



Graphical analysis to determine the stability and adaptability of yield characteristics of dwarf cashew trees

Análise gráfica para determinar a estabilidade e adaptabilidade em características produtivas de cajueiros-anão

Gilberto Ken Iti Yokomizo^{1*}, Kuang Hongyu², Francisco das Chagas Vidal Neto³, Dheyne Silva Melo⁴, Luiz Augusto Lopes Serrano⁵

Abstract: The cashew culture provides jobs and boosts the economy of the Northeast region and is therefore of great socioeconomic importance. In genetic improvement programs, the existence of an interaction between genotypes and environments has been observed, making studies of adaptability and stability essential for effective selection. Thus, the objective was to study the performance of early dwarf cashew clones using the GGE Biplot in three agricultural years (2016–2018). The experimental design was in randomized blocks with 25 treatments (clones) and three replications. The plot consisted of four plants spaced 8 × 8 m apart. The variables evaluated were nut yield throughout the harvest (PRC), average nut weight (PMC), and percentage of nuts pierced (PCF). The clones most characterized as ideotypes were T25, T14, T7, T8, T2, T10, T15, and T22 for PRC; T12, T1, and T16 for PMC; and T5, T24, T21, and T8 for PCF, with coincidence for T8 in PC and PCF. Clones with values above the general average, with emphasis on stability, were T14 and T2 for PRC; T12, T1, T16, T8, and T22 for PMC; and T5 and T22 for PCF. The years with test characteristics, that is, those with average environmental factors for all years, were 2016 for PRC and 2018 for PCF, with no test year for PMC; the every years were more discriminating to PCF, with the exception of 2016 for PRC.

Key words: *Anacardium occidentale* L.. Genotype × environment interaction. Plant breeding.

Resumo: A cajucultura promove empregos e impulsiona a economia da região Nordeste, possuindo, portanto, elevada importância socioeconômica. Nos programas de melhoramento genético, tem-se constatado a existência de interação genótipos versus ambientes, tornando fundamentais os estudos de adaptabilidade e estabilidade para uma seleção eficaz. Assim, objetivou-se estudar o desempenho de clones de cajueiro-anão precoce empregando o GGE Biplot em três anos agrícolas (2016 a 2018). O delineamento experimental foi em blocos casualizados com 25 tratamentos (clones) e três repetições. A parcela consistiu em quatro plantas espaçadas de 8 x 8 m. As variáveis avaliadas foram: produtividade de castanha em toda a safra (PRC); peso médio da castanha (PMC) e porcentagem de castanha furada (PCF). Os clones mais caracterizados como ideótipos, são: T25, T14, T7, T8, T2, T10, T15 e T22 para PRC; T12, T1 e T16 para PMC e, T5, T24, T21 e T8 para PCF, havendo coincidência para T8 em PC e PCF; os clones com valores superiores à média geral, com destaque na estabilidade, são: T14 e T2 para PRC; T12, T1, T16, T8 e T22 para PMC e; T5 e T22 para PCF. Os anos com características de teste, ou seja, que possuem média dos fatores ambientais de todos os anos, foram 2016, para PRC, e 2018, para PCF, sendo que não houve ano teste para PMC; e todos os anos foram mais discriminantes para PRC e PCF, com exceção de 2016 para PRC.

Palavras-chave: *Anacardium occidentale* L.. Interação genótipos x ambientes. Melhoramento de plantas.

*Corresponding author

Submitted for publication on 13/08/2021, approved on 16/11/2021 and published on 17/12/2021

¹Engenheiro agrônomo, Doutor em Genética e Melhoramento de Plantas, Embrapa Amapá, Rodovia Juscelino Kubitschek, 2600, Bairro Universidade, CEP 68903-419, Macapá, AP. E-mail: gilberto.yokomizo@embrapa.br

²Matemático, Doutor em Estatística e Experimentação Agronômica, Universidade Federal de Mato Grosso, Av. Fernando Corrêa da Costa, 2367, Bairro Boa Esperança, CEP 78060-900, Cuiabá, MT. E-mail: kuang_hongyu@yahoo.com.br.

