

WENDER SANTOS REZENDE

ADAPTABILIDADE E ESTABILIDADE: REVISÃO SISTEMÁTICA E APLICAÇÃO

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Genética e Melhoramento, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2019

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

R467a
2019 Rezende, Wender Santos, 1989-
Adaptabilidade e estabilidade : revisão sistemática e
aplicação / Wender Santos Rezende. – Viçosa, MG, 2019.
viii, 52 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Rezende.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Inclui bibliografia.

1. Plantas -Melhoramento genético. 2. Interação
genótipo-ambiente. 3. Melhoramento genético - Experiências.
4. Milho - Melhoramento genético. 5. Soja - Melhoramento
genético. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de
Fitotecnia. Programa de Pós-Graduação em Genética e
Melhoramento. II. Título.

CDD 22. ed. 631.52

WENDER SANTOS REZENDE

ADAPTABILIDADE E ESTABILIDADE: REVISÃO SISTEMÁTICA E APLICAÇÃO

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Genética e Melhoramento, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 26 de fevereiro de 2019.


Cosme Damião Cruz
(Coorientador)


Isabela de Castro Sant'Anna


Rodrigo Oliveira de Lima


Antônio Carlos Baião de Oliveira


Aluizio Borém de Oliveira
(Orientador)

A Deus,
honra e glória

OFEREÇO

À minha mãe,
Rosimeigue,
e à minha avó,
Maria Aparecida,
guerreiras,
que me deram todo o apoio.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Viçosa (UFV) e ao Programa de Pós-Graduação em Genética e Melhoramento pela oportunidade e apoio para prosseguir meus estudos.

Ao CNPq, CAPES e FAPEMIG pela concessão da bolsa de estudos e apoio financeiro para a realização destes trabalhos.

Ao Prof. Aluízio Borém, que sabiamente guiou-me, sempre com conselhos oportunos, pela orientação, apoio e confiança.

Ao Prof. Cosme Damião Cruz, exemplo de disposição, motivação e amor pelo trabalho, pela coorientação e apoio fundamentais.

Aos membros da banca, Prof. Rodrigo, Isabela Sant'Anna e Dr. Antônio Carlos Baião, pela disponibilidade e consideração em participar desta banca e pela contribuição na correção deste trabalho.

Aos colegas do Laboratório de Bioinformática – Alexandre, Carla, Cristiano, Daiana, Francyse, Gabi, Haroldo, Hélcio, Iara, Isabela, Ithalo, Ivan, Junim, Lais, Luciano, Marciane, Rafael, Renato, Vinicius, Weverton e Prof. Moysés – pelo acolhimento, parceria e infindáveis momentos de boas conversas e risadas.

Ao CIMMYT/Quênia por me receber durante meu doutorado sanduíche e por todas as experiências e aprendizados. Em especial, agradeço ao Mike Olsen, Yoseph Beyene, MacDonald Jumbo, Manje Gowda, Juma Collins e Carol Mukundi. Agradeço também a família Crowder (Chris, Beverly, Thomas, Jonathan e Bethie) por me receberem.

À toda minha família, em especial à minha mãe (Rosimeigue), aos meus irmãos (Weldes e Wesley) e aos meus avós (Maria Aparecida e João), pelo afeto, incentivo e esforços nunca poupados.

A todos os meus amigos, de curta e longa data, pela fundamental amizade e pela presença em todos os momentos, inclusive durante a execução destes trabalhos. Em especial, agradeço ao Adriel, Anderson, Caito, Danyllo, Érico, Marina, Paul e Rafael.

À Igreja Presbiteriana de Viçosa, pelo acolhimento e vida em comunidade. Em especial, agradeço ao Pr. Jony, ao Grupo de Oração, à Edinea, à UMP e à turma do No Cenáculo.

Ao grupo de convivência (GC de terça) por caminharem ao meu lado. Obrigado Adassa, Alice, Caito, Douglas, Evandro, Fran, Henrique, Jaque, Juan, Leo, Lis, Luna, Marcelo e Thiago.

Peço perdão a todos os outros que eventualmente me esqueci. Embora não citados, sabem da sua importância nesta e nas demais conquistas ao longo da minha vida.

BIOGRAFIA

WENDER SANTOS REZENDE, filho de Nelson José de Rezende e Rosimeigue Duarte dos Santos Rezende, nasceu em 05 de junho de 1989 em Quirinópolis – GO.

Em agosto de 2007, iniciou o curso de Agronomia na Universidade Federal de Uberlândia, onde obteve o título de Engenheiro Agrônomo em janeiro de 2012.

Em março de 2012, iniciou o curso de Mestrado no Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Federal de Uberlândia, na área de concentração Fitotecnia, onde obteve o título de Mestre em Agronomia em fevereiro de 2014.

Em março de 2014, ingressou na Universidade Presidente Antônio Carlos (UNIPAC Uberlândia) como professor das disciplinas Melhoramento de Plantas e Microbiologia dos Solos, oferecidas ao curso de Agronomia, onde atuou até dezembro de 2014.

Em março de 2015, iniciou o curso de Doutorado no Programa de Pós-Graduação em Genética e Melhoramento na Universidade Federal de Viçosa, submetendo-se à defesa de tese em fevereiro de 2019.

SUMÁRIO

RESUMO	x
ABSTRACT	xii
1 INTRODUÇÃO GERAL	1
REFERÊNCIAS	2
CAPÍTULO 1 – MEIO SÉCULO DE ESTUDO DA ADAPTABILIDADE E ESTABILIDADE EM MILHO E SOJA NO BRASIL	5
RESUMO	6
1 INTRODUÇÃO.....	7
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	8
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	11
4 CONCLUSÕES	21
REFERÊNCIAS	21
CAPÍTULO 2 – PERFORMANCE AND YIELD STABILITY OF MAIZE HYBRIDS EVALUATED IN CONTRASTING MULTI-ENVIRONMENT TRIALS IN EASTERN AFRICA	28
ABSTRACT	29
1 INTRODUCTION	30
2 MATERIAL AND METHODS.....	31
2.1 Germplasm, experimental sites, experimental design and field evaluations.....	31
2.2 Data analysis.....	32
3 RESULTS.....	35
3.1 Hybrid performance.....	35
3.2 Suitability of locations to select hybrids according to the GGE biplot method	36
3.3 Stability of hybrids according to the GGE biplot method.....	40
3.4 Stability of hybrids according to the Cruz et al. (1989) method	41
4 DISCUSSION.....	44
5 CONCLUSIONS	47
REFERENCES	48
CONCLUSÕES GERAIS	52

RESUMO

REZENDE, Wender Santos, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2019. **Adaptabilidade e estabilidade: revisão sistemática e aplicação.** Orientador: Aluizio Borém de Oliveira. Coorientadores: Cosme Damião Cruz, Felipe Lopes da Silva e Césio Humberto de Brito.

A interação genótipos x ambientes (GxA) é um dos principais desafios enfrentados no melhoramento de plantas, pois causa inconsistências no ranqueamento de genótipos entre os ambientes. Conseqüentemente, a interação GxA dificulta o processo de seleção e recomendação de cultivares. Para minimizar, e até aproveitar, os efeitos da interação GxA, têm sido propostas ao longo dos anos diversas metodologias estatísticas para o estudo da adaptabilidade e estabilidade dos genótipos. Visto isso, o objetivo deste trabalho foi estudar a adoção dos métodos para estudo da adaptabilidade e estabilidade nas duas principais culturas agrícolas brasileiras, milho e soja, e aplicar algumas dessas metodologias em dados de milho provenientes do leste africano. Inicialmente, foi realizada uma revisão sistemática da literatura científica para verificar a adoção dos métodos em artigos sobre milho e soja publicados desde 1970 em revistas brasileiras indexadas na base de artigos SciELO. Foram encontrados 113 artigos (38 sobre soja e 75 sobre milho), nos quais foram listados 21 métodos de adaptabilidade e estabilidade. O método utilizado com maior frequência em ambas as culturas foi Eberhart e Russell. Os métodos Cruz, Torres e Vencovsky e Modelo de efeitos principais aditivos e interação multiplicativa (AMMI) também foram amplamente adotados. Em geral, o número de publicações com a maioria dos métodos reduziu na presente década, exceto com GGE Biplot, Média harmônica da performance relativa dos valores genotípicos (MHPRVG) e Centroide, que apresentaram crescimento. Posteriormente, após a realização da revisão sistemática, aplicaram-se os métodos GGE Biplot e Cruz, Torres e Vencovsky em conjuntos de dados de experimentos realizados em 2017 no leste da África (Quênia, Uganda e Tanzânia) pelo Centro Internacional de Melhoramento de Milho e Trigo (CIMMYT). Os ensaios abrangeram 24 locais bem irrigados (condições ótimas) e sete locais em condições de déficit hídrico, nos quais foram avaliados 65 híbridos de milho de ciclo intermediário e 55 de ciclo precoce. O método GGE Biplot permitiu identificar o melhor e pior local para seleção de híbridos em condições ótimas, respectivamente Kakamega e Kabuku. Não foi possível definir os melhores e piores locais para condições de estresse hídrico, pois estes foram altamente dependentes da maturidade dos híbridos. Utilizando-se os dois métodos, GGE Biplot e Cruz, Torres e Vencovsky, foi possível identificar com segurança os híbridos precoces E14, E2 e E23 e os intermediários I35, I18, I21 e I41 como os mais bem adaptados simultaneamente a condições ótimas e a condições de

estresse hídrico. Embora o número de publicações sobre adaptabilidade e estabilidade tenha reduzido nos últimos anos, essa área de pesquisa continua ativa e relevante no Brasil. Além disso, a aplicação dos métodos de estudo da adaptabilidade e estabilidade fornece informações e direcionamentos fundamentais ao processo de melhoramento de plantas.

ABSTRACT

REZENDE, Wender Santos, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2019. **Adaptability and stability: systematic review and application.** Advisor: Aluizio Borém de Oliveira. Co-Advisors: Cosme Damião Cruz, Felipe Lopes da Silva and Césio Humberto de Brito.

The genotype by environment (GE) interaction is a huge challenge to the plant breeding as it may cause inconsistencies in the ranking of genotype across environments. Thus, the GE interaction makes the selection and recommendation of cultivars difficult. To minimize and even take advantage of the effects of GE interaction, many statistical methods have proposed to study the stability of genotypes. The objectives of this work were to study the adoption of the stability methods in soybean and maize, the main crops in Brazil, and to apply some of these methods on a dataset from Eastern Africa. First, it was done a systematic review to verify the adoption of the stability methods in articles about soybean and maize published since 1970 in Brazilian scientific journals indexed by SciELO. It was found 113 articles (38 about soybean and 75 about maize), in which 21 stability methods were listed. Eberhart and Russell method was the most frequently used. Cruz, Torres and Vencovsky and The Additive Main Effects and Multiplicative Interaction (AMMI) methods were widely adopted as well. In general, the number of publications related to most methods has decreased in the last decade, except GGE biplot, Harmonic mean of the relative performance of the genetic values (MHPRVG) and Centroid methods, which showed increase. Then, it was applied GGE biplot and Cruz, Torres and Vencovsky on an experimental dataset from Eastern Africa (Kenya, Uganda and Tanzania). These trials were performed by International Maize and Wheat Improvement Center (CIMMYT) in 2017. A total of 55 early maturing and 65 intermediate maturing maize hybrids were selected for these studies. The hybrids were evaluated in 24 well-watered (WW) and 7 drought stress (DS) locations. In WW conditions, GGE biplot was able to identify Kakamega as the best location to select hybrids and Kabuku as the worst location. However, the best and worst locations to select hybrids to drought stress conditions were highly dependent on hybrid maturity. Using both methods, GGE biplot and Cruz, Torres and Vencovsky, it was possible to identify confidently the early maturity hybrids E14, E2 and E23 and the intermediate maturity hybrids I35, I18, I21 and I41 as well adapted to both WW and DS conditions. Although the number of publication on stability has decreased in recent years, this research topic remains active and relevant in Brazil. In addition, the use of stability methods provides key information and guidance for plant breeding.

1 INTRODUÇÃO GERAL

A interação entre genótipos e ambientes (GxA), definida como o comportamento diferenciado dos genótipos frente às variações ambientais, é considerada uma das principais dificuldades no processo de melhoramento de plantas. Essa interação dificulta a recomendação de genótipos para vários ambientes, além de poder provocar superestimação dos ganhos genéticos, resultando em menor êxito dos programas de melhoramento (SILVA; DUARTE, 2006; CRUZ et al., 2014).

A interação GxA é decorrente, então, de diferenças em adaptação dos genótipos aos diferentes ambientes, resultantes de diferenças de constituição gênica (CHAVES, 2001). A interação GA pode ser de natureza simples ou complexa. A interação simples ocorre quando não há mudança na classificação dos genótipos nos diferentes ambientes. Esse tipo de interação não causa problema na recomendação, pois os melhores genótipos em um ambiente também o são em outro (CRUZ et al., 2014). A interação complexa ocorre quando há mudança na classificação dos genótipos em relação aos ambientes avaliados. Neste caso, a seleção dos genótipos com base na média considerando os ambientes não é adequada, podendo acarretar em seleção de genótipos mal adaptados a determinadas situações (CHAVES, 2001).

Quando é detectada interação GxA, a partir da análise de variância conjunta dos ensaios, é possível adotar-se duas estratégias para minimizar os seus efeitos. A primeira é a estratificação ambiental, que se baseia na recomendação particularizada dos genótipos para sub-regiões. Neste caso, ambientes semelhantes são agrupados em sub-regiões dentro das quais a interação é não significativa (RAMALHO et al., 2012). Além disso, quando ocorrem ambientes com padrões similares de respostas de genótipos, a estratificação permite reduzir o número de ambientes da rede de ensaios (MENDONÇA et al., 2007). Contudo, mesmo com a estratificação ambiental uma fração da interação ainda pode permanecer, devido a fatores ambientais incontroláveis, como temperatura e pluviosidade (CRUZ et al., 2012).

A segunda estratégia é a recomendação generalizada para toda uma região, baseada na partição do comportamento dos genótipos em parâmetros de adaptabilidade e estabilidade (CHAVES, 2001; MAIA et al., 2013). A adaptabilidade pode ser definida como a capacidade dos genótipos em responder vantajosamente aos estímulos ambientais, e a estabilidade pode ser definida como a capacidade dos genótipos apresentarem comportamento altamente previsível frente aos estímulos ambientais (CRUZ et al., 2014). A maioria dos estudos sobre interação GxA em milho e em soja abordam adaptabilidade e estabilidade, e uma menor parte aborda a estratificação ambiental (BRANQUINHO et al., 2014). Nesse sentido, os programas de

melhoramento buscam genótipos altamente produtivos, com estabilidade de produção e ampla adaptabilidade aos diversos ambientes que compreendem a região em que são recomendados (SILVA; DUARTE, 2006).

Para avaliar a adaptabilidade e a estabilidade diversos métodos podem ser utilizados, os quais se diferem quanto ao conceito de estabilidade e aos procedimentos biométricos adotados (PRADO et al., 2001). Segundo Cargnelutti Filho et al. (2007) esses métodos podem ser dispostos em diversas classes, como aqueles baseados em análise de variância (YATES; COCHRAN, 1938; PLAISTED; PETERSON, 1959; WRICKE, 1965), regressão linear (FINLAY; WILKINSON, 1963; EBERHART; RUSSELL, 1966; TAI, 1971), regressão bissegmentada (VERMA et al., 1978; SILVA; BARRETO, 1985; CRUZ et al., 1989) e em estatísticas não-paramétricas (LIN; BINNS, 1988; HUEHN, 1990; ANNICCHIARICO, 1992).

O grande número de métodos estatísticos para o estudo da adaptabilidade e estabilidade indica a importância e complexidade do tema. No último meio século, novas abordagens e novos métodos para o estudo da adaptabilidade e estabilidade têm sido desenvolvidos, o que demonstra a importância dessa área de pesquisa. Considerando o grande número de métodos, entender as suas diferenças, vantagens e preferências por parte dos pesquisadores é importante para saber quais são os mais adequados em cada situação.

Visto isso, o objetivo deste trabalho foi estudar a adoção dos métodos para estudo da adaptabilidade e estabilidade nas duas principais culturas agrícolas brasileiras, milho e soja, e aplicar algumas dessas metodologias em dados de milho provenientes do leste africano.

REFERÊNCIAS

- ANNICCHIARICO, P. Cultivar adaptation and recommendation from alfafa trials in Northern Italy. **Journal of Genetics and Breeding**, Roma, v. 46, n. 1, p. 269-278, 1992.
- BRANQUINHO, R. G.; DUARTE, J. B.; SOUZA, P. I. M.; SILVA NETO, S. P.; PACHECO, R. M. Estratificação ambiental e otimização de rede de ensaios de genótipos de soja no Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 49, n. 10, p. 783-795, 2014.
- CARGNELUTTI FILHO, A.; PERECIN, D.; MALHEIROS, E. B.; GUADAGNIN, J. P. Comparação de métodos de adaptabilidade e estabilidade relacionados à produtividade de grãos de cultivares de milho. **Bragantia**, Campinas, v. 66, n. 4, p. 571-578, 2007.
- CHAVES, L. J. Interação de genótipos com ambientes. In: NASS, L. L.; VALOIS, A. C. C.; MELO, I. S.; VALADARES-INGLIS, M. C. (Ed.). **Recursos Genéticos & Melhoramento de Plantas**. Rondonópolis: Fundação de Apoio à Pesquisa Agropecuária de Mato Grosso, 2001. p. 673-713.

- CRUZ, C. D.; TORRES, R. A.; VENCOVSKY, R. An alternative approach to the stability analysis proposed by Silva e Barreto. **Revista Brasileira de Genética**, Ribeirão Preto, v. 12, n. 3, p. 567-580, 1989.
- CRUZ, C. D.; REGAZZI, A. J.; CARNEIRO, P. C. S. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. v.1. 4 ed. Viçosa: Editora UFV, 2012. 514 p.
- CRUZ, C. D.; CARNEIRO, P. C. S.; REGAZZI, A. J. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. v. 2. 3. ed. Viçosa: Ed. UFV, 2014. 668 p.
- EBERHART, S. A.; RUSSELL, W. A. Stability parameters for comparing varieties. **Crop Science**, Madison, v. 6, n. 1, p. 36-40, 1966.
- FINLAY, K. W.; WILKINSON, G. N. The analysis of adaptation in a plant breeding programme. **Australian Journal of Agricultural Research**, Melbourne, v. 14, n. 3, p. 742-754, 1963.
- HUEHN, M. Nonparametric measures of phenotypic stability. Part 1: Theory. **Euphytica**, Wageningen, v. 47, n. 3, p. 189-194, 1990.
- LIN, C. S.; BINNS, M. R. A superiority measure of cultivar performance for cultivar x location data. **Canadian Journal of Plant Science**, Ottawa, v. 68, n. 3, p. 193-198, 1988.
- MAIA, M. C. C.; VELLO, N. A.; ARAÚJO, L. B.; DIAS, C. T. S.; OLIVEIRA, L. C.; ROCHA, M. M. Interação genótipo x ambiente com uso da análise de componentes principais para populações de soja selecionadas para resistência a insetos. **Revista Brasileira de Biometria**, Jaboticabal, v. 31, n. 1, p. 13-27, 2013.
- MENDONÇA, O.; CARPENTIERI-PÍPOLO, V.; GARBUGLIO, D. D.; FONSECA JUNIOR, N. S. Análise de fatores e estratificação ambiental na avaliação da adaptabilidade e estabilidade em soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 11, p. 1567-1575, 2007.
- PLAISTED, R. L.; PETERSON, L. C. A technique for evaluating the ability of selections to yield consistently in different locations and seasons. **American Potato Journal**, Orono, v. 36, n. 2, p. 381-385, 1959.
- PRADO, E. E.; HIROMOTO, D. M.; GODINHO, V. P. C.; UTUMI, M. M.; RAMALHO, A. R. Adaptabilidade e estabilidade de cultivares de soja em cinco épocas de plantio no cerrado de Rondônia. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 4, p. 625-635, 2001.
- RAMALHO, M. A. P.; ABREU, Â. F. B.; SANTOS, J. B.; NUNES, J. A. R. **Aplicações da genética quantitativa no melhoramento de plantas autógamas**. Lavras: Ed. UFLA, 2012. 522 p.
- SILVA, J. G. C.; BARRETO, J. N. Aplicação da regressão linear segmentada em estudos da interação genótipo x ambiente. In: SIMPÓSIO DE ESTATÍSTICA APLICADA À EXPERIMENTAÇÃO AGRONÔMICA, 1985, Campinas. **Anais...** Campinas: Fundação Cargill, 1985. p. 49-50.

