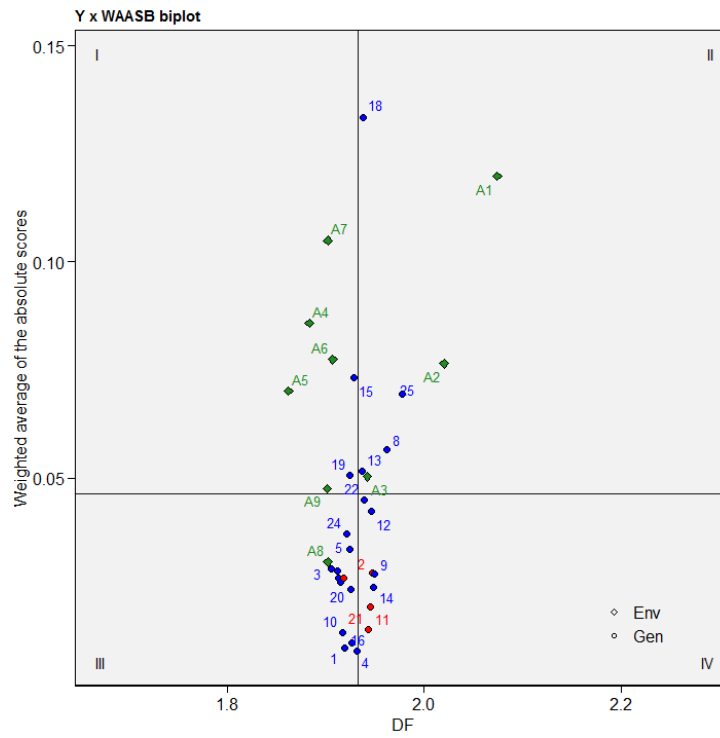
Figura 4 – Rainfall, maximum (Tmax) and minimum (Tmin) temperature obtained during the experimental period in the crop years 2017/18 and 28/19 at Center for scientific and technological development in agriculture of the Federal University of Lavras (UFLA), Lavras, Minas Gerais state, and at the Experimental Station of Emater, Porangatu, Goiás State.



Fonte: BDMEP - INMET (2021).

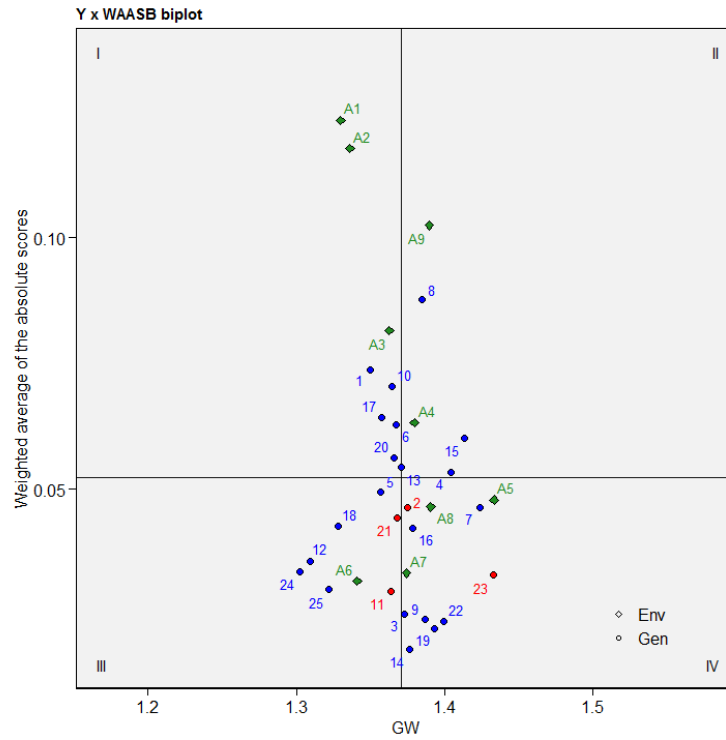
## APÊNDICE A

Figura 5 - Biplot entre os scores WAASB para os 25 genótipos de arroz avaliados em nove ambientes. As linhas vertical e horizontal indicam a direção de aumento da magnitude do caráter DF e da estabilidade.