³Engenheiro agrônomo, Doutor em Fitotecnia, Embrapa Agroindústria Tropical, Rua Dra. Sara Mesquita, no 2.270, Bairro Planalto do Pici, CEP 60511-110, Fortaleza, CE. E-mail: vidal.neto@embrapa.br.

⁴Engenheiro agrônomo, Doutor em Genética e melhoramento de plantas, Embrapa Agroindústria Tropical, Fortaleza, CE. E-mail dheyne.melo@embrapa.br.

⁵Engenheiro agrônomo, Doutor em Produção Vegetal, Embrapa Agroindústria Tropical, Fortaleza, CE. E-mail: luiz.serrano@embrapa.br.

INTRODUCTION

The dwarf cashew tree, originating in the tropical region of the Americas, belongs to the Anacardiaceae family and is used as both a food and a traditional medicine. It commonly exists in the Cerrado, Caatinga, and Amazon regions but has high economic and social importance in the Northeast of Brazil, providing a significant contingent of labor for its cultivation and contributing significantly to the capture of economic foreign exchange (SANTOS, 2011).

Cashew production in Brazil totaled 150,404 tons in 2020, over a harvested area of 429,177 hectares, with 99.4% in the Northeast region. The largest producer was Ceará, reaching a production of 95,491 tons, followed by Piauí with 24,715 tons and Rio Grande do Norte with 17,170 tons. The export of nuts, which was one of the main cashew products in the 2019 harvest, was 17,100 tons, generating a value of US\$ FOB 121 million (CONAB, 2020).

The production of cashew fruits takes place during the dry season, providing jobs and income in rural areas at a time when there is no economic option in the Brazilian Northeast. There are several studies related to agribusiness aiming to improve the quality of the fruit and its post-harvest characteristics. These actions need simple and easy methodologies to assess, in the shortest possible time and in a representative sample of cashew tree populations, in terms of quality and fruit yield parameters, supporting the selection of cultivars (RIBEIRO *et al.*, 2016).

In the final stages of improvement, large volumes of data are accumulated regarding the phenotypic behavior of clones under different environmental conditions (LADO *et al.*, 2016), and knowledge of adaptability and productive stability are important in new genetic materials, in several environments of the target region for improvement, making it possible to find clones with predictable behavior in the face of environmental variations (COOPER *et al.*, 2016; MATHEY *et al.*, 2017).

One of the main obstacles in research with plant species is the presence of genotype versus environment (GxA) interactions. This is one of the greatest problems in plant improvement, hindering or generating inconsistent results in the selection process and in the subsequent recommendation of cultivars. It is essential to find genotypes with high stability and superior performance compared to existing material (RAMALHO *et al.*, 2012; CRUZ *et al.*, 2014).

INTRODUÇÃO

O cajueiro-anão originário da região tropical das Américas pertence à família Anacardiaceae, tendo uso alimentar e na medicina tradicional. Comumente, existe em localidades do Cerrado, da Caatinga e da Amazônia, mas com elevada importância econômica e social no Nordeste brasileiro, propiciando significativo contingente de mão de obra para seu cultivo e contribui também de forma expressiva na captação de divisas econômicas do exterior (SANTOS, 2011).

A produção da cajucultura do Brasil foi representada por 150.404 toneladas em 2020, numa área colhida de 429.177 hectares, com 99,4% na região Nordeste. O maior produtor é o Ceará, atingindo uma produção de 95.491 toneladas, em seguida tem-se o Piauí com 24.715 toneladas e o Rio Grande do Norte com 17.170 toneladas. A exportação da castanha que é um dos principais produtos do cajueiro na safra 2019 foi de 17.100 toneladas gerando um valor de US\$ FOB 121 milhões (CONAB, 2020).