SILVA, W. C. J.; DUARTE, J. B. Métodos estatísticos para estudo de adaptabilidade e estabilidade fenotípica em soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 1, p. 23-30, 2006.

TAI, G. C. C. Genotype stability analysis and its application to potato regional trials. **Crop Science**, Madison, v. 11, n. 1, p. 184-190, 1971.

VERMA, M. M.; CHAHAL, G. S.; MURTY, B. R. Limitations of conventional regression analysis: a proposed modification. **Theoretical and Applied Genetics**, Berlim, v. 53, n. 3, p. 89-91, 1978.

WRICKE, G. Zur Berechnung der Ökovalenz bei Sommerweizen und Hafer. **Pflanzenzuchtung**, Berlim, v. 52, n. 1, p. 127-138, 1965.

YATES, F.; COCHRAN, W. G. The analysis of group of experiments. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v. 28, n. 1, p. 556-580, 1938.

**CAPÍTULO 1 – MEIO SÉCULO DE ESTUDO DA ADAPTABILIDADE E
ESTABILIDADE EM MILHO E SOJA NO BRASIL**

MEIO SÉCULO DE ESTUDO DA ADAPTABILIDADE E ESTABILIDADE EM MILHO E SOJA NO BRASIL

RESUMO

O estudo da adaptabilidade e estabilidade fundamenta o processo de recomendação de cultivares. Há um grande número de métodos estatísticos para esse fim, porém pouco se sabe sobre sua real adoção por parte da comunidade científica brasileira. O objetivo deste trabalho foi realizar uma revisão sistemática da literatura sobre os métodos de adaptabilidade e estabilidade utilizados em soja e milho no Brasil a partir de artigos científicos publicados entre 1970 e 2017. Foram realizadas buscas criteriosas de artigos sobre adaptabilidade e estabilidade em milho ou soja em periódicos científicos brasileiros indexados à base de dados SciELO. Além disso, foram feitas buscas complementares nos sites e versões impressas desses periódicos. Os artigos encontrados foram classificados quanto ao ano e à década de publicação e aos métodos de adaptabilidade e estabilidade utilizados. Avaliaram-se quais foram os métodos mais utilizados, em qual cultura e década predominaram, o número médio de métodos aplicados por artigo e os padrões de associação entre os métodos quando utilizados simultaneamente. Foram publicados 113 artigos (38 sobre soja e 75 sobre milho) em periódicos científicos indexados à SciELO com aplicação de métodos de adaptabilidade e estabilidade, cujo primeiro foi publicado em 1985. Nas décadas seguintes, houve crescimento no número de publicações, exceto na presente década, em que houve redução. Foram listados 21 métodos de adaptabilidade e estabilidade, e o mais utilizado tanto em milho quanto em soja foi Eberhart e Russell, aplicado em 42% das publicações. O segundo mais utilizado foi Cruz, Torres e Vencovsky (28% dos artigos), adotado principalmente em milho, e o terceiro foi AMMI (17% dos artigos), adotado principalmente em soja. Alguns métodos não-paramétricos, como Lin e Binns, Annicchiarico, Carneiro e Centroide, também apresentaram grande adoção. O número de utilizações dos métodos reduziu na presente década, exceto de GGE Biplot, MHPRVG e Centroide, que apresentaram crescimento. Cerca de 60% dos artigos utilizou apenas um método. Em artigos com mais de um método, observou-se maior probabilidade dos métodos se associarem com Eberhart e Russell. A adaptabilidade e estabilidade tem sido largamente estudada em milho e em soja nas últimas décadas no Brasil. Porém, na presente década tem se notado redução nas pesquisas. O método predominante nos estudo de adaptabilidade e estabilidade é Eberhart e Russell. Os métodos Cruz, Torres e Vencovsky e AMMI também são bastante utilizados. Além

disso, a adoção dos métodos GGE Biplot, MHPRVG e Centróide tem crescido na presente década.

Palavras-chave: *Zea mays* L.; *Glycine max* (L.) Merrill; interação genótipo x ambiente; recomendação de cultivares; melhoramento de plantas.

1 INTRODUÇÃO

A interação entre genótipos e ambientes (GxA) é definida como o comportamento diferenciado dos genótipos frente às variações ambientais (CRUZ et al., 2014). Essa interação é um dos principais desafios que os melhoristas de plantas enfrentam, pois pode provocar inconsistência no ranqueamento dos genótipos entre os ambientes, o que dificulta a recomendação de cultivares (ELIAS et al., 2016).

Para que a recomendação de cultivares seja a mais adequada possível, de modo a minimizar os efeitos da interação GxA, é necessário o estudo da adaptabilidade e estabilidade dos genótipos (SILVA; DUARTE, 2006). A adaptabilidade pode ser definida como a capacidade dos genótipos em responder vantajosamente aos estímulos ambientais, e a estabilidade pode ser definida como a capacidade dos genótipos apresentarem comportamento altamente previsível frente aos estímulos ambientais (CRUZ et al., 2014). Contudo, este conceito de adaptabilidade e o de estabilidade podem variar de acordo com a abordagem estatística utilizada.

Para os estudos de adaptabilidade e estabilidade, diversos métodos têm sido propostos. Esses métodos podem ser classificados de acordo com a abordagem estatística adotada, como aqueles baseados em análise de variância (YATES; COCHRAN, 1938; PLAISTED; PETERSON, 1959; WRICKE, 1965), em regressão linear (FINLAY; WILKINSON, 1963; EBERHART; RUSSELL, 1966; TAI, 1971), em regressão bissegmentada (VERMA et al., 1978; SILVA; BARRETO, 1985; CRUZ et al., 1989), em estatísticas não-paramétricas (LIN; BINNS, 1988; HUEHN, 1990; ANNICCHIARICO, 1992) e em análise multivariada (ZOBEL et al., 1988; YAN et al., 2000).

O grande número de métodos de estudo da adaptabilidade e estabilidade indica a complexidade do tema e implica em dificuldade no processo de escolha do método mais apropriado. Muitas vezes não há concordância entre os métodos e, por isso, a definição de quais cultivares serão recomendadas passa a depender do método utilizado (SILVA; DUARTE, 2006; CARGNELUTTI FILHO et al., 2009).

A escolha do método depende de diversos fatores, tais como número de ambientes avaliados, precisão requerida, tipo de informação desejada e facilidade na interpretação dos resultados (CARGNELUTTI FILHO et al., 2009; CRUZ et al., 2012). Nesse sentido, há diversos estudos disponíveis na literatura científica que discutem e comparam os métodos, o que pode auxiliar no processo de escolha (SILVA; DUARTE, 2006; YAN et al., 2007; GAUCH et al., 2008; CARGNELUTTI FILHO et al., 2009; CRUZ et al., 2012, 2014; EEUWIJK et al., 2016).

Além disso, o entendimento detalhado a respeito da adoção e preferências por determinados métodos pela comunidade científica pode ser indicativo de quais são mais eficientes e, desse modo, pode auxiliar no processo de escolha. Esse entendimento pode ser obtido a partir de uma revisão sistemática da literatura científica, a qual permite sintetizar o conhecimento produzido em uma determinada área de estudo e também identificar os métodos adotados nas pesquisas (MEDINA; PAILAQUILÉN, 2010). As revisões sistemáticas diferem das revisões de literatura tradicionais por adotarem um processo replicável, científico e transparente e por darem o mesmo nível de importância a cada artigo considerado no estudo (TRANFIELD et al., 2003; BORENSTEIN et al., 2009). Uma revisão sistemática abordando artigos com as culturas do milho e da soja pode ser bastante representativa da realidade do estudo da adaptabilidade e estabilidade no Brasil, visto que essas culturas são largamente pesquisadas, além de serem as mais cultivadas no país, representando aproximadamente 85% da área ocupada com agricultura (IBGE, 2017).

Visto isso, o objetivo deste trabalho foi realizar uma revisão sistemática da literatura sobre os métodos de adaptabilidade e estabilidade utilizados em soja e milho no Brasil a partir de artigos científicos publicados entre 1970 e 2017.

2 MATERIAL E MÉTODOS

A seleção dos artigos foi realizada inicialmente na base de artigos *Scientific Electronic Library Online* (SciELO). Com base em palavras-chave e operadores booleanos, foram realizadas duas buscas, uma em Português e outra em Inglês, no dia 16 de maio de 2018. O contexto de busca em Português foi dado por: (adaptabilidade OR estabilidade OR (interação AND genótipo AND ambiente) OR (indicação AND cultivares) OR comportamento) AND (soja OR milho). O contexto de busca em Inglês foi dado por: (adaptability OR stability OR (genotype AND environment AND interaction) OR (ge AND interaction)) AND (soybean OR corn OR maize).

Foram buscados artigos publicados entre 1970 e 2017. Durante a busca na SciELO, foram considerados apenas artigos publicados em periódicos científicos de origem brasileira, independentemente da origem dos autores ou dos experimentos relatados no trabalho. Como a maioria dos periódicos científicos considerados neste trabalho foram indexados à SciELO após 1970 – principalmente após os anos 2000 –, foram realizadas buscas complementares nos sites desses periódicos e nas versões impressas visando abordar todo o período objetivado inicialmente (1970 a 2017). Periódicos lançados após 1970 também foram considerados neste trabalho. Os artigos encontrados a partir das buscas foram selecionados previamente pela leitura do título. Os artigos considerados com base no título foram então verificados na íntegra no intuito de confirmar que realmente abordavam estudos de adaptabilidade e estabilidade em milho ou soja.

Os artigos encontrados foram classificados quanto ao ano e à década de publicação (1970-1979, 1980-1989, 1990-1999, 2000-2009 ou 2010-2017), ao periódico científico em que foi publicado, às instituições participantes do trabalho, à característica avaliada, ao programa computacional utilizado e aos métodos de estudo de adaptabilidade e estabilidade utilizados. Para a classificação dos artigos quanto às instituições participantes, considerou-se a instituição de cada um dos autores do trabalho. Além disso, essas instituições foram classificadas em públicas ou privadas.

A identificação dos métodos utilizados em cada trabalho foi realizada a partir da leitura da seção Material e Métodos de cada artigo. Artigos classificados como “metodológicos” foram desconsiderados do estudo. Ou seja, aqueles cujo foco foi estudar, comparar ou propor métodos ao invés de aplicar os métodos em si e de identificar cultivares com maior adaptabilidade e estabilidade. De acordo com relatos disponíveis na literatura científica (SILVA; DUARTE, 2006; CRUZ et al., 2012, 2014; EEUWIJK et al., 2016), os métodos foram classificados quanto à abordagem estatística utilizada.

A partir da classificação dos artigos quanto aos métodos adotados, verificou-se quais foram os mais utilizados e em qual cultura predominaram. Devido ao grande número de métodos listados, as análises e as discussões abordaram principalmente os métodos utilizados em pelo menos quatro artigos científicos. Os métodos aplicados em menos de quatro artigos foram classificados como “outros”.

Como os tamanhos amostrais de milho e de soja (número de artigos publicados por cultura) foram diferentes, a comparação da adoção dos métodos foi realizada por meio da frequência relativa do método em cada cultura, dada por:

$$FR_{ij} = (C_{ij} / A_j) \times 100$$

onde: FR_{ij} é a frequência relativa do i -ésimo método na j -ésima cultura (milho ou soja); C_{ij} é o número de citações do i -ésimo método (número de artigos em que o método foi aplicado) na j -ésima cultura; A_j é o número de artigos publicados na j -ésima cultura.

Avaliou-se o número de ambientes (locais ou anos) e o número de genótipos avaliados nos trabalhos, além do número de unidades federativas ou estados que a rede de ensaio de cada trabalho abrangeu. Para a comparação das médias dessas três características, calculou-se o intervalo de confiança (IC) de 95%. Avaliou-se também o número de artigos publicados e a adoção de cada método (número de artigos em que determinado método foi aplicado) por década, tanto em milho quanto em soja. Além disso, calculou-se a taxa anual média de publicações, por cultura, em cada década, para melhor comparação entre as décadas, visto que a presente década, iniciada no ano 2010, foi composta por apenas oito anos (2010 a 2017), pois ainda não está completa.

Avaliou-se também o número de métodos aplicados em cada trabalho, para ambas as culturas, com posterior cálculo da média. Visto que em muitos trabalhos foi utilizado mais de um método, calculou-se o coeficiente de equivalência entre os métodos, índice que mede a “força” ou probabilidade de associação (coocorrência em um mesmo trabalho) entre os métodos, conforme descrito por Robredo e Cunha (1998):

$$E_{ij} = (F_{ij})^2 / (F_i \times F_j)$$

onde: E_{ij} é o coeficiente de equivalência entre o i -ésimo e o j -ésimo métodos no conjunto de artigos; F_i e F_j , são, respectivamente, as frequências absolutas (ocorrências) do i -ésimo e do j -ésimo métodos; e F_{ij} é a frequência com que o i -ésimo e o j -ésimo métodos aparecem em um mesmo artigo (coocorrência).

A partir da matriz de coeficientes de equivalência (E_{ij}) entre os métodos, construiu-se um grafo, denominado rede de associação entre métodos, composto pelos métodos aplicados em pelo menos quatro artigos científicos. O algoritmo Fruchterman-Reingold (FRUCHTERMAN; REINGOLD, 1991) foi utilizado para criar a rede, na qual somente $E_{ij} \geq 0,015$ foram destacados. A espessura das linhas (arestas) que conectaram os métodos (vértices) foi diretamente proporcional ao valor de E_{ij} . Para construção da rede, utilizou-se o pacote qgraph (EPSKAMP et al., 2012) do software R (R CORE TEAM, 2017). Posteriormente, calculou-se a centralidade de grau da rede, cujo grau de cada método foi dado pelo número de ligações ($E_{ij} \geq 0,015$) com outros métodos.

As demais análises deste trabalho também foram realizadas pelo software R, e os gráficos foram construídos pelo pacote ggplot2 (WICKHAM, 2009).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A pesquisa realizada na SciELO encontrou artigos sobre adaptabilidade e estabilidade em milho ou soja em 14 periódicos científicos brasileiros (Figura 1). A partir da busca completa nesses periódicos (buscas na SciELO, nos sites dos periódicos e nas versões impressas), foram encontrados 130 artigos abordando adaptabilidade e estabilidade em milho ou soja. Destes, 17 foram descartados do estudo por serem considerados artigos “metodológicos”, restando então 113 artigos (38 sobre soja e 75 sobre milho).

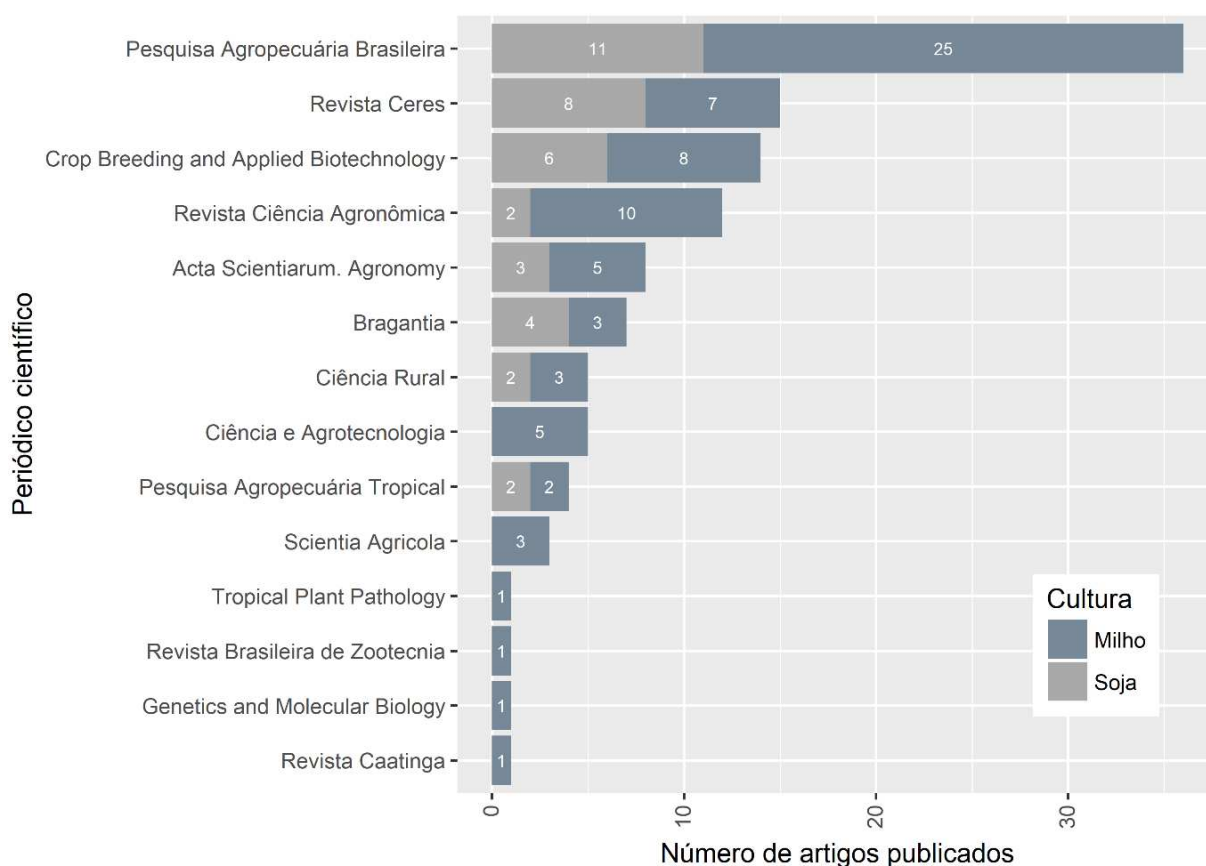


Figura 1 – Número de artigos publicados abordando estudos de adaptabilidade e estabilidade em soja ou milho em diferentes periódicos científicos brasileiros indexados na base de artigos SciELO.

O estudo da interação GxA, normalmente seguido pelo estudo da adaptabilidade e estabilidade, é baseado em redes de ensaio envolvendo diversos genótipos avaliados em diversos ambientes compostos por diferentes locais e anos. Em relação aos artigos considerados no presente estudo, o número médio de ambientes avaliados nos trabalhos com milho foi 13,1 e com soja foi 20,5 (Figura 2). Nesses mesmos trabalhos, o número médio de genótipos avaliados em artigos com milho foi 24,8 e com soja foi 18,9. Em ambas as características houve

sobreposição dos intervalos de confiança, o que indica que não houve diferenças significativas entre milho e soja.