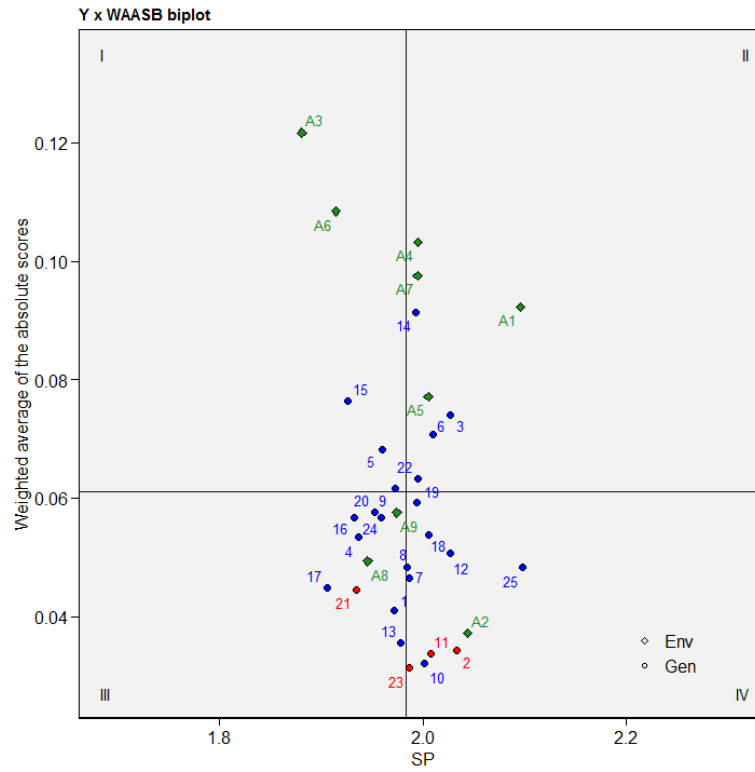
Fonte: Do autor (2021).

Figura 6 - Biplot entre os scores WAASB para os 25 genótipos de arroz avaliados em nove ambientes. As linhas vertical e horizontal indicam a direção de aumento da magnitude do caráter GW e da estabilidade.



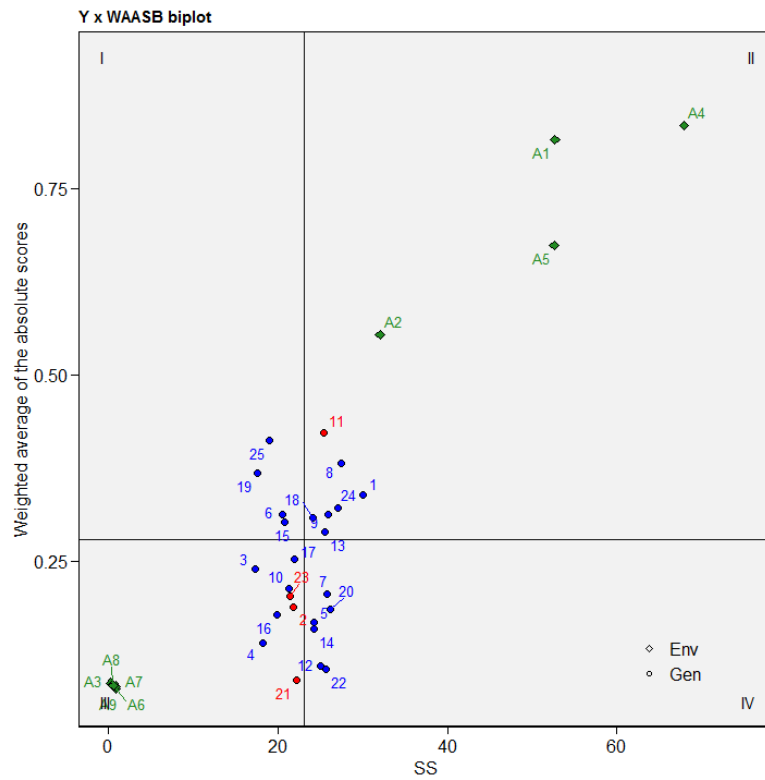
Fonte: Do autor (2021).

Figura 7 - Biplot entre os scores WAASB para os 25 genótipos de arroz avaliados em nove ambientes. As linhas vertical e horizontal indicam a direção de aumento da magnitude do caráter SP e da estabilidade.