A produção de frutos do cajueiro ocorre no período de estiagem, oportunizando empregos e renda em áreas rurais numa época em que não existe opção econômica no Nordeste brasileiro. Existem várias pesquisas relacionadas ao agronegócio objetivando melhorar a qualidade do fruto e de suas características pós-colheita. Essas ações necessitam de metodologias simples e fáceis para avaliar, em menor tempo possível e numa amostra representativa das populações de cajueiros em parâmetros de qualidade e produtividade dos frutos, apoiando a seleção de cultivares (RIBEIRO *et al.*, 2016).

Nas fases finais de melhoramento, são acumulados grandes volumes de dados referentes ao comportamento fenotípico de clones, em diferentes condições ambientais (LADO *et al.*, 2016), sendo que o conhecimento da adaptabilidade e estabilidade produtiva são importantes em novos materiais genéticos, em diversos ambientes da região alvo de melhoramento, possibilitando vislumbrar clones com previsibilidade de comportamento perante as variações ambientais (COOPER *et al.*, 2016; MATHEY *et al.*, 2017).

Mas um dos principais entraves nas pesquisas com as espécies vegetais é a presença da interação genótipos *versus* ambientes (GxA), tornando-se um dos maiores problemas no melhoramento de plantas, dificultando ou gerando resultados inconsistentes no processo de seleção e na posterior recomendação de cultivares. Sendo fundamental encontrar genótipos com elevada estabilidade e desempenho superior em comparação ao material já existente (RAMALHO *et al.*, 2012; CRUZ *et al.*, 2014).

In addition, this interaction negatively affects the correlation between phenotypic and genotypic values and, as a result, the selection and recommendation of genotypes with broad adaptability and stability becomes difficult, producing inconsistent genotype responses, changing the genotypic ranking or values in absolute differences between genotypes without changing the classification (ARAÚJO *et al.*, 2012; GAUCH, 2013).

The choice of analyses and estimates of the GxA interaction through statistical and graphical models are essential to providing information on the performance of genotypes, identifying the genotypes called elite types or ideotypes, and identifying suitable environmental conditions, in addition to establishing objectives for the genetic improvement of each species (ELIAS *et al.*, 2016; MORAIS-JÚNIOR *et al.*, 2018). The statistical treatment for the GxA interaction has been developing biometric methods that consider genetic and environmental data together, allowing the identification of the clones' behavior more precisely (JARQUÍN *et al.*, 2014).

In adaptability and stability research, the GGE (Genotype main effects and Genotype x Environments effects) biplot methodology stands out. It uses multivariate techniques, combined with graphical analysis, whose model summarizes the main effect of a given genotype plus the interaction between the genotype and the environment (YAN, 2014).

Based on this theoretical foundation, the objective was to evaluate the productive performance of cashew clones and to identify, through GGE Biplot graphical analysis, the clones in terms of stability and adaptability.

MATERIAL AND METHODS

A total of 25 clones of precocious dwarf cashew, pre-chosen for their good nut and pseudofruit yield potential, composed the genetic material of this research. The planting phase of the experiment was carried out on February 22, 2013 at Solidão Farm, located at the geographic coordinates 2°57'06.3"S 40°25'01.5"W, in Cruz, CE. The site has a flat topography, Argisol type soil, and average annual rainfall of 864.8 mm. Other climatological data relating to the evaluation period are shown in Table 1.

Além disso, essa interação atua negativamente na correlação entre os valores fenotípicos e genotípicos e como reflexo a seleção e recomendação de genótipos com ampla adaptabilidade e estabilidade torna-se difícil, produzindo respostas inconsistentes de genótipos, alterando o ranqueamento genotípico ou os valores nas diferenças absolutas entre genótipos sem alterar a classificação (ARAÚJO *et al.*, 2012; GAUCH, 2013).