As redes de ensaio de milho foram mais amplas que as de soja, abrangendo, respectivamente, em média 2,68 e 1,53 unidades federativas ou estados. Diferentemente do que ocorre em milho, a área de adaptação da soja é altamente influenciada pelo fotoperíodo, que varia de acordo com a latitude do local. Esse fato contribui para a ocorrência em soja de interação genótipo x latitude, principalmente em redes experimentais que incluem locais com grande distância latitudinal (ALLIPRANDINI et al., 2009; BRANQUINHO et al., 2014). Por isso, normalmente as cultivares de soja são recomendadas para regiões menos amplas que milho.

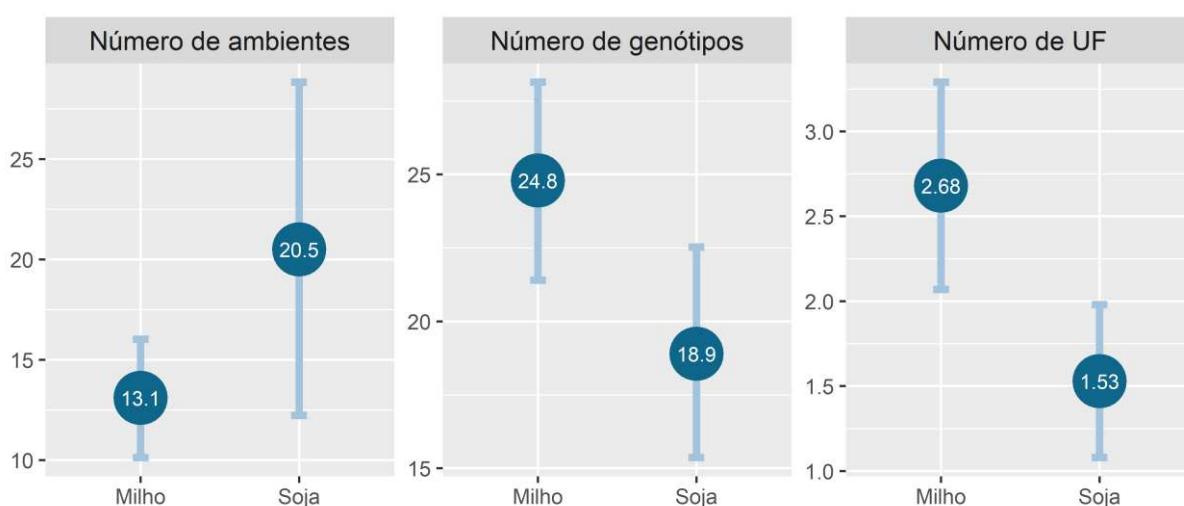


Figura 2 – Número médio de ambientes, de genótipos e de unidades federativas (UF), e os respectivos intervalos de confiança (95%), que compuseram as redes de ensaio avaliadas nos artigos sobre milho e soja.

A maioria dos artigos abordou a adaptabilidade e estabilidade da característica produtividade de grãos (101 dos 113 artigos listados neste trabalho). Outras características frequentes foram severidade de doenças (oito artigos), como cercosporiose em milho e ferrugem asiática em soja, produção de matéria seca (quatro artigos) e índice de capacidade de expansão de milho pipoca (três artigos).

Foram listadas 58 instituições participantes dos artigos. As que participaram de mais trabalhos foram a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa; presente em 48 artigos, que representam 43% do total de artigos), a Universidade Federal de Viçosa (UFV; presente em 25 artigos, que representam 22% do total), a Universidade Federal de Lavras (UFLA; presente em 15 artigos, que representam 13% do total) e a Escola Superior de

Agricultura "Luiz de Queiroz" da Universidade de São Paulo (Esalq – USP; presente em 14 artigos, que representam 12% do total). Em todos os artigos houve participação de pelo menos uma instituição pública, e somente em 10 artigos houve também participação de instituições privadas.

Dos 113 artigos, apenas a metade (56 artigos) mencionou o programa computacional utilizado para realizar as análises de adaptabilidade e estabilidade. Nesses artigos, foram listados os programas computacionais Estabilidade (FERREIRA; ZAMBALDE, 1997), Genes (CRUZ, 2013), GGE biplot (YAN, 2001), R (R CORE TEAM, 2017), SAS (SAS INSTITUTE, 2002), Selegen (RESENDE, 2002a) e Statistica (STATSOFT, 1995). Os programas mais utilizados foram Genes (35 artigos) e SAS (13 artigos).

Foram listados 21 métodos aplicados ao estudo da adaptabilidade e estabilidade nos artigos que compuseram este trabalho (Tabela 1). A metodologia predominante, considerando ambas as culturas, foi Eberhart e Russell, aplicada em 48 artigos (42% do total de artigos; Figura 3). Esse método foi proposto em 1966 e é um dos mais antigos para o estudo da adaptabilidade e estabilidade (EBERHART; RUSSELL, 1966). Eberhart e Russell é baseado em regressão linear simples e composto pelo coeficiente de regressão (β_i), que estima a adaptabilidade, e pelo desvio da regressão (σ_{di}^2), que estima a estabilidade (previsibilidade). De acordo com esse método, genótipos com alta previsibilidade são aqueles com desvio da regressão igual a zero, e genótipos com coeficiente de regressão superior a um são considerados adaptados a ambientes favoráveis, inferior a um, adaptados a ambientes desfavoráveis, e igual a um, possuem adaptabilidade geral ou ampla (CRUZ et al., 2012). O método Eberhart e Russell tem sido largamente utilizado nas últimas décadas em diversas culturas (ALAWA et al., 2010; CARNEIRO et al., 2018).

O método Cruz, Torres e Vencovsky, proposto em 1989 (CRUZ et al., 1989), foi o segundo mais utilizado (32 artigos) e sua adoção ocorreu predominantemente em trabalhos com a cultura do milho. Assim como Eberhart e Russell, esse método também é baseado em regressão, porém bissegmentada, o que permite haver um parâmetro específico para a adaptabilidade a ambientes desfavoráveis (β_1) e um a ambientes favoráveis ($\beta_1+\beta_2$), além do desvio da regressão (σ_{di}^2 ; CRUZ et al., 1989). Desse modo, esse método possibilita entendimento mais detalhado da adaptabilidade dos genótipos e, por isso, permite a identificação de genótipos adaptados simultaneamente a ambientes favoráveis ($\beta_1+\beta_2 > 1$) e a desfavoráveis ($\beta_1 < 1$). Essa informação adicional pode ser considerada uma vantagem em relação a Eberhart e Russell, o que possivelmente tem contribuído para esse método também ser muito utilizado.

Tabela 1 – Metodologias de estudo da adaptabilidade e estabilidade utilizadas nos artigos que compuseram o presente estudo, e a respectiva classificação da metodologia quanto à abordagem estatística, o número de artigos em que a metodologia foi aplicada e referência.

Metodologia	Classificação	Número de citações	Referência
Tradicional	ANOVA	2	Yates e Cochran (1938)
Plaisted e Peterson	ANOVA	3	Plaisted e Peterson (1959)
Wricke	ANOVA	10	Wricke (1965)
Schmidt	ANOVA	1	Schmidt e Cruz (2005)
Eberhart e Russell	Regressão linear	48	Eberhart e Russell (1966)
Verma, Chahal & Murty	Regressão bissegmentada	3	Verma et al. (1978)
Silva e Barreto	Regressão bissegmentada	1	Silva e Barreto (1985)
Cruz, Torres e Vencovsky	Regressão bissegmentada	32	Cruz et al. (1989)
Modelo bissegmentado descontínuo	Regressão bissegmentada	3	Storck e Vencovsky (1994)
Lin e Binns	Não-paramétrico	10	Lin e Binns (1988)
Kang	Não-paramétrico	1	Kang (1988)
Huehn	Não-paramétrico	1	Huehn (1990)
Annicchiarico	Não-paramétrico	11	Annicchiarico (1992)
Carneiro	Não-paramétrico	8	Carneiro (1998)
Centroide	Não-paramétrico	8	Rocha et al. (2005)
AMMI	Análise multivariada	19	Zobel et al. (1988)
GGE Biplot	Análise multivariada	9	Yan et al. (2000)
MHPRVG	Modelos mistos	4	Resende (2002b)
HMGV	Modelos mistos	1	Resende (2002b)
RPGV	Modelos mistos	1	Resende (2002b)
Toler	Regressão não linear	2	Toler (1990)

Embora Cruz, Torres e Vencovsky seja mais informativo que Eberhart e Russell, conforme já dito, o número de trabalhos que aplicaram esse método foi menor. Cruz, Torres e Vencovsky é mais recente e menos difundido que Eberhart e Russell, o que pode justificar a sua menor utilização. Além disso, o fato de Cruz, Torres e Vencovsky ter um parâmetro a mais que Eberhart e Russell pode representar, para alguns melhoristas, maior dificuldade na interpretação dos resultados e recomendação de cultivares. Por fim, em pequenas redes de ensaios (menos que oito ambientes), os modelos de regressão linear simples, como Eberhart e Russell, devem ser preferidos em relação aos modelos de regressão bissegmentada (SILVA, 2008).

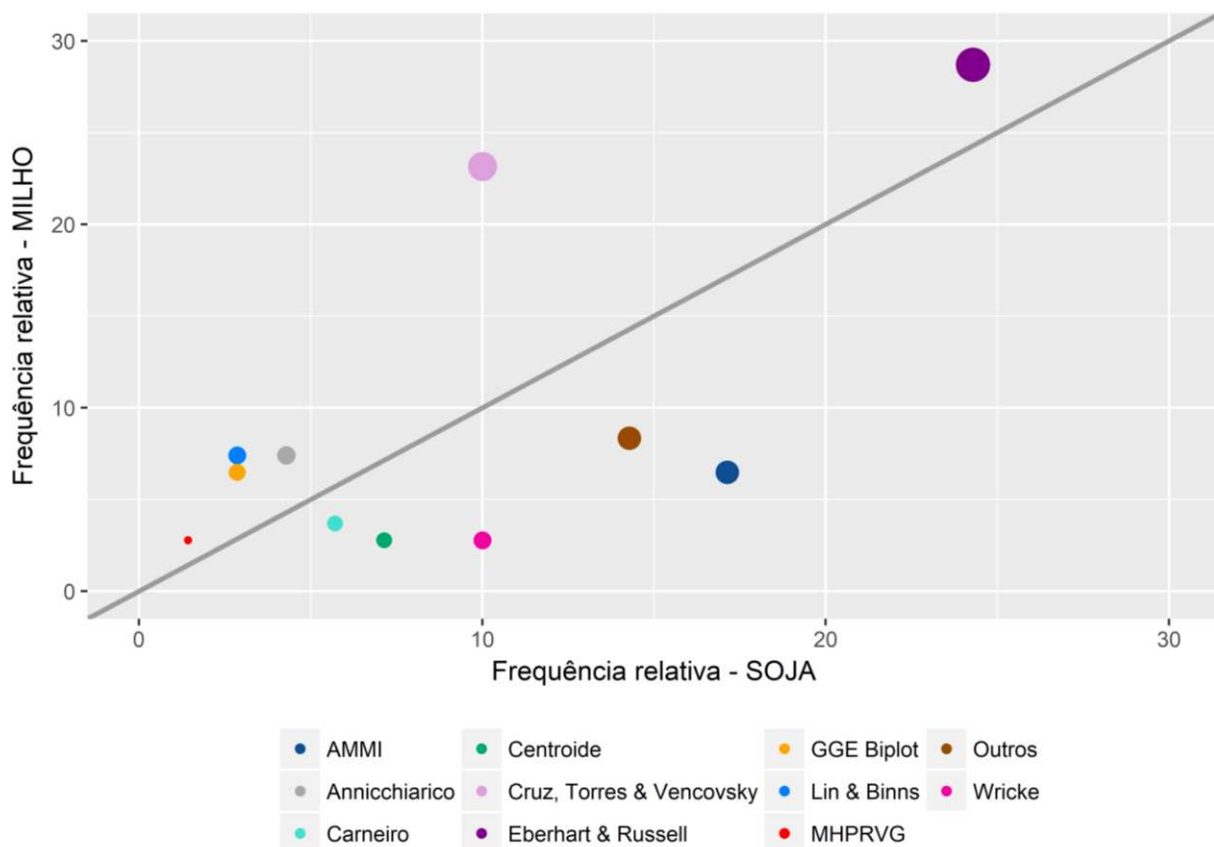


Figura 3 – Frequência relativa da aplicação de método em relação ao número de artigos em soja e em milho abordando adaptabilidade e estabilidade.

O método AMMI (*additive main effects and multiplicative interaction*), proposto em 1988 (ZOBEL et al., 1988), foi o terceiro método mais utilizado (19 artigos) e adotado predominantemente em trabalhos com a cultura da soja. AMMI combina análise de variância para os efeitos principais (genótipo e ambiente) e análise de componentes principais para os efeitos da interação $G \times A$ (GAUCH; ZOBEL, 1996). Ou seja, esse método combina componentes aditivos (efeitos principais) e componentes multiplicativos (efeitos da interação $G \times A$; DUARTE; VENCOVSKY, 1999). Em decorrência dessa abordagem, o método AMMI permite uma análise mais detalhada da interação $G \times A$, uma vez que decompõe a soma de quadrado original ($SQ_{G \times A}$) em duas porções, uma denominada padrão e outra ruído (OLIVEIRA et al., 2003).

Outras vantagens atribuídas ao método AMMI são a facilidade de interpretação, devido à representação gráfica simultânea dos genótipos e ambientes nos biplots, e a capacidade tanto de identificação de genótipos amplamente adaptados quanto de subdivisão da região de recomendação em macroambientes relativamente homogêneos (estratificação ambiental) (GAUCH; ZOBEL, 1996; OLIVEIRA et al, 2003). Maia et al. (2006) afirmam que esse método

é mais robusto, porém não fornece a resposta ao estímulo ambiental (parâmetro de adaptabilidade nos métodos baseados em regressão), além de que é mais complexo.

Os métodos não-paramétricos listados, sobretudo Lin e Binns, Annicchiarico, Carneiro e Centroide, também foram bastante utilizados (39 artigos). Esses métodos possuem a vantagem de não precisarem assumir pressuposições a respeito da distribuição dos valores fenotípicos, como normalidade de resíduos e homogeneidade de variâncias, as quais os métodos paramétricos, como Eberhart e Russell, precisam atender (YUE et al., 1997). Além disso, esses métodos normalmente não utilizam muitos parâmetros para expressar a performance dos genótipos, o que facilita o uso e a interpretação (NASCIMENTO et al., 2009; CRUZ et al., 2014). Contudo, em métodos com muitos parâmetros, como Eberhart e Russell e Cruz, Torres e Vencovsky, essa dificuldade na interpretação pode ser contornada utilizando-se ferramentas como a inteligência computacional. Carneiro et al. (2018) utilizaram a lógica fuzzy, uma técnica de inteligência computacional, para classificar os genótipos em classes de fácil interpretação, como adaptados a ambientes favoráveis, desfavoráveis ou pouco adaptados, a partir dos parâmetros provenientes do método Eberhart e Russell (β_0 , β_1 e R^2).

Em ambas as culturas não foram encontrados artigos na década de 1970 (Figura 4). Na década de 1980 foram encontrados dois artigos abordando milho e dois abordando soja. O número de artigos publicados por década foi crescente até a década de 2000 (2000-2009). Nessa década, a taxa anual média de artigos publicados abordando soja foi de 2,1 e abordando milho foi de 4,1. Na década de 2010 (2010-2017), que ainda não se completou, verificou-se redução significativa no número de artigos publicados abordando adaptabilidade e estabilidade. Nessa década, a taxa anual média de artigos em soja foi de 1,1 e em milho foi de 2,4.

A produção científica e o número artigos científicos publicados, inclusive em Ciências Agrárias, tem crescido acentuadamente nas últimas décadas no Brasil e no mundo (SIDONE et al., 2016). Certamente, esse aumento na produção científica contribuiu para o maior número de artigos publicados sobre a interação GxA. Além disso, possivelmente foi crescente a relevância que os pesquisadores deram à interação GxA nas últimas décadas. Dos 21 métodos listados no presente trabalho, 16 foram propostos entre 1985 e 2005, período pertencente às décadas em que houve crescimento no número de artigos publicados sobre adaptabilidade e estabilidade (1980-1989 a 2000-2009). A redução no número de publicações sobre adaptabilidade e estabilidade na presente década possivelmente indica menor interesse dos periódicos científicos em publicações sobre esse tema. Embora os estudos de adaptabilidade e estabilidade continuem sendo extremamente relevantes para o melhoramento de plantas, há outros temas mais recentes que têm despertado mais atenção da comunidade científica.

Em ambas as culturas, desde as primeiras publicações, a partir da década de 1980, o método Eberhart e Russell foi largamente utilizado. Em milho, a partir da década de 1990, o método Cruz, Torres e Vencovsky, proposto no final da década anterior, também foi muito utilizado. Em soja, além de Eberhart e Russell, o método AMMI também foi bastante utilizado a partir da década de 2000. Conforme já tido, as publicações sobre adaptabilidade e estabilidade reduziram na presente década (2010-2017) e, assim como Eberhart e Russell, a utilização dos métodos Cruz, Torres e Vencovsky, AMMI e da maioria dos outros métodos também reduziu. Isso demonstra que, embora a literatura científica discuta algumas vantagens dos métodos mais recentes, a sua adoção não tem sido superior ao método mais consolidado, Eberhart e Russell.

Contudo, mesmo com a redução do número de publicações, o número de artigos utilizando alguns determinados métodos cresceu na década atual. Os métodos que apresentaram crescimento foram GGE Biplot e MHPRVG (média harmônica) em milho e GGE Biplot, Centróide e MHPRVG em soja. Eeuwijk et al. (2016), em pesquisa realizada na base Web of Science a partir do número de citações de diversos métodos, verificaram que entre 2013 e 2015 predominaram os baseados em análise multivariada, tais como AMMI e GGE Biplot, e, principalmente, os baseados em modelos mistos, classe à qual pertence o método MHPRVG.

O método GGE Biplot, considerado uma modificação do método AMMI, decompõe o efeito do genótipo (G_i) e da interação $G \times A$ (GA_{ij}) pela análise de componentes principais, diferentemente de AMMI, que decompõe por componentes principais somente o efeito da interação $G \times A$ (GA_{ij} ; YAN et al., 2000; BALESTRE et al., 2009). Há muitos trabalhos comparando AMMI e GGE Biplot, porém não há concordância sobre qual é superior (YAN et al., 2007; GAUCH et al., 2008; BALESTRE et al., 2009). De acordo com Eeuwijk et al. (2016), ambos os métodos são muito úteis no estudo da interação $G \times A$ e as razões para se preferir um ou outro são pequenas. Eles afirmam que GGE Biplot apresenta a vantagem de explorar a totalidade da variação relacionada ao genótipo ($G_i + GA_{ij}$), enquanto AMMI apresenta a vantagem de mostrar de modo mais detalhado a parte da interação $G \times A$ da variação fenotípica (GA_{ij}). Embora ambos os métodos, AMMI e GGE Biplot, sejam semelhantes e eficientes, apenas o método GGE Biplot apresentou crescimento no número de publicações na presente década. Possivelmente, esse resultado ocorreu porque o método GGE Biplot carece de mais pesquisas e informações, uma vez que é um método mais recente e menos difundido no Brasil.