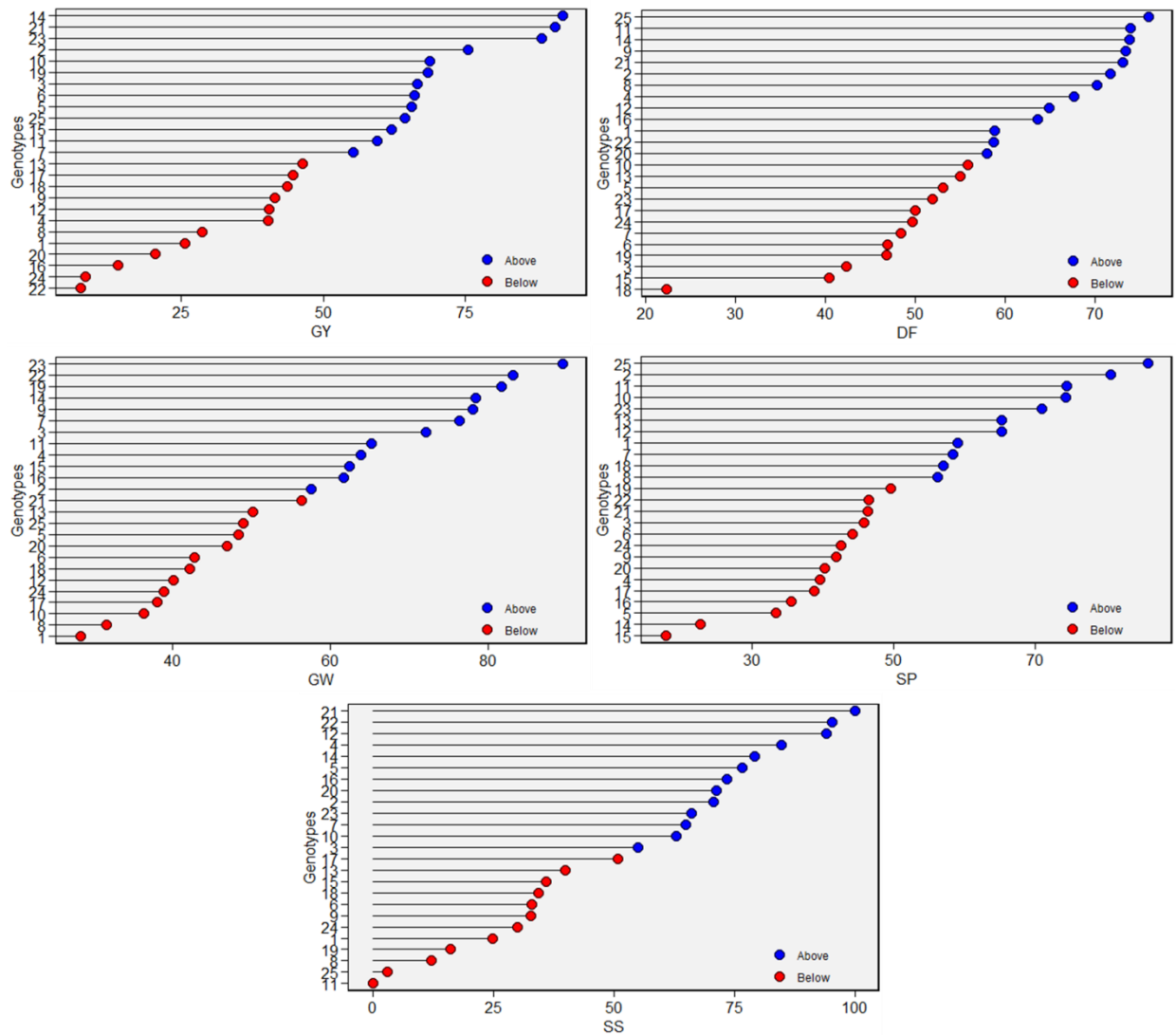
Fonte: Do autor (2021).

Figura 8 - Biplot entre os scores WAASB para os 25 genótipos de arroz avaliados em nove ambientes. As linhas vertical e horizontal indicam a direção de aumento da magnitude do caráter e da estabilidade.