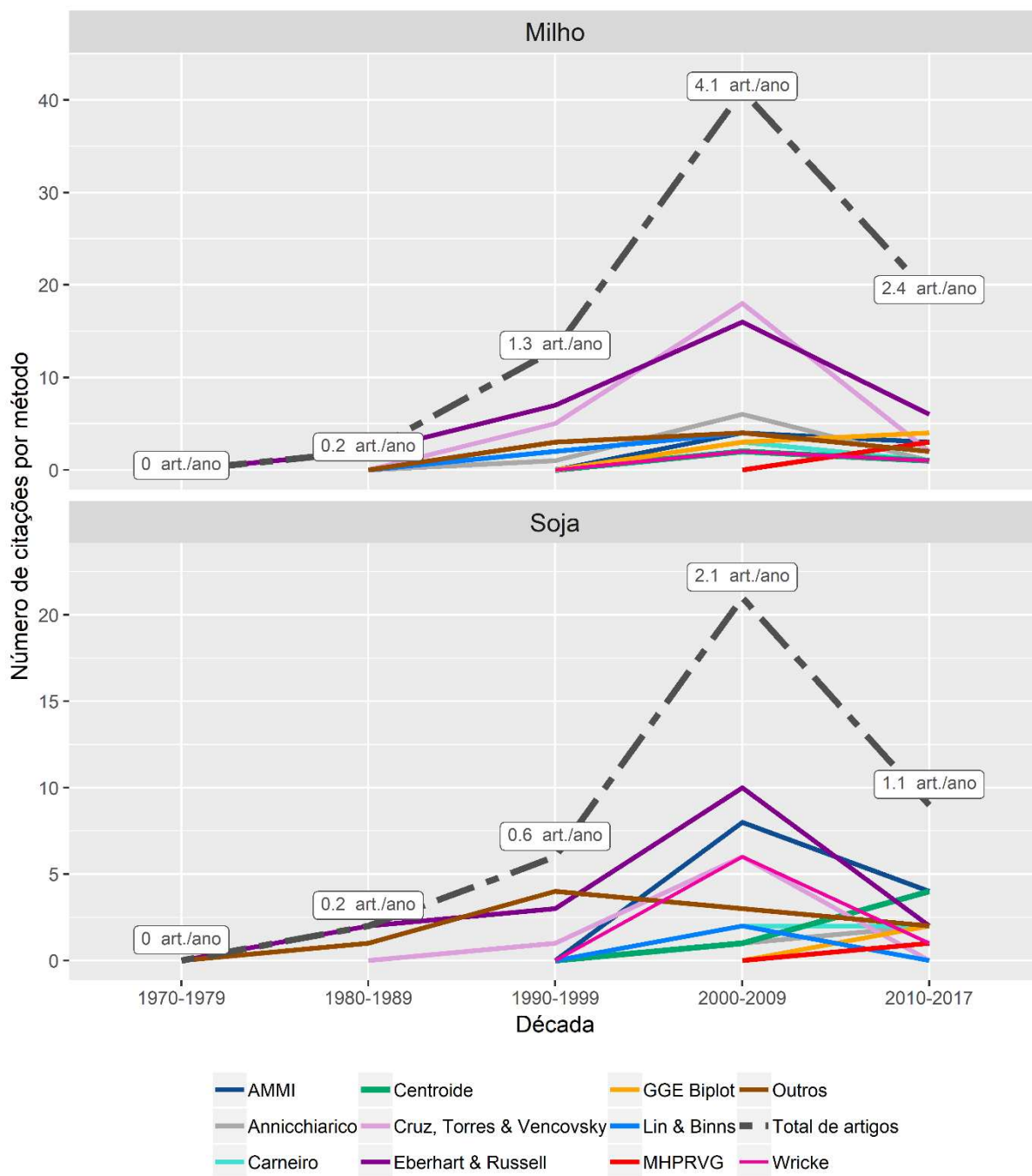


Figura 4 – Número de artigos publicados sobre adaptabilidade e estabilidade, taxa anual média de artigos publicados e número de utilizações de cada método, considerando as diferentes décadas e as culturas milho e soja.

Os métodos baseados em modelos mistos, como MHPRVG, têm como foco modelar a interação GxA considerando a heterogeneidade de variâncias entre ambientes e as covariâncias (MALOSETTI et al., 2013). Por isso, uma das vantagens desses métodos é a possibilidade de analisarem experimentos desbalanceados (MENDES et al., 2012). Os modelos mistos também possibilitam predição acurada da performance genotípica, pois permitem incluir na matriz de

variância e covariância informações de parentesco e de marcadores moleculares, além de correlações entre ambientes (CROSSA et al., 2006; EEUWIJK et al., 2016). O crescimento na adoção do método MHPRVG pode ser justificado pelas vantagens dos modelos mistos e também pela recente adoção em estudos de adaptabilidade e estabilidade no Brasil – dentre os artigos considerados neste trabalho, o primeiro a utilizar um método baseado em modelos mistos foi publicado em 2012.

O Centroide é um método não-paramétrico que consiste em comparar valores de distância cartesiana entre os genótipos e quatro ideótipos criados a partir dos dados experimentais, os quais representam os genótipos de máxima adaptabilidade geral e específica a ambientes favoráveis ou desfavoráveis e os de mínima adaptabilidade (ROCHA et al., 2005). Nascimento et al. (2009) propuseram a inclusão de outros ideótipos com maior sentido biológico no método Centroide, como média adaptabilidade geral e média adaptabilidade a ambientes favoráveis ou desfavoráveis. Esse método proporciona grande facilidade na recomendação, pois permite o direcionamento dos genótipos em relação à variação ambiental, não utiliza vários parâmetros, como Eberhart e Russell, e não possibilita a duplicidade na interpretação como observado em Lin e Binns (NASCIMENTO et al., 2009). Essas vantagens, aliadas à natureza recente do método, possivelmente justificam seu crescimento na década atual.

Há outras classes de métodos para estudo da adaptabilidade e estabilidade em crescente uso, tais como os baseados em modelos bayesianos (NASCIMENTO et al., 2011; EEUWIJK et al., 2016) e em redes neurais artificiais (BARROSO et al., 2013; TEODORO et al., 2015). Porém, não foram encontrados trabalhos em milho ou soja com essas abordagens.

O número médio de métodos adotados nos trabalhos com milho foi de 1,44, e 66,7% dos artigos utilizaram apenas um método. Em soja, o número médio de métodos foi de 1,84, e 50% dos artigos utilizaram apenas um método.

Há alguns métodos de adaptabilidade e estabilidade considerados alternativos e outros considerados complementares, os quais podem ser utilizados conjuntamente (CRUZ et al., 2012). Por exemplo, alguns trabalhos demonstraram que os métodos Wricke e Plaisted e Peterson são redundantes, logo são considerados alternativos (SILVA; DUARTE, 2006; CRUZ et al., 2012). Por outro lado, há autores que consideram Eberhart e Russell e AMMI complementares, visto que o primeiro informa sobre a responsividade de cada genótipo em relação à melhoria ambiental e o segundo estima a contribuição genotípica para a interação GxA, livre de ruídos (SILVA; DUARTE, 2006). Desse modo, a utilização conjunta de Eberhart e Russell e AMMI pode ser uma boa estratégia para o melhor entendimento da interação GxA.

No presente trabalho, observou-se que alguns métodos apresentaram alto grau de associação, ou seja, alta probabilidade de serem utilizados conjuntamente nos trabalhos com mais de um método, o que foi dado pelo coeficiente de equivalência (E_{ij} ; Figura 5). Verificou-se alto grau de associação entre os métodos não-paramétricos (Lin e Binns, Annicchiarico, Centroide e Carneiro), entre os métodos baseados em análise multivariada (AMMI e GGE Biplot) e entre os baseados em regressão linear simples ou bissegmentada (Eberhart e Russell e Cruz, Torres e Vencovsky). Ou seja, verificou-se que as associações ocorreram principalmente entre métodos da mesma classe.

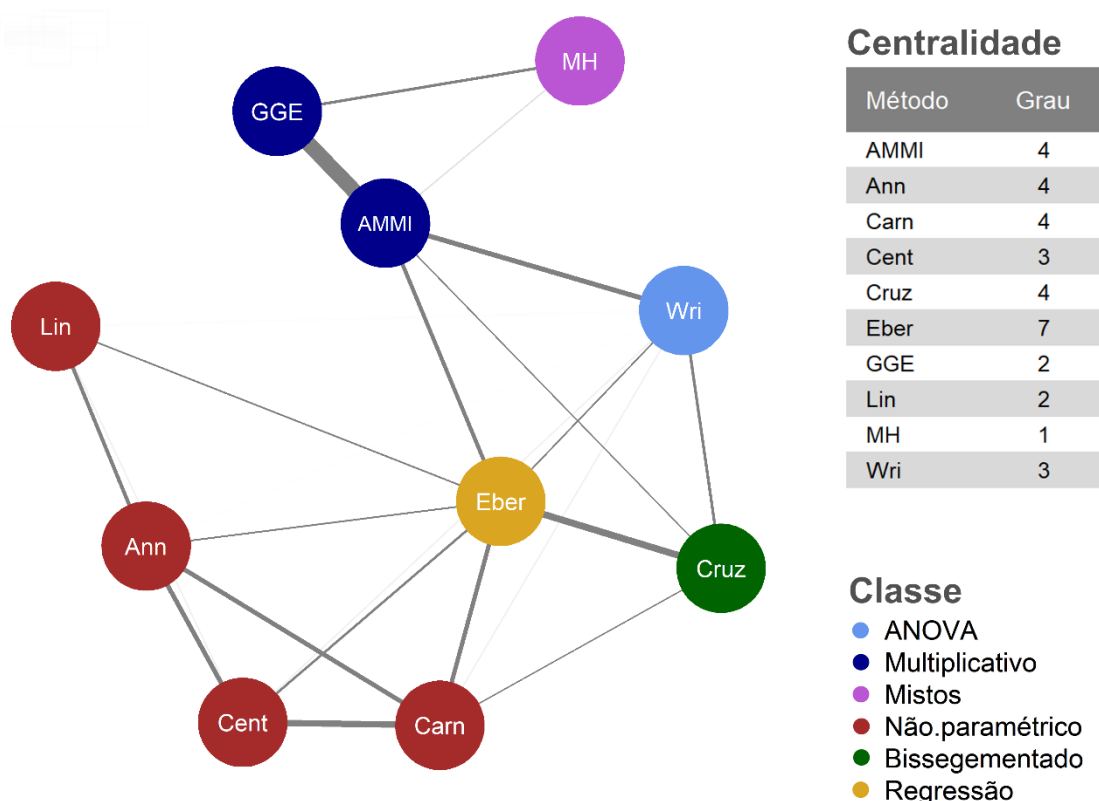


Figura 5 – Rede de associação entre os métodos, de acordo com a classe, construída com base no coeficiente de equivalência (E_{ij}), e centralidade de grau de cada método (número de conexões com $E_{ij} \geq 0,015$). Ann = Annicchiarico; Carn = Carneiro; Cent = Centroide; Cruz = Cruz, Torres e Vencovsky; Eber = Eberhart e Russell; GGE = GGE Biplot; Lin = Lin e Binns; MH = MHPRVG; Wri = Wricke.

No entanto, normalmente os métodos de uma mesma classe (mesma abordagem estatística) tendem a apresentar alta concordância entre si (SILVA; DUARTE, 2006; CARGNELUTTI FILHO et al., 2009) e, em geral, não trazem informações complementares, uma vez que são semelhantes. Por isso, o uso concomitante de métodos da mesma classe geralmente não contribui para a recomendação de cultivares.

Nesse sentido, Silva e Duarte (2006) observaram forte associação entre os métodos não-paramétricos Annicchiarico e Lin e Binns e, por isso, relataram que o uso simultâneo dos dois não é recomendado. Cargnelutti Filho et al. (2007) observaram alta correlação nas cultivares indicadas pelos métodos não-paramétricos Carneiro e Annicchiarico. Cargnelutti Filho et al. (2009) verificaram boa concordância entre as estimativas dos parâmetros de adaptabilidade e alta concordância entre estas estimativas dos parâmetros de estabilidade de diversos métodos baseados em regressão (Eberhart e Russell, Silva e Barreto, Cruz, Torres e Vencovsky, etc.).

Desse modo, em muitos artigos que utilizaram mais de um método, a escolha do conjunto de métodos não se baseou na complementariedade de informações. Nesses casos, algumas possíveis motivações no processo de escolha foram a comparação entre métodos semelhantes e a ratificação dos resultados encontrados por um determinado método utilizando outros. Por exemplo, Oliveira et al. (2010), além de buscarem identificar a adaptabilidade e estabilidade de diversos genótipos de milho, também tiveram como objetivo comparar AMMI e GGE Biplot.

O método Eberhart e Russell foi o que apresentou a maior centralidade de rede. Em um grafo, os vértices – neste caso, os métodos – que apresentam maior grau ou mais conexões são mais centrais na estrutura e tendem a ter maior capacidade de influenciar os demais (YAN; DING, 2009). Como Eberhart e Russell é o método mais difundido, normalmente tem sido uma referência em trabalhos que comparam a recomendação de cultivares por mais de um método. Além disso, há relatos da complementariedade de Eberhart e Russell com diversos outros métodos, como AMMI, Annicchiarico, Lin e Binns e MHPRVG (SILVA; DUARTE, 2006; PAULA et al., 2014).

4 CONCLUSÕES

A adaptabilidade e estabilidade tem sido largamente estudada em milho e soja nas últimas décadas no Brasil. Porém, na presente década tem se notado redução nas pesquisas.

O método predominante nos estudos de adaptabilidade e estabilidade é Eberhart e Russell. Os métodos Cruz, Torres e Vencovsky e AMMI também são bastante utilizados. Além disso, a adoção dos métodos GGE Biplot, MHPRVG e Centroides tem crescido na presente década.

REFERÊNCIAS

- ALAWA, S.; KWOLEK, T.; MCPHERSON, M.; PELLOW, J.; MEYER, D. A comprehensive comparison between Eberhart and Russell joint regression and GGE biplot analyses to identify stable and high yielding maize hybrids. **Fields Crop Research**, Amsterdam, v. 119, n. 2, p. 225-230, 2010.
- ALLIPRANDINI, L. F.; ABATTI, C.; BERTAGNOLLI, P. F.; CAVASSIM, J. E.; GABE, H. L.; KUREK, A.; MATSUMOTO, M. N.; OLIVEIRA, M. A. R.; PITOL, C.; PRADO, L. C.; STECKLING, C. Understanding soybean maturity groups in Brazil: environment, cultivar classification and stability. **Crop Science**, Madison, v. 49, n. 3, p. 801-808, 2009.
- ANNICCHIARICO, P. Cultivar adaptation and recommendation from alfalfa trials in Northern Italy. **Journal of Genetics and Breeding**, Roma, v. 46, n. 1, p. 269-278, 1992.
- BALESTRE, M.; VON PINHO, R. G.; SOUZA, J. C.; OLIVEIRA, R. L. Genotypic stability and adaptability in tropical maize based on AMMI and GGE biplot analysis. **Genetics and Molecular Research**, Ribeirão Preto, v. 8, n. 4, p. 1311-1322, 2009.
- BARROSO, L. M. A.; NASCIMENTO, M.; NASCIMENTO, A. C. C.; SILVA, F. F.; FERREIRA, R. P. Uso do método de Eberhart e Russell como informação a priori para aplicação de redes neurais artificiais e análise discriminante visando a classificação de genótipos de alfafa quanto à adaptabilidade e estabilidade fenotípica. **Revista Brasileira de Biometria**, São Paulo, v. 31, n. 2, p. 176-188, 2013.
- BORENSTEIN, M.; HEDGES, L. V.; HIGGINS, J. P. T.; ROTHSTEIN, H. R. **Introduction to Meta-analysis**. Hoboken: Wiley, 2009. 421 p.
- BRANQUINHO, R. G.; DUARTE, J. B.; SOUZA, P. I. M.; SILVA NETO, S. P.; PACHECO, R. M. Estratificação ambiental e otimização de rede de ensaios de genótipos de soja no Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 49, n. 10, p. 783-795, 2014.
- CARGNELUTTI FILHO, A.; PERECIN, D.; MALHEIROS, E. B.; GUADAGNIN, J. P. Comparação de métodos de adaptabilidade e estabilidade relacionados à produtividade de grãos de cultivares de milho. **Bragantia**, Campinas, v. 66, n. 4, p. 571-578, 2007.
- CARGNELUTTI FILHO, A.; STORCK, L.; RIBOLDI, J.; GUADAGNIN, J. P. Associação entre métodos de adaptabilidade e estabilidade em milho. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 2, p. 340-347, 2009.
- CARNEIRO, P. C. S. **Novas metodologias de análise da adaptabilidade e estabilidade de comportamento**. 1998. 155f. Tese (Doutorado em Genética e Melhoramento) - Universidade Federal de Viçosa.
- CARNEIRO, V. Q.; PRADO, A. L.; CRUZ, C. D.; CARNEIRO, P. C. S.; NASCIMENTO, M.; CARNEIRO, J. E. S. Fuzzy control systems for decision-making in cultivars recommendation. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 40, n. 1, p. 1-8, 2018.
- CROSSA, J.; BURGUEÑO, J.; CORNELIUS, P. L.; MCLAREN, G.; TRETOWAN, R.; KRISHNAMACHARI, A. Modeling genotype x environment interaction using additive genetic covariances of relatives for predicting breeding values of wheat. **Crop Science**, Madison, v. 46, n. 4, p. 1722-1733, 2006.

CRUZ, C. D.; TORRES, R. A.; VENCOVSKY, R. An alternative approach to the stability analysis proposed by Silva e Barreto. **Revista Brasileira de Genética**, Ribeirão Preto, v. 12, n. 3, p. 567-580, 1989.

CRUZ, C. D.; REGAZZI, A. J.; CARNEIRO, P. C. S. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. v. 1. 4 ed. Viçosa: Editora UFV, 2012. 514 p.

CRUZ, C. D. GENES - a software package for analysis in experimental statistics and quantitative genetics. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 35, n. 3, p. 271-276, 2013.

CRUZ, C. D.; CARNEIRO, P. C. S.; REGAZZI, A. J. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. v. 2. 3. ed. Viçosa: Ed. UFV, 2014. 668 p.

DUARTE, J. B.; VENCOVSKY, R. **Interação genótipos x ambientes: uma introdução à análise AMMI**. Ribeirão Preto: Sociedade Brasileira de Genética, 1999. 60p. (Série Monografias, 9).

EBERHART, S. A.; RUSSELL, W. A. Stability parameters for comparing varieties. **Crop Science**, Madison, v. 6, n. 1, p. 36-40, 1966.

EEUWIJK, F. A.; BUSTOS-KORTS, D. V.; MALOSETTI, M. What should students in plant breeding know about the statistical aspects of genotype x environment interactions? **Crop Science**, Madison, v. 56, n. 5, p. 2119-2140, 2016.

EPSKAMP, S.; CRAMER, A. O. J.; WALDORP, L. J.; SCHMITTMANN, V. D.; BORSBOOM, D. qgraph: network visualizations of relationships in psychometric data. **Journal of Statistical Software**, Innsbruck, v. 48, n. 1, p. 1- 18, 2012.

ELIAS, A. A.; ROBBINS, K. R.; DOERGE, R. W.; TUINSTRA, M. R. Half a century of studying genotype x environment interactions in plant breeding experiments. **Crop Science**, Madison, v. 56, n. 5, p. 2090-2105, 2016.

FERREIRA, D. F.; ZAMBALDE, A. L. Simplificação das análises de algumas técnicas especiais da experimentação agropecuária no mapeamento e softwares correlatos. In: CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE INFORMÁTICA APLICADA A AGROPECUÁRIA E AGROINDÚSTRIA, 1., 1997, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: Agrosoft, 1997. p. 54- 60.

FINLAY, K. W.; WILKINSON, G. N. The analysis of adaptation in a plant breeding programme. **Australian Journal of Agricultural Research**, Melbourne, v. 14, n. 3, p. 742-754, 1963.

FRUCHTERMAN, T. M. J.; REINGOLD, E. M. Graph drawing by force- directed placement. **Software: Practice and Experience**, Melbourne, v. 21, n. 11, p. 1129- 1164, 1991.

GAUCH, H. G.; ZOBEL, W. AMMI analysis of yield trials. In: KANG, M. S.; GAUCH, H. G. (Eds.). **Genotype by environment interaction**. Boca Raton: CRC Press, 1996. p. 85-122.

GAUCH, H. G.; PIEPHO, H. P.; ANNICCHIARICO, P. Statistical analysis of yield trials by AMMI and GGE: further considerations. **Crop Science**, Madison, v. 48, n. 3, p. 866-889, 2008.

HUEHN, M. Nonparametric measures of phenotypic stability. Part 1: Theory. **Euphytica**, Wageningen, v. 47, n. 3, p. 189-194, 1990.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Levantamento sistemático da produção agrícola**. 2017. Disponível em: <ftp://ftp.ibge.gov.br/Producao_Agricola/Levantamento_Sistemático_da_Producao_Agricola_[mensal]/Fasciculo/2017/lspa_201712.pdf>. Acesso em: 29 jun. 2018.

KANG, M. J. A rank-sum method for selecting high-yielding, stable corn genotypes. **Cereal Research Communications**, Szeged, v. 16, n. 1, p. 113-115, 1988.

LIN, C. S.; BINNS, M. R. A superiority measure of cultivar performance for cultivar x location data. **Canadian Journal of Plant Science**, Ottawa, v. 68, n. 3, p. 193-198, 1988.

MAIA, M. C. C.; VELLO, N. A.; ROCHA, M. M.; PINHEIRO, J. B.; SILVA JÚNIOR, N. F. Adaptabilidade e estabilidade de linhagens experimentais de soja selecionadas para caracteres agronômicos através de método uni-multivariado. **Bragantia**, Campinas, v. 66, n. 2, p. 215-226, 2006.

MALOSETTI, M.; RIBAUT, J. M.; EEUWIJK, F. A. V. The statistic analysis of multi-environment data: modeling genotype-by-environment interaction and its genetic basis. **Frontiers in Physiology**, Lausanne, v. 4, n. 1, p. 1-17, 2013.

MEDINA, E. U.; PAILAQUILÉN, R. M. B. Systematic review and its relationship with evidence-based practice in health. **Revista Latino-Americana de Enfermagem**, Ribeirão Preto, v. 18, n. 4, p. 824-831, 2010.

MENDES, F. F.; GUIMARÃES, L. J. M.; SOUZA, J. C.; GUIMARÃES, P. E. O.; PACHECO, C. A. P.; MACHADO, J. R. A.; MEIRELLES, W. F.; SILVA, A. R.; PARENTONI, S. N. Adaptability and stability of maize varieties using mixed methodology. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, Viçosa, v. 12, n. 2, p. 111-117, 2012.

NASCIMENTO, M.; CRUZ, C. D.; CAMPANA, A. C. M.; TOMAZ, R. S.; SALGADO, C. C.; FERREIRA, R. P. Alteração no método centróide de avaliação da adaptabilidade genotípica. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 44, n. 3, p. 263-269, 2009.

NASCIMENTO, M.; SILVA, F. F.; SÁFADI, T.; NASCIMENTO, A. C. C.; FERREIRA, R. P.; CRUZ, C. D. Abordagem bayesiana para avaliação da adaptabilidade e estabilidade de genótipos de alfafa. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 1, p. 26-32, 2011.

OLIVEIRA, A. B.; DUARTE, J. B.; PINHEIRO, J. B. Emprego da análise AMMI na avaliação da estabilidade produtiva em soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 3, p. 357-364, 2003.

- OLIVEIRA, R. L.; VON PINHO, R. G.; BALESTRE, M.; FERREIRA, D. V. Evaluation of maize hybrids and environmental stratification by the methods AMMI and GGE biplot. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, Viçosa, v. 10, n. 3, p. 247-253, 2010.
- PAULA, T. O. M.; MARINHO, C. D.; SOUZA, V.; BARBOSA, M. H. P.; PETERNELLI, L. A.; KIMBENG, C. A.; ZHOU, M. M. Relationships between methods of variety adaptability and stability in sugarcane. **Genetics and Molecular Research**, Ribeirão Preto, v. 13, n. 2, p. 4216-4225, 2014.
- PLAISTED, R. L.; PETERSON, L. C. A technique for evaluating the ability of selections to yield consistently in different locations and seasons. **American Potato Journal**, Orono, v. 36, n. 2, p. 381-385, 1959.
- R CORE TEAM. **R: a language and environment for statistical computing**. Viena: R Foundation for Statistical Computing, 2017.
- RESENDE, M. D. V. **Software Selegen – REML/BLUP**. Colombo: Embrapa Florestas, 2002a. 67 p. (Embrapa Florestas. Documentos, 77).
- RESENDE, M. D. V. **Genética biométrica e estatística no melhoramento de plantas perenes**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2002b. 975 p.
- ROBREDO, J.; CUNHA, M. B. Aplicação de técnicas infométricas para identificar a abrangência do léxico básico que caracteriza os processos de indexação e recuperação da informação. **Ciência da Informação**, Brasília, v. 27, n., 1, p. 11-27, 1998.
- ROCHA, R. B.; MURO- ABAD, J. I.; ARAÚJO, E. F.; CRUZ, C. D. Avaliação do método centróide para estudo de adaptabilidade ao ambiente de clones de *Eucalyptus grandis*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 15, n. 3, p. 255- 266, 2005.
- SAS INSTITUTE. **Software and services: system for Windows versão 8.0: software**. Cary, 2002.
- SCHMILDT, E. R.; CRUZ, C. D. Análise da adaptabilidade e estabilidade do milho pelos métodos de Eberhart e Russell (1966) e de Annicchiarico (1992). **Revista Ceres**, Viçosa, v. 52, n. 299, p. 45-58, 2005.
- SIDONE, O. J. G.; HADDAD, E. A.; MENA-CHALCO, J. P. A ciência nas regiões brasileiras: evolução da produção e das redes de colaboração científica. **TransInformação**, Campinas, v. 28, n. 1, p. 15-31, 2016.
- SILVA, J. G. C.; BARRETO, J. N. Aplicação da regressão linear segmentada em estudos da interação genótipo x ambiente. In: SIMPÓSIO DE ESTATÍSTICA APLICADA À EXPERIMENTAÇÃO AGRONÔMICA, 1985, Campinas. **Anais...** Campinas: Fundação Cargil, 1985. p. 49-50.
- SILVA, W. C. J.; DUARTE, J. B. Métodos estatísticos para estudo de adaptabilidade e estabilidade fenotípica em soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 1, p. 23-30, 2006.

SILVA, M. A. Interação genótipo x ambiente e estabilidade fenotípica de cana-de-açúcar em ciclo de cana de ano. **Bragantia**, Campinas, v. 67, n. 1, p. 109-117, 2008.

STATSOFT. **STATISTICA for Windows [Computer program manual]**. Tulsa. 1995.

STORCK, L.; VENCOVSKY, R. Stability analysis on a bi-segmented discontinuous modelo with measurement errors in the variables. **Revista Brasileira de Genética**, Ribeirão Preto, v. 17, n. 1, p. 75-81, 1994.

TAI, G. C. C. Genotype stability analysis and its application to potato regional trials. **Crop Science**, Madison, v. 11, n. 1, p. 184-190, 1971.

TEODORO, P. E.; BARROSO, L. M. A.; NASCIMENTO, M.; TORRES, F. E.; SAGRILO, E.; SANTOS, A.; RIBEIRO, L. P. Redes neurais artificiais para identificar genótipos de feijão-caupi semiprostrado com alta adaptabilidade e estabilidade fenotípicas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 50, n. 11, p. 1054-1060, 2015.

TOLER, J. E. **Patterns of genotypic performance over environmental arrays**. 1990. 154p. Thesis (Ph.D.) – Clemson University, South Carolina, USA.

TRANFIELD, D.; DENYER, D.; SMART, P. Towards a methodology for developing evidence-informed management knowledge by means of systematic review. **British Journal of Management**, Londres, v. 14, n. 3, p. 207-222, 2003.

VERMA, M. M.; CHAHAL, G. S.; MURTY, B. R. Limitations of conventional regression analysis: a proposed modification. **Theoretical and Applied Genetics**, Berlim, v. 53, n. 3, p. 89-91, 1978.

WICKHAM, H. **ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis**. New York: Springer, 2009. 212 p.

WRICKE, G. Zur Berechnung der Ökovalenz bei Sommerweizen und Hafer. **Pflanzenzuchtung**, Berlim, v. 52, n. 1, p. 127-138, 1965.

YAN, W.; HUNT, L. A.; SHENG, Q.; SZLAVNICS, Z. Cultivar evaluation and mega-environment investigation based on the GGE Biplot. **Crop Science**, Madison, v. 40, n. 3, p. 597-605, 2000.

YAN, W. GGEbiplot – a Windows application for graphical analysis of multi-environment trial data and other types of two-way data. **Agronomy Journal**, Madison, v. 93, n. 5, p. 1111-1118, 2001.

YAN, W.; KANG, M. S.; MA, B.; WOODS, S.; CORNELIUS, P. L. GGE biplot vs. AMMI analysis of genotype-by-environment data. **Crop Science**, Madison, v. 47, n. 2, p. 643-655, 2007.

YAN, E.; DING, Y. Applying centrality measures to impact analysis: a coauthorship network analysis. **Journal of the American Society for Information Science and Technology**, New York, v. 60, n. 10, p. 2107-2118, 2009.

YATES, F.; COCHRAN, W. G. The analysis of group of experiments. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v. 28, n. 1, p. 556-580, 1938.

YUE, G. L.; ROOZEBOOM, K. L.; SCHAPAUGH JR., W. T.; LIANG, G. H. Evaluation of soybean cultivars using parametric and nonparametric estimates. **Plant Breeding**, Berlin, v. 116, n. 3, p. 271-275, 1997.

ZOBEL, R. W.; WRIGHT, M. J.; GAUCH, H. G. Statistical analysis of a yield trial. **Agronomy Journal**, Madison, v. 80, n. 3, p. 388-393, 1988.

**CAPÍTULO 2 – PERFORMANCE AND YIELD STABILITY OF MAIZE HYBRIDS
EVALUATED IN CONTRASTING MULTI-ENVIRONMENT TRIALS IN EASTERN
AFRICA**

PERFORMANCE AND YIELD STABILITY OF MAIZE HYBRIDS EVALUATED IN CONTRASTING MULTI-ENVIRONMENT TRIALS IN EASTERN AFRICA

ABSTRACT

Identification of high yielding and stable performance of maize hybrids in multi-environment trials is important for Eastern Africa. The objectives of this study were to (i) assess the performance of maize hybrids under well-watered and drought stress conditions, (ii) evaluate grain yield stability of 65 intermediate and 55 early maturing hybrids tested at 24 well-watered locations and seven drought stress locations via GGE biplot analysis and Cruz's bi-segmented regression linear method and (iii) identify representative and/or discriminating testing locations. There were significant differences for grain yield among early and intermediate maturing hybrids tested under well-watered and drought stress locations. Among early maturing hybrids, the top 10 hybrids produced 46.8–73.9 and 31.2–42.1% higher mean grain yields than the best commercial check under drought and well-watered conditions, respectively. While among intermediate maturing hybrids, the best 10 hybrids produced 6.8–26.1 and 8.5–13.5% higher grain yields than commercial checks under drought and well-watered conditions, respectively. These results indicate that the new experimental hybrids had high grain yield and acceptable agronomic traits compared to widely grown commercial hybrids. The top hybrids identified in this study could be recommended for commercial production in Eastern Africa. The GGE biplot analysis also showed variation among the hybrids in terms of grain yield performance and stability. GGE biplot identified E23, E15 and E12 (early maturing hybrids) and I18, I35 and I15 (intermediate maturing hybrids) as the best genotypes under well-watered conditions and E4, E37 and E2 (early maturing) and I41, I21, I7, I10 and I4 (intermediate maturing) under drought stress locations. In addition, using GGE biplot analysis and Cruz's bi-segmented regression linear method identified E14, E2 and E23 (early maturity hybrids) and the I35, I18, I21 and I41 (intermediate maturity hybrids) as well adapted to both well-watered and drought stress conditions. These hybrids could be recommended for commercial release where drought is a common occurrence in Eastern Africa. Kakamega was the most representative and high discriminating site among optimum testing locations, while Kabuku was the least representativeness of test locations. Under drought stress testing locations, Kiboko was the most representative location. This information could be useful to allocate resources and to streamline the CIMMYT maize hybrids testing program in Eastern Africa.

Keywords: *Zea mays* L.; breeding; genotype by environment interaction; adaptability.

1 INTRODUCTION

Maize is the main staple food in Eastern Africa and accounts for half of human consumption of calories in the region (SHIFERAW et al., 2011). In Eastern Africa, the annual maize production is 28 million tons produced on a quarter of the agriculture area (FAOSTAT, 2016). Maize production needs to increase in this region as well as worldwide because of population and economic growth (TESFAYE et al., 2018). Between 2017 and 2050, the African population is projected to grow around by 90% (1.3 to 2.5 billion; UNITED NATIONS, 2017). Average maize yield in sub-Saharan Africa (SSA), where Eastern Africa is located, is 1.8 t ha⁻¹, which is significantly lower than the yield in other maize-growing regions in the developing world because of biotic and abiotic stresses such as pests and diseases, poor soil fertility and drought stress.

Drought stress, which causes several changes in morphophysiological traits and metabolism of plants, is one of the major constraints to maize yield in Eastern Africa (WITT et al., 2012; BEYENE et al., 2016; ERTIRO et al., 2017). Across Africa, around 40% of the maize-growing area faces occasional drought stress, resulting in yield losses of 10-25% (FISHER et al., 2015). Besides, drought stress is expected to occur more frequently and severely in the future as a result of climate change (TESFAYE et al., 2018). Several studies show that climate change will harm agricultural production, especially in the tropics and subtropics, in regions such as SSA (LOBELL et al., 2011; CAIRNS et al., 2013). In SSA, crop production is mostly produced by smallholder farmers and rain-dependent, and irrigation is not available. Therefore, development and deployment of tropical maize varieties with relevant agronomic and adaptive traits is key to enhance the food security and livelihoods of maize farming communities.

Breeding for drought tolerance and yield stability is an important part of the solution to stabilizing global production. The development of maize varieties with drought tolerance coupled with high yielding potential has become a high priority goal for CIMMYT Global Maize Breeding Program (CAIRNS; PRASANNA, 2018). Inbred lines with superior breeding values for yield and tolerance to abiotic stresses have been used as base materials to develop high-yielding and drought-tolerant hybrids (CAIRNS; PRASANNA, 2018). To facilitate the development and use of improved tropical maize germplasm, CIMMYT – Global Maize Breeding Program adopted several approaches for breeding for drought-stress tolerance including marker-assisted recurrent selection (MARS), genomic selection (GS) and pedigree

selection (BEYENE et al., 2016). Over the past decades, the CIMMYT has made significant progress in developing maize germplasm tolerant to drought (CAIRNS; PRASANNA, 2018; BEYENE et al., 2017). The germplasm available as inbred lines can be used to develop hybrids and synthetics withstanding drought. Wossen et al. (2017) reported that if the drought-tolerant maize varieties (DTMV) adopters had not adopted these varieties, their yield would have decreased by 13.3%, the poverty would have increased by 12.9% and the probability of seasonal food scarcity would have increased 84%. In addition, the seed cost and the labor required to grow DTMV is similar to non-DTMV cultivars (FISHER et al., 2015).

Newly developed hybrids need to be tested in many locations for several years to determine their performance and adaptability before commercial release. To identify the best hybrids, the genotype by environment (GE) interaction is a big challenge as it may cause inconsistencies in the genotype ranking across environments. This makes the selection and recommendation of suitable maize hybrids difficult (KANG, 2002; CROSSA et al., 2012). Therefore, understanding and interpreting GE interaction is essential to improve genetic progress (SENTIMELA et al., 2007). To reduce the negative effects of GE interaction it is important to identify more stable genotypes across multiple environments (COUTO et al., 2015) and to know the ability of test environments to discriminate genotypes and to represent well a target region (YAN; TINKER, 2006).

Several statistical methods are available that can analyze the GE interaction and genotype stability. For instance, there are methods based on linear regression (FINLAY; WILKINSON, 1963; EBERHART; RUSSELL, 1966), bi-segmented regression (VERMA et al. 1978; CRUZ et al. 1989), non-parametric tests (LIN; BINNS, 1988; HUEHN, 1990) and linear-bilinear models as AMMI and GGE biplot (ZOBEL et al., 1988; YAN et al., 2000). Some of methods are considered as alternatives and others as complementary (CRUZ et al., 2012) and use of more than one method to study the GE interaction can be more efficient (BORNHOFEN et al., 2017). Thus, the objectives of this study were (i) to evaluate the performance of maize hybrids under well-watered or drought stress conditions, (ii) to estimate grain yield stability of 65 intermediate and 55 early maturing hybrids tested across seven drought stress locations and 24 optimum locations via GGE biplot analysis and Cruz's bi-segmented regression linear method and (iii) to identify the best representative and/or discriminating testing locations

2 MATERIAL AND METHODS

2.1 Germplasm, experimental sites, experimental design and field evaluations

A total of 55 early maturing and 65 intermediate maturing regional hybrids were selected for these studies. The CIMMYT regional trials are the last stage of testing and have been sources of promising drought tolerant maize varieties and hybrids for further testing in national performance (NPT) and on-farm trials before commercialization. The hybrids in these trials were selected because they were above average performance in previous stage III trials within CIMMYT maize breeding pipelines (BEYENE et al., unpublished data). Five commercial checks were included in early maturing trials and seven commercial checks in intermediate maturing trials. The experimental hybrids and commercial checks were evaluated in 23-24 well-watered (WW) and 6-7 drought stress (DS) locations, depending on maturity trial, in Kenya, Uganda and Tanzania in 2017 (Table 1). An alpha-lattice design with two replications per location was utilized for the trials. Under drought stress trials, maize receives a low amount of precipitation during the growing season and yields are usually lower than 4 t ha⁻¹. On the other hand, in well-watered trials, maize receives sufficient amount of water in the form of precipitation or irrigation and yields are usually higher than 4 t ha⁻¹.

Entries were planted in two-row plots, 5 m long, with 0.75 m spacing between rows and 0.25 m between hills. Two seeds per hill were initially planted and then thinned to one plant per hill at 3 weeks after emergence to obtain a final plant population density of 53,333 plants per hectare. Fertilizers were applied at the rate of 60 kg N and 60 kg P₂O₅ per ha as recommended for the area. Nitrogen was applied twice: at planting and 6 weeks after emergence. Fields were kept free of weeds by hand weeding.