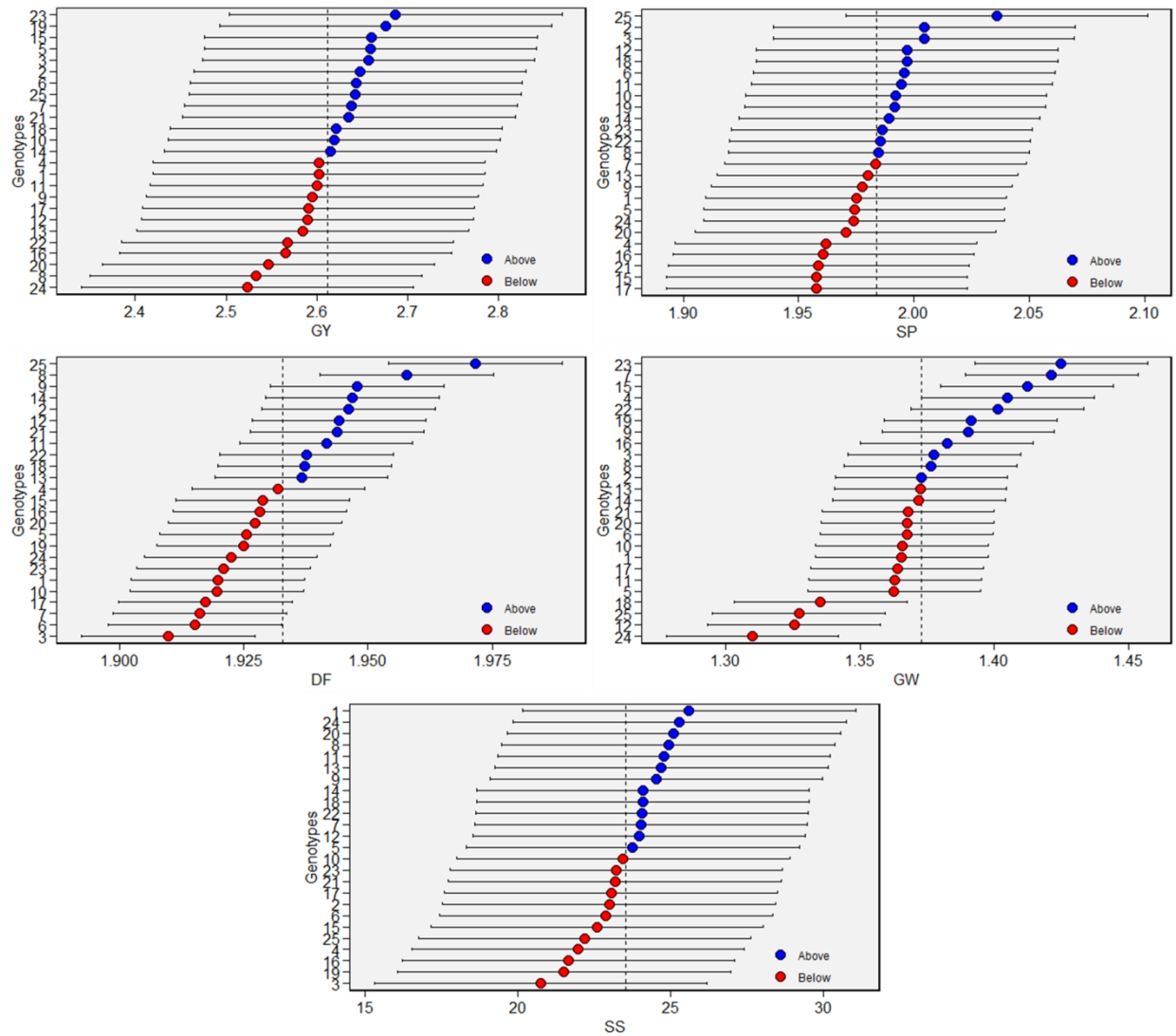
Fonte: Do autor (2021).

Figura 9 – Valores de WAASBY para os 25 genótipos avaliados e para os caracteres produtividade de grãos (GY, em  $\text{kg ha}^{-1}$ ); número de dias para o florescimento (DF), peso de 1000 grãos (GW, em g), número de espiguetas por panícula (SP) e taxa de esterilidade de espiguetas (SS, em %). Baseados no peso 50:50, os maiores valores (azul) são considerados os genótipos que associam alto desempenho e estabilidade.



Fonte: Do autor (2021).

Figura 10 – Valores preditos BLUP (melhor preditor linear não-viesado), para os genótipos avaliados e para os caracteres produtividade de grãos (GY, em  $\text{kg ha}^{-1}$ ); número de dias para o florescimento (DF), peso de 1000 grãos (GW, em g), número de espiguetas por panícula (SP) e taxa de esterilidade de espiguetas (SS, em %). Barra lateral representa o intervalo de confiança com 95% de confiabilidade e os valores acima da média são representados pelo marcador em azul e, abaixo, pelo marcador vermelho.



Fonte: Do autor (2021).