Data on grain yield (GY), days to anthesis (DA), plant height (PH), gray leaf spot (GLS, caused by *Cercospora zae-maydis*) and northern corn leaf blight (NCLB, caused by *Exserohilum turcicum*) were collected. PH was measured in cm as the distance from the base of the plant to the height of the first tassel branch. DA was determined as the number of days from sowing till when 50% of plants had shed pollen. GLS and NCLB were measured using a 1–5 scale where 1 is no infection and 5 is high infection. GY was calculated from ear weight considering an average shelling percentage of 80%, adjusted to 12.5% moisture content and converted to t ha⁻¹.

2.2 Data analysis

The best linear unbiased estimates (BLUES) across locations for each trial and each trait were generated using the following linear mixed model (FLORES et al., 2017):

$$Y_{ijk} = \mu + L_j + R_r(L_j) + B_k[R_r(L_j)] + G_i + GL_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

where Y_{ijrk} is the grain yield of genotype i at location j in replicate r within the block k ; μ is the general mean; L_j is the fixed effect of the location j ; $R_r(L_j)$ is the fixed effect of the replicate r within location j ; $B_k[R_r(L_j)]$ is the random effect of the incomplete block k within replicate r and location j assumed to be independently and identically normal distributed with mean zero and variance $\sigma^2_{B(RL)}$; G_i is the fixed effect of genotype i ; GL_{ij} is the fixed effect of the genotype \times location interaction; and ε_{ijrk} is the random residual error assumed independent and identically normal distributed with mean zero and variance σ^2_{ε} .

Table 1 – Description of experimental sites used to evaluate maize hybrids in Eastern Africa.

Site name	Country	Longitude and latitude	Elevation (masl)	Early maturity		Intermediate maturity	
				WW	DS	WW	DS
ADC Nai	Kenya	36°55'E 1°17'S	1606	X		X	
Boit	Kenya	37°34'E 0°30'S	1296		X	X	
Chepkanga	Kenya	35°21'E 0°35'N	2170	X			
Embu	Kenya	37°28'E 0°30'S	1500	X	X	X	X
Isinya	Kenya	36°51'E 1°40'S	1640	X		X	
Kabuku	Kenya	36°40'E 1°09'S	2155	X		X	
Kabula	Kenya	34°50'E 0°47'N	1331		X	X	
Kaguru	Kenya	37°40'E 0°05'S	1480	X		X	
Kakamega	Kenya	34°46'E 0°17'N	1585	X		X	
Kibire	Kenya	37°11'E 0°32'S	1441			X	
Kiboko	Kenya	37°44'E 2°13'S	975	X	X	X	X
Kirinyaga	Kenya	37°19'E 0°34'S	1297	X		X	
Kitale	Kenya	35°01'E 0°59'N	1900			X	
Kochalia	Kenya	34°21'E 0°37'N	1238	X		X	
Marima	Kenya	37°40'E 0°16'N	1404				X
Mbeere	Kenya	37°34'E 0°44'S	1048	X		X	
Mtwapa	Kenya	39°13'E 4°21'S	30	X		X	
Naivasha	Kenya	36°23'E 0°41'S	1904	X		X	
Ol-Eldowns	Kenya	34°51'E 1°04'N	1975	X		X	
Wambugu	Kenya	36°59'E 0°27'S	1756	X		X	
Ilonga	Tanzania	36°51'E 9°04'S	506	X		X	
Mlangarini	Tanzania	36° 46'E 3°26'S	1269	X			X
Abii	Uganda	30°57'E 3°05'N	1147		X		X
Bulindi	Uganda	31°26'E 1°29'N	1276	X		X	
Ngetta	Uganda	32°27'E 2°16'N	1082	X		X	
Serere	Uganda	33°27'E 1°30'N	1085		X		X

Also, the variance components and heritability across locations were estimated. Broad-sense heritability (H^2) was estimated based on entry mean according:

$$H^2 = \frac{\sigma_g^2}{\sigma_g^2 + \frac{\sigma_{gl}^2}{l} + \frac{\sigma_\varepsilon^2}{lr}}$$

where σ_g^2 is the genotype variance; σ_{gl}^2 is the genotype \times location interaction variance; and σ_ε^2 is the error variance for l locations and r replicates of the genotypes at each site.

The BLUEs for each location were generated and used for GGE biplot analyses. These analyses were carried out using the META-R software (ALVARADO et al., 2017).

The grain yield stability of the hybrids and the suitability of the test environments to select these hybrids were assessed using the multivariate method GGE biplot based on the following model (YAN et al., 2000):

$$Y_{ij} - Y_{.j} = \lambda_1 \xi_{i1} \eta_{1j} + \lambda_2 \xi_{i2} \eta_{2j} + \varepsilon_{ij}$$

where Y_{ij} is the average grain yield of genotype i in environment j ; $Y_{.j}$ is the average of environment j ; λ_1 and λ_2 are the singular values of the first and second principal components, PC1 and PC2, respectively; ξ_{i1} and ξ_{i2} are the scores of genotype i for PC1 and PC2, respectively; η_{1j} and η_{2j} are the scores of environment j for PC1 and PC2, respectively; and ε_{ij} is the error associated with the model.

The GGE biplot analyses were performed considering each trial separated (Early WW, Early DS, Intermediate WW and Intermediate DS) and considering the trials grouped by hybrid maturity (all early maturing trials and all intermediate maturing trials) as well. These analyses were carried out using the GGEBiplots (DUMBLE, 2017) and ggplot2 (WICKHAM, 2009) packages of the R software version 3.4.3 (R CORE TEAM, 2017).

Additionally, the grain yield stability of the hybrids was assessed by Cruz et al. (1989) method. These analyses were performed considering only the grouped trials by hybrid maturity and using means instead of BLUEs. Cruz et al. (1989) is a bi-segmented regression linear method based on the following model:

$$Y_{ij} = \beta_{0i} + \beta_{1i} I_j + \beta_{2i} T(I_j) + \sigma_{ij} + \varepsilon_{ij}$$

where Y_{ij} is the average grain yield of genotype i in location j ; I_j is the environmental index; $T(I_j) = 0$ if $I_j < 0$, $T(I_j) = I_j - I_+$ if $I_j > 0$, where I_+ is the average of the positive I_j indexes; β_{0i} is the general average of genotype i ; β_{1i} is the coefficient of the linear regression associated with I_j ; β_{2i} is the coefficient of linear regression associated with $T(I_j)$; σ_{ij} is the deviation of the linear regression; and ε_{ij} is the experimental error. These analyses were carried out using the Genes software (CRUZ, 2013).

3 RESULTS

The combined analysis of variance across WW and DS environments showed highly significant differences among genotypes for grain yield, plant height, anthesis date and gray leaf spot and northern corn leaf blight. The proportion of genotype variance to GE variance was higher for WW than DS, indicating that GE interaction was severe under drought stress than optimum-moisture conditions. Genotypic variance for grain yield for early and intermediate maturing hybrids trials was 137–150% larger under WW than under DS conditions, respectively. Broad sense heritability estimates for grain yield were slightly higher under WW (0.92 both maturity groups) than under DS (0.73–0.75) conditions (Table 2 and 3).

3.1 Hybrid performance

In the early maturing hybrids evaluated across 23 well-watered locations (hereafter referred as Early WW), grain yields ranged from 4.13 (E53, commercial check) to 7.01 t ha⁻¹ (E11, experimental hybrid). In the Early WW, the top 10 hybrids produced an average of 6.67 t ha⁻¹, which represents an additional of 2.04 t ha⁻¹ compared to the mean of commercial checks and 1.74 t ha⁻¹ compared to the best commercial check (E55 that gave 4.93 t ha⁻¹). The top 10 hybrids on average had 10 cm increase in plant height compared to mean of commercial checks. However, there was no difference between the top 10 hybrids and commercial checks in days to anthesis and in reaction to gray leaf spot and northern corn leaf blight.

While combined across seven drought locations (hereafter referred as Early DS), mean grain yield ranged from 1.75 (E51, commercial check) to 4.31 t ha⁻¹ (E14, experimental hybrid). Among early maturing hybrids, the top 10 hybrids produced 46.8–73.9% higher mean grain yields than the best commercial check under drought. In Early DS, the mean grain yield of the 10 best hybrids was 3.84 t ha⁻¹, which represents an additional yield of 0.66 t ha⁻¹ to the overall mean and 1.42 t ha⁻¹ increase compared to the mean of checks (increase of 59%). The hybrids did not show relevant differences in the other traits (Table 2).

In the intermediate maturing hybrids evaluated across 24 well-watered locations (hereafter referred to Intermediate WW), the mean grain yield of the 10 best hybrids was 6.70 t ha⁻¹, which represented an addition of 0.7 t ha⁻¹ compared to the overall mean of the trial and checks (Table 3). While combined across six drought stress locations (hereafter referred Intermediate DS), the top 10 hybrids produced an average of 3.51 t ha⁻¹, which was a 0.76 t ha⁻¹ higher yield than the overall mean and a 0.93 t ha⁻¹ higher yield than the mean of checks

(increase of 36%). While among intermediate maturing hybrids, the best 10 hybrids produced 6.8–26.1 and 8.5–13.5% higher grain yields than commercial checks under drought and well-watered conditions, respectively.

3.2 Suitability of locations to select hybrids according to the GGE biplot method

Figure 1 shows the discriminativeness and representativeness of testing locations according to the GGE biplot method for the early and intermediate maturing hybrids evaluated under well-watered and drought stress locations (Early WW, Early DS, Intermediate WW and Intermediate DS). The first two components in these biplots accounted between 44.52% and 71.88% of total variability, depending on the trial.

GGE biplot is a method to study the GE interaction based on a multivariate model. This method displays in biplots the genotype effect (G) and the genotype \times environment interaction effect (GE), which are the relevant sources of variation to cultivar evaluation (YAN et al., 2007). GGE biplot is able to assess both genotypes (mean and stability) and environments (discriminateness and representativeness; YAN; TINKER, 2006).

The discriminativeness is the ability of test environments to discriminate genotypes (informative environments). Environments in which there is high standard deviation are more informative, because in them the differences between genotypes are more pronounced, which facilitates the selection process. In the biplots, this ability is measured by the length of the environment vectors. Representativeness of test environments is the ability of a test environment to represent all test environments well. Hence, a representative environment represents well the target region for the hybrids. More representative environments are environments that have, in the biplots, smaller angles with the Average-Environment Axis (AEA), a line that passes through the average environment (end of the arrow) and the biplot origin. An ideal test environment should be very informative and representative. In biplots, a hypothetical ideal test environment is represented in the center of the concentric circles. Therefore, the best environments for selecting well adapted cultivars are the closest to this ideal test environment (YAN; TINKER, 2006).

Table 2 – Grain yield (GY), plant height (PH), days to anthesis (DA), gray leaf spot (GLS) and northern corn leaf blight (NCLB) of the 10 best hybrids and checks in all early maturity trials (Early WW an Early DS).

Hybrid	No.	Well-watered conditions (Early WW)					Hybrid	No.	Drought stress conditions (Early DS)				
		GY	PH	DA	GLS	NCLB			GY	PH	DA	GLS	NCLB
<i>Top 10</i>		t ha ⁻¹	Cm	days	--- 1-5 score ---	<i>Top 10</i>		t ha ⁻¹	cm	days	--- 1-5 score ---		
CKDHH170002	E11	7.01	237	67.9	2.02	2.15	CKDHH170028	E14	4.31	236	69.5	0.99	2.39
CKDHH170048	E23	6.85	239	67.7	1.98	2.75	CKDHH170148	E35	4.04	237	69.9	1.30	2.81
CKDHH170028	E14	6.84	239	67.8	1.97	2.55	WM5126	E2	4.00	189	67.7	1.07	2.43
CKDHH170029	E15	6.82	250	68.2	2.00	2.46	WM5312	E8	3.86	210	68.5	1.33	2.12
WM5126	E2	6.67	200	65.9	2.05	2.15	CKDHH170150	E37	3.85	242	69.6	1.14	2.63
CKDH160004	E41	6.53	235	68.0	1.98	2.21	WM5307	E4	3.68	212	70.9	1.10	2.13
CKDHH170075	E31	6.51	238	66.9	2.03	2.30	CKDHH170149	E36	3.68	225	70.8	1.42	2.44
CKDHH170027	E13	6.50	235	67.7	1.99	2.47	CKDHH170146	E33	3.68	238	69.8	1.03	2.45
WM5307	E4	6.48	211	69.2	1.82	2.21	CKDHH170029	E15	3.65	244	70.0	1.04	2.38
CKDHH170071	E27	6.47	248	69.4	1.96	2.66	CKDHH170145	E32	3.64	235	70.9	1.13	2.80
Mean of the best 10 hybrids		6.67	233.30	67.86	1.98	2.39	Mean of the best 10 hybrids		3.84	226.84	69.76	1.15	2.46
<i>Checks</i>							<i>Checks</i>						
Local Check	E55	4.96	231	69.1	1.87	2.24	Local Check	E55	3.31	232	71.8	1.14	1.80
Duma 43	E52	4.93	228	64.3	2.17	2.20	Duma 43	E52	2.52	232	65.8	1.18	2.44
PAN4M-19	E54	4.84	209	66.2	2.14	2.71	PAN4M-19	E54	2.48	205	66.8	1.55	2.82
DH04	E51	4.29	222	68.4	2.10	2.49	DK 8031	E53	2.04	228	69.8	0.99	2.12
DK 8031	E53	4.13	221	67.2	2.09	2.29	DH04	E51	1.75	225	69.8	1.21	3.19
Mean of the checks		4.63	222.23	67.04	2.07	2.39	Mean of the checks		2.42	224.63	68.80	1.21	2.47
Overall mean		5.90	224.37	67.52	2.01	2.40	Overall mean		3.18	221.24	68.95	1.27	2.54
Broad-sense heritability		0.92	0.97	0.93	0.00	0.32	Broad-sense heritability		0.75	0.91	0.88	0.50	0.64
Genotype variance		0.55	204.36	2.65	0.00	0.02	Genotype variance		0.22	222.35	3.52	0.03	0.08
Genotype × location variance		0.50	41.89	2.05	0.14	0.18	Genotype × location variance		0.21	0.00	1.36	0.05	0.09
Residual variance		1.21	161.95	2.45	0.12	0.20	Residual variance		0.59	168.73	4.03	0.10	0.17
LSD		0.43	4.94	0.86	0.00	0.24	LSD		0.48	9.60	1.35	0.26	0.33
CV		18.61	5.67	2.32	17.48	18.79	CV		24.22	5.87	2.91	24.32	16.18

Table 3 – Grain yield (GY), plant height (PH), days to anthesis (DA), gray leaf spot (GLS) and northern corn leaf blight (NCLB) of the 10 best hybrids and checks in all intermediate maturity trials (Intermediate WW and Intermediate DS).

Hybrid	No.	Well-watered conditions (Intermediate WW)					Hybrid	No.	Drought stress conditions (Intermediate DS)						
		GY	PH	DA	GLS	NCLB			GY	PH	DA	GLS	NCLB		
<i>Top 10</i>		t ha ⁻¹	Cm	days	---	1-5 score	---	<i>Top 10</i>		t ha ⁻¹	cm	days	---	1-5 score	---
CKH160125	I53	6.82	236	74.7	2.24	1.79	WM5330	I2	3.81	197	70.8	2.24	1.75		
CKH160101	I49	6.80	245	73.8	2.19	1.82	CKDHH170059	I41	3.74	229	69.2	0.99	2.06		
CKDHH170018	I21	6.79	243	71.1	1.95	2.04	CKDHH170018	I21	3.74	220	69.5	1.26	2.42		
CKDHH170021	I23	6.73	233	71.3	1.90	2.02	CKDHH170032	I27	3.55	210	68.4	1.12	2.22		
CKDHH170054	I38	6.71	243	71.7	1.78	2.09	WM5404	I7	3.50	178	68.8	1.51	2.15		
CKDHH170013	I18	6.70	230	71.0	1.91	2.04	WM5460	I4	3.45	200	68.8	1.37	2.46		
CKDHH170049	I35	6.69	244	70.9	2.00	1.66	WM5310	I10	3.43	195	69.5	1.01	2.47		
WM5497	I3	6.66	218	71.1	2.40	2.39	CKDHH170011	I17	3.34	203	70.3	0.99	2.48		
CKDHH170059	I41	6.57	255	70.5	2.00	1.90	WM5465	I1	3.28	193	68.1	1.37	2.18		
CKDHH170008	I15	6.52	240	72.8	2.07	2.11	WM5497	I3	3.23	194	70.6	1.38	2.34		
Mean of the best 10 hybrids		6.70	238.86	71.89	2.04	1.99	Mean of the best 10 hybrids		3.51	202.03	69.42	1.33	2.25		
<i>Checks</i>							<i>Checks</i>								
WE3106	I60	6.61	243	72.8	1.92	1.97	WE3106	I60	3.05	223	72.2	1.13	2.49		
WE1101	I59	6.34	231	70.6	2.15	1.87	WH505	I63	3.02	224	72.0	1.12	2.20		
CKH10717	I61	6.28	230	72.3	2.13	1.79	WE1101	I59	2.78	198	70.0	1.12	1.75		
P30G19	I64	6.01	240	70.6	1.97	1.61	P30G19	I64	2.70	219	69.5	1.00	2.43		
WH505	I63	5.98	245	73.6	1.85	1.86	CKH10717	I61	2.61	199	71.2	1.36	2.30		
Local Check	I65	5.60	238	72.5	2.10	2.08	Local Check	I65	2.03	199	73.1	1.00	2.01		
H516	I62	5.15	251	73.5	2.13	1.92	H516	I62	1.86	223	72.8	1.13	2.24		
Mean of the checks		6.00	239.85	72.28	2.03	1.87	Mean of the checks		2.58	212.29	71.55	1.12	2.20		
Overall mean		6.02	232.63	71.55	2.05	1.99	Overall mean		2.75	204.39	70.80	1.18	2.26		
Broad-sense heritability		0.92	0.96	0.95	0.31	0.66	Broad-sense heritability		0.73	0.79	0.87	0.13	0.47		
Genotype variance		0.45	124.27	3.41	0.01	0.03	Genotype variance		0.19	141.60	2.43	0.01	0.03		
Genotype × location variance		0.35	28.49	1.74	0.08	0.06	Genotype × location variance		0.16	0.00	0.71	0.04	0.00		
Residual variance		1.04	180.49	3.41	0.13	0.12	Residual variance		0.53	219.94	3.07	0.07	0.15		
LSD		0.40	5.08	0.86	0.15	0.19	LSD		0.47	11.57	1.20	0.14	0.27		
CV		16.99	5.78	2.58	17.45	17.53	CV		26.49	7.26	2.48	22.16	16.94		

In the Early WW trial, Wambugu, Isinya, ADC Nai and Kakamega had longer vectors than other locations indicating that they were the best informative locations for genetic differentiation of hybrids. The most non-discriminatory locations were Mlangarini, Mbeere, Naivasha and Mtwapa as they had short environment vectors (Fig. 1A). Kakamega and Kirinyaga 2 were the most representative locations as they had smaller angles with the Average-Environment Axis (AEA; Fig. 1A). Overall, Kakamega, Kirinyaga 2 and Bulindi were the ideal testing locations for evaluating hybrids as they had long environmental vectors (informativeness) and smaller angle with AEA (representativeness). On the other hand, Kabuku 2 was the least suitable environment for selecting hybrids because it had large angle with AEA (less representativeness).

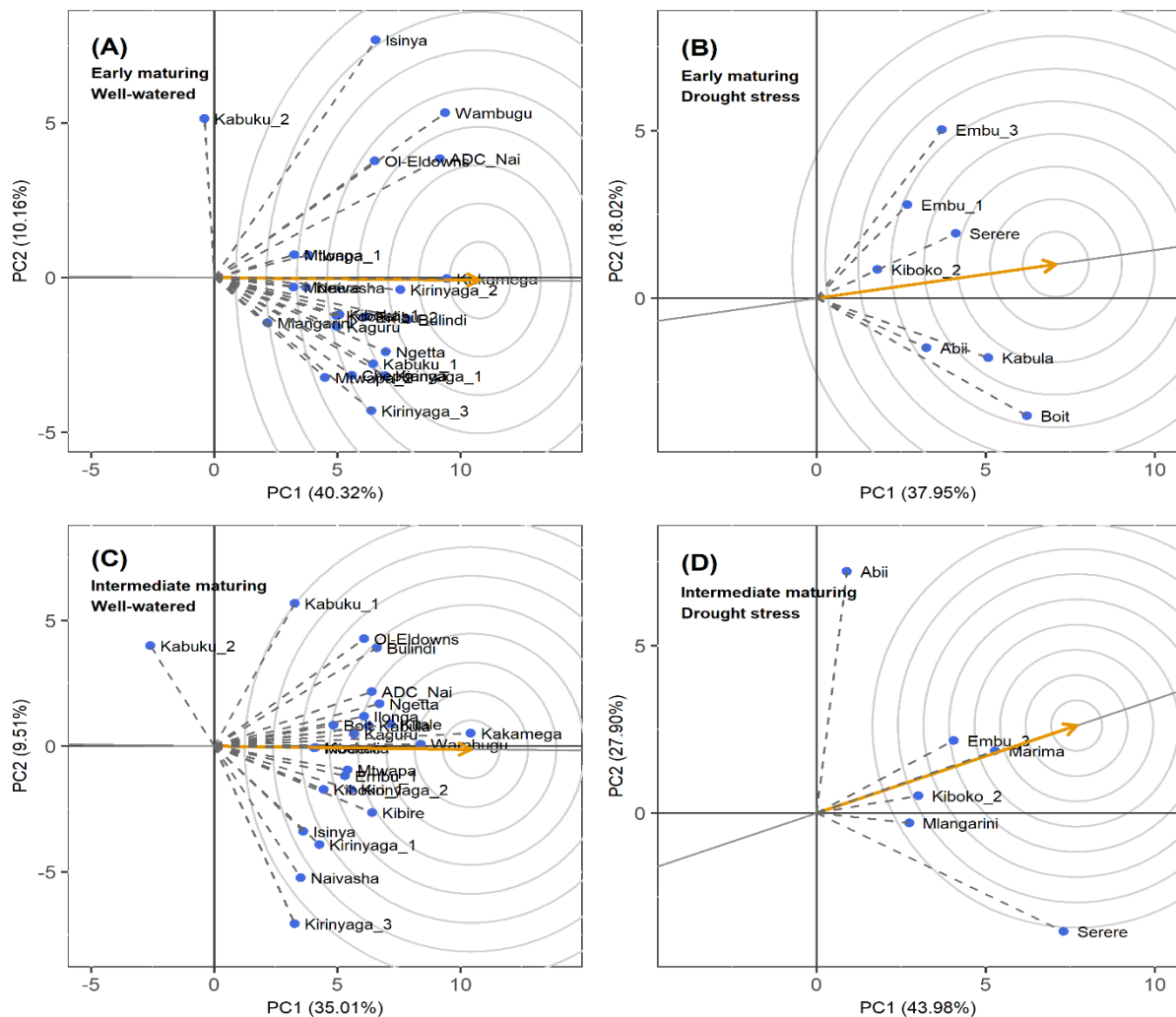


Fig. 1 – Discriminativeness and representativeness of test environments according to the GGE biplot method for maize trials in Eastern Africa. (A) Early maturity hybrids in well-watered conditions. (B) Early maturity hybrids in drought stress conditions. (C) Intermediate maturity hybrids in well-watered conditions. (D) Intermediate maturity hybrids in drought stress conditions.

In the Early DS trials, Embu 3, Boit and Kabula were the most informative locations as they had long environmental vectors and Serere and Kiboko 2 were the most representative as they had small angle with AEA (Fig. 1B). In this trial, Serere and Kabula were close to the ideal location to assess the hybrids as they had longer environmental vectors (informative) and small angle with AEA (representativeness). The suitability for selecting hybrids of the other locations was similar.

In the Intermediate WW trial, the most informative locations were Kakamega, Wambugu, Kirinyaga 3, Bulindi and Ol-Eldowns as they had long environmental vectors. The most representative locations were Wambugu, Kochalia, Mbeere and Kakamega as they had very small angle with AEA (Fig. 1C). In this trial Wambugu and Kakamega were the ideal locations to evaluate the hybrids as they had very good discriminatory ability (long environmental vectors) and representativeness (low angle with AEA). On the other hand, Kabuku 2, Kabuku 1 and Kirinyaga 3 were the least suitable for selecting hybrids in this trial because they showed a very poor representativeness.

In the Intermediate DS, the most informative locations were Serere and Abii the most representative was Marima (Fig. 1D). In this trial, Marima was the best location to assess the hybrids because it showed good discriminativeness and high representativeness. Abii and Serere were the least suitable for selecting hybrids because they showed a very poor representativeness.

Considering all well-watered trials, Kakamega was the best location for selecting the hybrids due to its both high discriminativeness and high representativeness in Early WW and Intermediate WW trials. In these trials, Kabuku 2 was the poorest testing location because it showed a very poor representativeness.

3.3 Stability of hybrids according to the GGE biplot method

Figure 2 shows that a high variation was found in mean yield and stability across environments. The GGE biplot showed that 60% the early maturing hybrids had above average performance across WW environments (Fig. 2A). Hybrids E23, E15 and E12 were closest to the ideal genotype in the Early WW trial (Fig. 2A). Although E11 had very high yield (7.01 t ha⁻¹; Table 2), its behavior was very unstable (located far from 0 for principal component 2). Therefore, it was far from the ideal genotype. On the other hand, E12 had a lower yield (6.39 t ha⁻¹) than the top 10 highest-yielding hybrids, but it showed very high stability (close to 0 for

principal component 2) and it was close to the ideal genotype. All commercial checks (E51, E52, E53, E54 and E55) had negative PC1 scores, implying that these hybrids were below average performance across WW locations.

In the Early DS trial, E4, E37 and E2 were closest to the ideal genotype (Fig. 2B). These hybrids were also among the top 10 performing hybrids for grain yield under drought condition (Table 2). Hybrids E51, E52, E53 and E54 (commercial checks) had negative PC1 scores, implying that these hybrids were below average performance across DS locations.

In the Intermediate WW trial, GGE biplot had identified I8, I35 and I15 close to the ideal genotypes (Fig. 2C). The three hybrids also among the top performing hybrids across 24 WW locations (Table 3). Two of the commercial check hybrids (I62 and I65) had negative PC1 scores suggesting below average performance across 24 WW locations. In the Intermediate DS the closest genotypes to the ideal genotype were I41, I21, I7, I10 and I4 (Fig. 2D). All the five hybrids also among the top best performing for grain yield across drought locations. Four of the commercial hybrids (I61, I62, I64 and I65) had below average performers as they had negative PC1 scores.

3.4 Stability of hybrids according to the Cruz et al. (1989) method

The Cruz et al. (1989) method is a bi-segmented regression method which is able to identify genotypes adapted simultaneously to favorable and unfavorable locations. Then, the ideal genotype must be poorly responsive to unfavorable conditions ($\beta_1 < 1$; adaptability to unfavorable environments), highly responsive to favorable conditions ($\beta_1 + \beta_2 > 1$; adaptability to favorable environments), stable ($\sigma_{di}^2 = 0$; stability) and highly productive (great β_0 ; CRUZ et al., 2012). In practice, the ideal genotype will have big advantages under favorable condition and give a reasonable performance under unfavorable conditions.

According to the Cruz et al. (1989) method, there were 12 favorable locations in early maturity trials (I₊; locations where the mean yield was higher than overall mean yield), all of which were well-watered (data not shown). Also, there were 18 unfavorable locations (I₋; locations where the mean yield was lower than overall mean yield), of which 11 were well-watered and seven were in drought stress conditions.

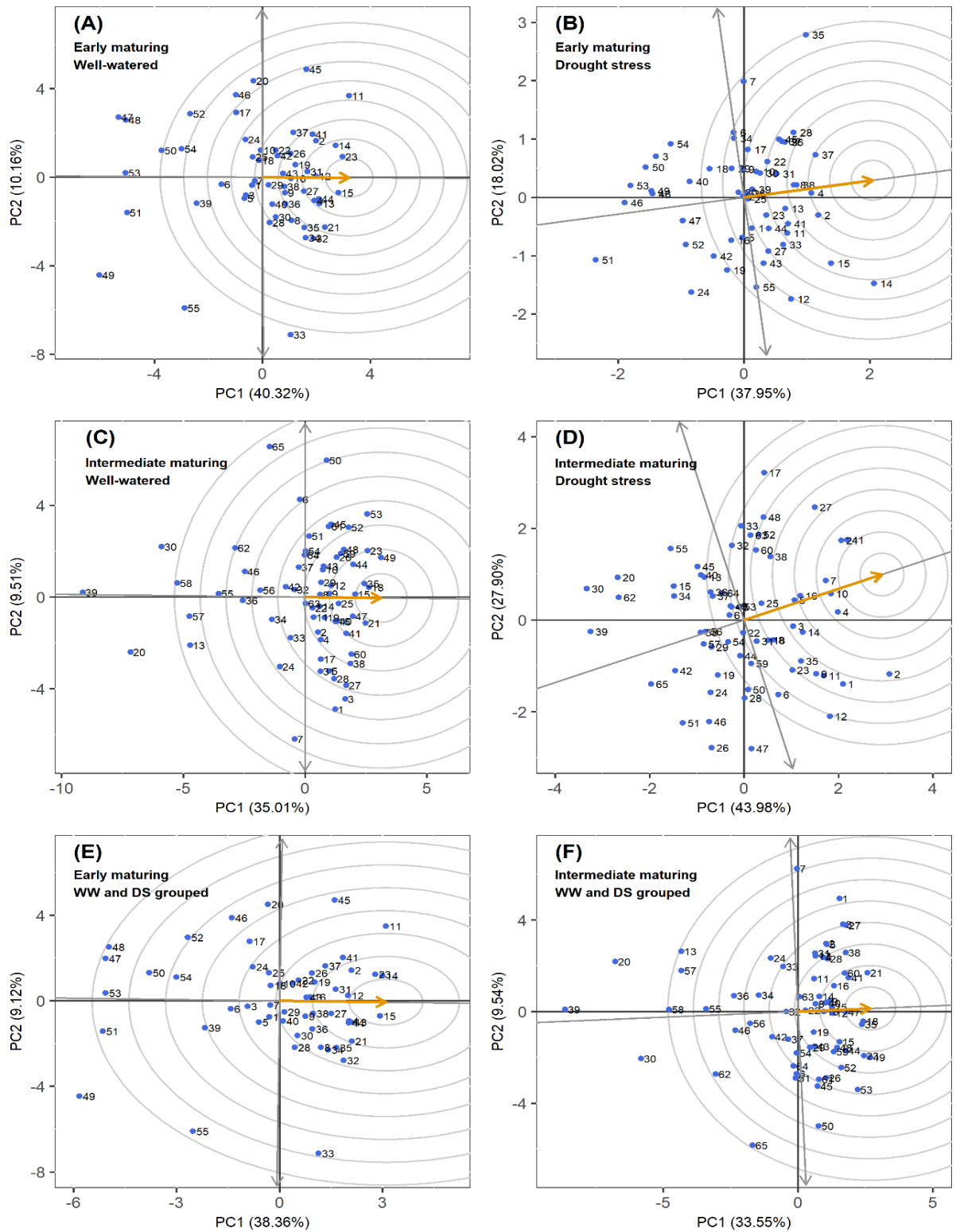


Fig. 2 – Ranking of hybrids in relation to the ideal hybrid based on their mean and stability according to the GGE biplot method for maize trials in Eastern Africa. (A) Early maturity hybrids in well-watered conditions. (B) Early maturity hybrids in drought stress conditions. (C) Intermediate maturity hybrids in well-watered conditions. (D) Intermediate maturity hybrids in drought stress conditions. (E) Early maturity hybrids in all locations (well-watered and drought stress conditions). (F) Intermediate maturity hybrids in all locations (well-watered and drought stress conditions).

In the early maturity trials, the best hybrids were E2 and E14 (Table 4). The hybrid E14 showed great high mean yield in both unfavorable and favorable locations, good adaptability to unfavorable locations ($\beta_1 = 1$), excellent adaptability to favorable locations ($\beta_1 + \beta_2 > 1$) and a high stability ($\sigma_{di}^2 = 0$). Hybrid E2 showed a high mean yield in both unfavorable and favorable locations as well, good adaptability in both unfavorable and favorable locations (β_1 and $\beta_1 + \beta_2 = 1$) and a high stability ($\sigma_{di}^2 = 0$). On the other hand, hybrids E11 and E15 produced high mean yield but they were unstable.

Table 4 – Parameters of adaptability and stability according to the method proposed by Cruz et al. (1989) of the 10 highest-ranking maize hybrids (top 10) in terms of yield for all early maturity trials and for all intermediate maturity trials.

Hybrid (top 10)	No.	Mean GY (t ha ⁻¹)			β_1	$\beta_1 + \beta_2$	σ_{di}^2	R ² (%)
		Overall	I-	I+				
--- Early maturity ---								
CKDHH170028	E14	6.21	5.03	7.99	1.03 ^{ns}	1.94*	1.03 ^{ns}	88.94
CKDHH170002	E11	6.12	4.59	8.41	1.29*	1.99*	2.26*	83.91
WM5126	E2	6.08	4.92	7.83	0.99 ^{ns}	1.40 ^{ns}	1.90 ^{ns}	77.71
CKDHH170029	E15	6.08	4.90	7.84	1.11 ^{ns}	0.95 ^{ns}	2.81*	72.37
CKDHH170048	E23	6.00	4.57	8.16	1.24*	1.05 ^{ns}	1.56 ^{ns}	85.42
CKDH160004	E41	5.84	4.42	7.99	1.17 ^{ns}	1.53 ^{ns}	2.09 ^{ns}	81.28
CKDHH170148	E35	5.84	4.55	7.78	0.98 ^{ns}	0.03*	3.95*	57.03
WM5307	E4	5.84	4.42	7.96	1.16 ^{ns}	1.18 ^{ns}	2.39*	77.72
CKDHH170145	E32	5.83	4.65	7.59	0.99 ^{ns}	0.63 ^{ns}	1.36 ^{ns}	80.54
CKDHH170075	E31	5.80	4.61	7.58	1.04 ^{ns}	0.99 ^{ns}	1.64 ^{ns}	79.99
--- Intermediate maturity ---								
CKH160125	I53	6.14	4.62	7.88	1.16 ^{ns}	1.25 ^{ns}	2.42*	81.82
CKDHH170018	I21	6.03	5.01	7.19	0.82 ^{ns}	1.25 ^{ns}	1.78 ^{ns}	78.69
CKDHH170049	I35	5.98	4.69	7.47	0.98 ^{ns}	1.02 ^{ns}	1.68 ^{ns}	81.83
CKDHH170059	I41	5.98	4.71	7.42	0.92 ^{ns}	1.31 ^{ns}	1.25 ^{ns}	86.32
CKH160101	I49	5.97	4.40	7.78	1.22*	1.13 ^{ns}	2.73*	80.61
CKDHH170054	I38	5.93	4.55	7.49	1.03 ^{ns}	0.84 ^{ns}	2.09 ^{ns}	78.75
CKDHH170013	I18	5.89	4.13	7.91	1.21*	1.22 ^{ns}	1.68 ^{ns}	87.21
WE3106	I60	5.88	4.65	7.29	0.99 ^{ns}	1.19 ^{ns}	1.90 ^{ns}	81.32
WM5497	I3	5.86	4.40	7.53	1.02 ^{ns}	1.11 ^{ns}	2.54*	76.72
CKDHH170021	I23	5.86	4.49	7.42	1.02 ^{ns}	1.27 ^{ns}	1.48 ^{ns}	85.92

I-: mean of the unfavorable locations for each hybrid; I+: mean of the favorable locations for each hybrid; *: significant different of one for β_1 and $\beta_1 + \beta_2$ and of zero for σ_{di}^2 by t test at 5% probability. ^{ns}: not significant by the same tests.

In the intermediate maturity trials, there were 14 favorable locations, all of which were well-watered (data not shown). Also, there were 16 unfavorable locations, of which 10 were well-watered and six were in drought-stressed conditions. In these trials, the best genotypes

were I21, I35 and I41 because they showed a high mean yield in both unfavorable and favorable locations, a good adaptability in both unfavorable and favorable locations (β_1 and $\beta_1+\beta_2 = 1$) and a high stability ($\sigma_{di}^2 = 0$). Hybrid I47, listed by GGE biplot method as one of the best, showed good values of adaptability ($\beta_1 = 1$ and $\beta_1+\beta_2 > 1$) and stability ($\sigma_{di}^2 = 0$) according to the Cruz et al. (1989) method (data not shown), but its yield was not very high (5.73 t ha⁻¹). Therefore, it was not listed as one of the best according this method.

4 DISCUSSION

Identification of high yielding and stable performance of maize hybrids in multi-environment trials is important. In this study, a total of 120 hybrids were evaluated across 24 well-watered locations and seven drought stress locations in Kenya, Uganda and Tanzania and different statistical analysis were applied to identify hybrids that are adapted to different management conditions. The average grain yield of the top 10 hybrids was higher than all checks in all trials. Among early maturing hybrids, the top 10 hybrids produced 46.8–73.9 and 31.2–42.1% higher mean grain yields than the best commercial check under drought and well-watered conditions, respectively. While among intermediate maturing hybrids, the best 10 hybrids produced 6.8–26.1 and 8.5–13.5% higher grain yields than the best commercial check under drought and well-watered conditions, respectively. These results are in agreement with previous studies conducted to develop drought-tolerant maize varieties in Eastern Africa (BEYENE et al., 2013; ERTIRO et al., 2017; SSERUMAGA et al., 2018).

In this study, the mean of the top 10 experimental hybrids across drought locations were 3.84 and 3.51 t ha⁻¹ among early and intermediate maturing hybrid trials, respectively. These yields are considered to be high for Eastern Africa, where the overall mean is 1.75 t ha⁻¹ (FAOSTAT, 2016). The top hybrids identified in the study could be recommended for commercial production in Eastern Africa where drought is the major problem in Eastern and Southern Africa.

In addition, it was possible to identify genotypes with good performance in both well-watered and drought stress conditions. For example, the genotype E14 had high grain yield in both Early WW and Early DS trials.

In our study, drought stress reduced yield by 46% in early maturing hybrids and by 54% in intermediate maturing hybrids trials. These results were within the ranges previously reported

in maize by Cairns et al. (2012), Beyene et al. (2013) and Sserumaga et al. (2018), who reported decreases of 76%, 58% and 11% due to drought stress conditions, respectively.

These wide variations in yield decrease are due to the tolerance of hybrids, the plant growth stage during the drought stress and the severity and duration of the drought stress (CAIRNS et al., 2013; CAIRNS; PRASANNA, 2018). Edmeades et al. (2004) reported that the phenotypic correlation between elite hybrid yields under stress versus under well-watered conditions declined when yield reductions reached 50%. They suggested that stress adaptive mechanisms were not exposed until yields had been reduced by 30-50% under stress compared to well-watered condition. In our study, average mean yields of early maturing and intermediate maturing trials under drought stress reduced to 46-56% of the average yield of hybrids under well-watered conditions in range yield reduction suggested by Edmeades et al. (2004). Therefore, the best 10 DH testcrosses identified in these studies from each population might have some adaptive traits for drought tolerance and could be utilize in maize breeding in Eastern Africa as source of drought tolerance.

The mean grain yield for early maturing and intermediate maturing hybrids was similar under well-watered condition but different under drought stress condition. The mean grain yield in Intermediate DS trial was 2.57 t ha⁻¹ which is lower than in Early DS trial (3.18 t ha⁻¹; Table 2 and 3) indicating that intermediate maturity hybrids were more adversely affected by drought. Early maturity is an important strategy to reduce the effect of late season drought stress as they have a capacity to escape drought before the onset of drought (BADU-APRAKU et al., 2016).

Heritability for grain yield for early and intermediate maturing hybrids were lower in drought stress conditions than well-watered conditions (Table 2 and 3). Our result was consistent with in previous studies in maize (ERTIRO et al., 2017; SSERUMAGA et al., 2018). The lower heritability of grain yield in drought stress trials indicates that secondary traits with higher heritability can improve the selection response (LU et al., 2011).

In maize breeding program, most of the effort is spent evaluating inbreds by crossing them to a tester, and extensively evaluated in replicated multi-location trials. Therefore, it is important to identify relevant differences among test environments regarding discriminativeness and representativeness. This information is useful make decisions which locations to keep or discard in the following years. In the well-watered trials, the best and worst locations for selecting the hybrids were similar between early and intermediate maturity hybrids. For well-watered locations, Kakamega was the best location and Kabuku was the least suitable. However, considering all drought stress trials, the best locations were highly dependent of the

hybrid maturity. For example, Serere was one of the best locations in Early DS trial and one of the poorest in Intermediate DS trial. Besides, in this study, most of the high informative locations (Embu 3 in Early DS and Abii and Serere in Intermediate DS) were the least representative indicating that the difficulty selecting the best locations for drought screening trial and mainly depend on the one set of the rains. This is one of the reasons that CIMMYT introduced the concept of in managed drought stress experiments in SSA (BANZIGER et al., 2000).

In this study, GGE biplot clearly identified hybrids adapted to well-watered drought stress and both conditions. For example, hybrid E12 (early maturing), and hybrid I15 (intermediate maturing) were high yielding and well adapted under well-watered locations while hybrid E37 (early maturing) and hybrid I7 (intermediate maturing) were high yielding and stable for drought stress locations. High mean yield and stability under drought stress conditions is an important selection criteria to ensure good harvests in Eastern Africa (ARAUS et al., 2008; WITT et al., 2012; BADU-APRAKU et al., 2016).

However, crop production in SSA is mostly rain-dependent, and grain production is vulnerable to the fluctuation to rainfall onsets. Therefore, it is important to develop hybrids that can withstand drought stress throughout the growing season, but also have no yield penalty under optimum conditions. Thus, hybrids with these characteristics allow greater food security. According to the GGE biplot, some hybrids with this characteristic were found in combined trials analyses (Fig. 2E and 2F), as the early maturity hybrid E14 and the intermediate maturity hybrid I35.

In addition, the Cruz et al. (1989) can be a good alternative to identify suitable genotypes in studies with both well-watered and drought-stressed conditions. As previously stated, this method is able to identify hybrids stable and well-adapted simultaneously to favorable (well-watered conditions) and unfavorable locations (drought stress conditions). This ideal genotype should have high β_0 (high mean yield), $\sigma_{di}^2 = 0$, (high stability), $\beta_1 < 1$ (adaptability to unfavorable environments) and $\beta_1 + \beta_2 > 1$ (adaptability to favorable environments; CRUZ et al., 2012).

Genotypes close to the ideal genotype were found such as E14 in early trials. This genotype showed high overall yield (6.21 t ha^{-1}), high stability ($\sigma_{di}^2 = 0$), high responsiveness in favorable conditions ($\beta_1 + \beta_2 > 1$) and medium responsiveness in unfavorable conditions ($\beta_1 = 1$).

Cruz et al. (1989) method is more laborious to identify the best genotypes than the GGE biplot method due to its large number of parameters, but allows for more details in the genotype analysis. For that reason, unlike GGE biplot, the Cruz et al. (1989) method allows to identify that the early maturing hybrid E2 is a good genotype for a wide range of environments, because it showed high yield, high stability and good responsiveness in both unfavorable and favorable conditions (β_1 and $\beta_1+\beta_2 = 1$). Although E2 was not classified as one of the best genotypes by GGE biplot, it was reasonably close to the ideal genotype in the biplot (the center of concentric circle in the graph in Fig. 2E). In addition, the genotypes E12 and I47 were well classified by GGE biplot method in early maturity and intermediate maturity trials, respectively, however they did not were in the top 10 highest-yielding hybrids. Additionally, these genotypes had not performed well in drought stress trials. They were sound classified by GGE biplot in combined analyses because there were more well-watered locations than drought stress locations. Therefore, the well-watered locations had more weight in the choice. Although these genotypes were stable, they were not considered in the best genotypes by Cruz et al. (1989) due to the low yield.

The use of complementary statistics to study the stability of genotypes can increase the confidence in the selection process in plant breeding (BORNHOFEN et al., 2017). Silva and Duarte (2006) reported low correlation between Cruz et al. (1989) and AMMI, a multivariate method similar to GGE biplot. Besides, Cruz et al. (1989) and GGE biplot have some different advantages. The Cruz et al. (1989) method has adaptability parameters (β_1 and $\beta_1+\beta_2$) to assess the genotype responsiveness to environmental differences. The GGE biplot method considers only the relevant variation sources in the GE interaction study, that is, the genotype (G) and the GE interaction (GE), and assess simultaneously the genotypes (mean and stability) and the test environments (discriminability and representativeness; YAN; TINKER, 2006). Therefore, GGE biplot and Cruz et al. (1989) can be considered complementary methods. In the present study, using both methods it was possible to identify confidently the early maturity hybrids E14 (CKDHH170028), E2 (WM5126) and E23 (CKDHH170048) and the intermediate maturity hybrids I35 (CKDHH170049), I18 (CKDHH170013), I21 (CKDHH170018) and I41 (CKDHH170059) as well adapted to both well-watered and drought stress conditions.

5 CONCLUSIONS

This study showed increment of 12% to 59%, depending on the hybrid maturity and trial conditions (well-watered or drought stress), in grain yield of the highest-yielding hybrids in comparison to commercial checks. These increments were observed mainly in drought stress trials. Besides, suitable and unsuitable locations to select hybrids in Eastern Africa target region were found. Considering well-watered conditions, Kakamega was the best location to select hybrids and Kabuku was the worst location. However, the best and worst locations to select hybrids to drought stress conditions were highly dependent on hybrid maturity. This study also identified hybrids well-adapted to well-watered conditions or drought stress conditions and hybrids well-adapted simultaneously to both conditions, such as the early maturity hybrids CKDHH170028 (E14) and WM5126 (E2) and the intermediate maturity hybrids CKDHH170018 (I21) and CKDHH170059 (I41).

REFERENCES

- ALVARADO, G.; LÓPEZ, M.; VARGAS, M.; PACHECO, A.; RODRÍGUEZ, F.; BURGUEÑO, J.; CROSSA, J. **META-R (Multi Environment Trial Analysis with R for Windows) Version 6.01**, hdl:11529/10201, CIMMYT Research Data & Software Repository Network, V20, 2017.
- ARAUS, J. L.; SLAFER, G. A.; ROYO, C.; SERRET, M. D. Breeding for yield potential and stress adaptation in cereals. **Critical Reviews in Plant Sciences**, 27 (2008) 377-412.
- BADU-APRAKU, B.; FAKOREDE, M. A. B.; OYEKUNLE, M.; AKINWALE, R. O. Selection of extra-early maize inbreds under low N and drought at flowering and grain-filling for hybrid production. **Maydica**, 56 (2011) 1721-1735.
- BÄNZIGER, M.; EDMÉADES, G. O.; BECK, D.; BELLON, M. **Breeding for drought and nitrogen stress tolerance in maize: from theory to practice**, first ed., CIMMYT, Mexico, 2000.
- BEYENE, Y.; MUGO, S.; SEMAGN, K.; ASEA, G.; TREVISAN, W.; TAREKEGNE, A.; TEFERA, T.; GETHI, J.; KIULA, B.; GAKUNGA, J.; KARAYA, H.; CHAVANGI, A. Genetic distance among double haploid maize lines and their testcross performance under drought stress and non-stress conditions. **Euphytica**, 192 (2013) 379-392.
- BEYENE, Y.; SEMAGN, K.; CROSSA, J.; MUGO, S.; ATLIN, G. N.; TAREKEGNE, A.; MEISEL, B.; SEHABIAGUE, P.; VIVEK, B. S.; OIKEH, S.; ALVARADO, G.; MACHIDA, L.; OLSEN, M.; PRASANNA, B. M.; BÄNZIGER M. Improving maize grain yield under drought stress and non-stress environments in Sub-Saharan Africa using marker-assisted recurrent selection. **Crop Science**, 56 (2016) 344-353.
- BEYENE, Y.; GOWDA, M.; SURESH, L. M.; MUGO, S.; OLSEN, M.; OIKEH, S. O.; JUMA, C.; TAREKEGNE, A.; PRASANNA, B. M. Genetic analysis of tropical maize inbred lines for resistance to maize lethal necrosis disease. **Euphytica**, 213 (2017) 1-13.

BORNHOFEN, E.; BENIN, G.; STORCK, L.; WOYANN, L. G.; DUARTE, T.; STOCO, M. G.; MARCHIORO, S. V. Statistical methods to study adaptability and stability of wheat genotypes. **Bragantia**, 76 (2017) 1-10.

CAIRNS, J. E.; SANCHEZ, C.; VARGAS, M.; ORDOÑEZ, R.; ARAUS, J. L. Dissecting maize productivity: ideotypes associated with grain yield under drought stress and well-watered conditions. **Journal of Integrative Plant Biology**, 54 (2012) 1007-1020.

CAIRNS, J. E.; HELLIN, J.; SONDER, K.; ARAUS, J. L.; MACROBERT, J. F.; THIERFELDER, C.; PRASANNA, B. M. Adapting maize production to climate change in sub-Saharan Africa. **Food Security**, 5 (2013) 345-360.

CAIRNS, J. E.; PRASANNA, B. M. Developing and deploying climate-resilient maize varieties in the developing world. **Current Opinion in Plant Biology**, 45 (2018) 1-5.

COUTO, M. F.; NASCIMENTO, M.; AMARAL JR., A. T.; SILVA, F. F.; PIO VIANA, A.; VIVAS, M. Eberhart and Russel's Bayesian Method in the selection of popcorn cultivars. **Crop Science**, 55 (2015) 571-577.

CROSSA, J. From genotype x environment interaction to gene x environment interaction. **Current Genomics**, 13 (2012) 225-244.

CRUZ, C. D.; TORRES, R. A.; VENCOVSKY, R. An alternative approach to the stability analysis proposed by Silva e Barreto. **Revista Brasileira de Genética**, 12 (1989) 567-580.

CRUZ, C. D.; REGAZZI, A. J.; CARNEIRO, P. C. S. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. v.1. 4 ed. Viçosa: Editora UFV, 2012. 514p.

CRUZ, C. D. GENES - a software package for analysis in experimental statistics and quantitative genetics. **Acta Scientiarum. Agronomy**, 35 (2013) 271-276.

DUMBLE, S. **GGEbiplots: GGE biplots with 'ggplot2'**. 2017. Available in: <<https://CRAN.R-project.org/package=GGEbiplots>>. Access in: Aug 15th, 2018.

EBERHART, S. A.; RUSSELL, W. A. Stability parameters for comparing varieties. **Crop Science**, 6 (1966) 36-40.

EDMEADES, G. O.; MCMASTER, G. S.; WHITE, J. W.; CAMPOS, H. Genomics and the physiologist: bridging the gap between genes and crop response. **Field Crops Research**, 90 (2004) 1-18.

ERTIRO, B. T.; BEYENE, Y.; DAS, B.; MUGO, S.; OLSEN, M.; OIKEH, S.; JUMA, C.; LABUSCHAGNE, M.; PRASANNA, B. M. Combining ability and testcross performance of drought-tolerant maize inbred lines under stress and non-stress environments in Kenya. **Plant Breeding**, 136 (2017) 197-205.

FAOSTAT. **FAO Statistical Database**. 2016. Available in: <<http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>>. Access in: Oct. 19th, 2018.

FINLAY, K. W.; WILKINSON, G. N. The analysis of adaptation in a plant breeding programme. **Australian Journal of Agricultural Research**, 14 (1963) 742-754.

FISHER, M.; ABATE, T.; LUNDUKA, R. W.; ASNAKE, W.; ALEMAYEHU, Y.; MADULU, R. B. Drought tolerant maize for farmer adaptation to drought in sub-Saharan Africa: determinants of adoption in eastern and southern Africa. **Climate Change**, 133 (2015) 283-299.

FLORES, J. L. T.; GARCÍA, B. M.; PRASANNA, B. M.; ALVARADO, G.; SAN VICENTE, F. M.; CROSSA, J. Grain yield and stability of White early maize hybrids in the highland valleys of Mexico, **Crop Science**, 57 (2017) 3002-3015.

HUEHN, M. Nonparametric measures of phenotypic stability. Part 1: Theory. **Euphytica**, 47 (1990) 189-194.

KANG, M. S. Genotype-environment interaction: progress and prospects. In: ____ (Ed.), **Quantitative genetics, genomics and plant breeding**. CAB International, Wallingford, 2002, p. 221-243.

LIN, C. S.; BINNS, M. R. A superiority measure of cultivar performance for cultivar x location data. **Canadian Journal of Plant Science**, 68 (1988) 193-198.

LOBELL, D. B.; BÄNZIGER, M.; MAGOROKOSHO, C.; VIVEK, B. Nonlinear heat effects on African maize as evidenced by historical yield trials. **Nature Climate Change**, 1 (2011) 42-45.

LU, Y.; HAO, Z.; XIE, C.; CROSSA, J.; ARAUS, J. L.; GAO, S.; VIVEK, B. S.; MAGOROKOSHO, C.; MUGO, S.; MAKUMBI, D.; TABA, S.; PAN, G.; LI, X.; RONG, T.; ZHANG, S.; XU, Y. Large-scale screening for maize drought resistance using multiple selection criteria evaluated under water-stressed and well-watered environments. **Field Crops Research**, 124 (2011) 37-45.

R CORE TEAM. **R: a language and environment for statistical computing**. Viena: R Foundation for Statistical Computing. 2017.

SENTIMELA, P. S.; VIVEK, B.; BÄNZIGER, M.; CROSSA, J.; MAIDENI, F. Evaluation of early to medium maturing open pollinated maize varieties in SADC region using GGE biplot based on the SREG model. **Field Crops Research**, 103 (2007) 161-169.

SHIFERAW, B.; PRASANNA, B. M.; HELLIN, J.; BÄNZIGER, M. Crops that feed the world 6. Past success and future challenges to the role played by maize in global food security. **Food Security**, 3 (2011) 307-327.

SILVA, W. C. J.; DUARTE, J. B. Métodos estatísticos para estudo de adaptabilidade e estabilidade fenotípica em soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 41 (2006) 23-30.

SSERUMAGA, J. P.; BEYENE, Y.; PILLAY, K.; KULLAYA, A.; OIKEH, S. O.; MUGO, S.; MACHIDA, L.; NGOLINDA, I.; ASEA, G.; RINGO, J.; OTIM, M.; ABALO, G.; KIULA, B. Grain-yield stability among tropical maize hybrids derived from doubled-haploid inbred lines under random drought stress optimum moisture conditions. **Crop Pasture Science**, 69 (2018) 691-702.

TESFAYE, K.; KRUSEMAN, G.; CAIRNS, J. E.; ZAMAN-ALLAH, M.; WEGARY, D.; ZAIDI, P. H.; BOOTE, K. J.; RAHUT, D.; ERENSTEIN, O. Potential benefits of drought and heat tolerance for adapting maize to climate change in tropical environments. **Climate Risk Management**, 19 (2018) 106-119.

UNITED NATIONS – Department of Economic and Social Affairs, Population Division. **World Population Prospects: The 2017 Revision, Key Findings and Advance**. 2017. Tables. Working Paper No. ESA/P/WP/248.

VERMA, M. M.; CHAHAL, G. S.; MURTY, B. R. Limitations of conventional regression analysis: a proposed modification. **Theoretical and Applied Genetics**, 53 (1978) 89-91.

WICKHAM, H. **ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis**. New York: Springer, 2009. 212p.

WITT, S.; GALICIA, L.; LISEC, J.; CAIRNS, J.; TIESSEN, A.; ARAUS, J. L.; PALACIOS-ROJAS, N.; FERNIE, A. R. Metabolic and phenotypic responses of greenhouse-grown maize hybrids to experimentally controlled drought stress. **Molecular Plant**, 5 (2012) 401-417.

WOSSEN, T.; ABDOULAYE, T.; ALENE, A.; FELEKE, S.; MENKIR, A.; MANYONG, V. Measuring the impacts of adaptation strategies to drought stress: the case of drought tolerant maize varieties. **Journal of Environmental Management**, 203 (2017) 106-113.

YAN, W.; HUNT, L. A.; SHENG, Q.; SZLAVNICS, Z. Cultivar evaluation and mega-environment investigation based on the GGE Biplot. **Crop Science**, 40 (2000) 597-605.

YAN, W.; TINKER, N. A. Biplot analysis of multi-environment trial data: principles and applications. **Canadian Journal of Plant Science**, 86 (2006) 623-645.

YAN, W.; KANG, M. S.; MA, B.; WOODS, S.; CORNELIUS, P. L. GGE biplot vs. AMMI analysis of genotype-by-environment data. **Crop Science**, 47 (2007) 643-655.

ZOBEL, R.W.; WRIGHT, M.J.; GAUCH, H.G. Statistical analysis of a yield trial. **Agronomy Journal**, 80 (1988) 388-393.

CONCLUSÕES GERAIS

A interação GxA tem sido largamente estudada no Brasil e no mundo nas últimas décadas. Embora o número de publicações tenha reduzido na década atual, é indiscutível a necessidade de continuidade nas pesquisas nessa área.

Há uma quantidade expressiva de métodos para estudo da interação GxA, especialmente para estudo da adaptabilidade e estabilidade. Esses métodos apresentam diferentes vantagens e têm servido às mais diversas demandas dos programas de melhoramentos de plantas. No Brasil, o método preferido pelos pesquisadores de milho e soja tem sido Eberhart e Russell. Outros métodos, como Cruz, Torres e Vencovsky, AMMI, GGE Biplot, MHPRVG e Centroide, também têm sido muito adotados.

Os métodos GGE Biplot e Cruz, Torres e Vencovsky, utilizados em conjunto, permitem identificar adequadamente híbridos de milho bem adaptados simultaneamente a condições ótimas de cultivo e a condições de estresse hídrico.

A aplicação dos métodos de estudo da adaptabilidade e estabilidade fornece informações e direcionamentos fundamentais ao processo de melhoramento de plantas.