A escolha de análises e estimativas da interação GA por meio de modelos estatísticos e gráficos são fundamentais para disponibilizar informações sobre o desempenho dos genótipos, identificar os genótipos denominados de elites ou ideótipos, identificar condições ambientais adequadas, além de estabelecer objetivos para o melhoramento genético de cada espécie (ELIAS *et al.*, 2016; MORAIS-JÚNIOR *et al.*, 2018). O tratamento estatístico para a interação GA vem desenvolvendo métodos biométricos que consideram dados genéticos e ambientais conjuntamente, permitindo a identificação do comportamento dos clones de forma mais precisa (JARQUÍN *et al.*, 2014).

Nas pesquisas de adaptabilidade e estabilidade, tem-se como destaque a metodologia GGE biplot (efeito principal de genótipos mais os efeitos da interação genótipos e ambientes), que utiliza técnicas multivariadas, aliadas a análises gráficas, cujo modelo sumariza o efeito principal de determinado genótipo mais a interação genótipo e ambiente (YAN, 2014).

Apoiado neste embasamento teórico, objetivou-se avaliar o desempenho produtivo de clones de cajueiros e identificar, por meio das análises gráficas GGE Biplot, os clones quanto à estabilidade e adaptabilidade.

MATERIAL E MÉTODOS

Um total de 25 clones de cajueiro-anão precoce, pré-escolhidos devido ao bom potencial de produção de castanha e pseudofruto compuseram o material genético desta pesquisa. O plantio do experimento foi efetuado na data de 22 de fevereiro de 2013 na Fazenda Solidão, situada nas coordenadas geográficas 2°57'06.3"S 40°25'01.5"W, no Município de Cruz, CE. O local possui topografia plana, solo do tipo Argissolo, pluviosidade média anual de 864,8 mm. Demais dados climatológicos relativos ao período de avaliação constam na Tabela 1.

Table 1 - Total annual precipitation (PTo), mean maximum temperature (Tmax), mean annual temperature (TMed), mean minimum temperature (TMin) and mean relative humidity (UH%) at Sobral station. Cruz, CE

Tabela 1 - Precipitação total anual (PTo), temperatura máxima média (Tmax), temperatura média anual (TMed), temperatura mínima média (TMin) e umidade relativa média do ar (UR%) da estação de Sobral. Cruz, CE

	PTo	TMax	TMed	TMin	UR%
2016	717.0	35.2	27.7	22.2	68.4
2017	975.4	34.5	27.4	22.3	70.1
2018	902.1	34.4	27.0	21.6	71.6

Source: INMET-BDMEP (2020).

Fonte: INMET-BDMEP (2020).

The experimental design used was randomized blocks with 25 treatments, clones of early dwarf cashew tree (Table 2), in three replications and four plants per plot, with a spacing of 8 × 8 m.

The characteristics evaluated in the period from 2016 to 2018 in the clones were PRC - nut yield, throughout the harvest period, in kg ha⁻¹; PMC - average nut weight, based on the average of 50 nuts per plot, after harvest, in grams, and PCF - percentage of nuts pierced (negative attribute and corresponds to the % attack of the nut moth pest).

O delineamento experimental utilizado foi blocos casualizado com 25 tratamentos, clones de cajueiro-anão precoce (Tabela 2), em três repetições e quatro plantas por parcela, com espaçamento de 8 x 8 m.

As características avaliadas no período de 2016 a 2018 nos clones foram: PRC - produtividade de castanha, durante todo o período de safra, em kg ha⁻¹; PMC - peso médio da castanha, tomada com base na média de 50 castanhas por parcela, após a colheita em g, e PCF - porcentagem de castanha furada (atributo negativo e corresponde à % de ataque da praga traça-das-castanhas).

Table 2 - Identification of early dwarf cashew clones. Cruz, CE

Tabela 2 - Identificação dos clones de cajueiro-anão precoce. Cruz, CE

Clones	Treat.	Clones	Trat.	Clones	Treat.
PRO 113-1	1	PRO 146/7	9	PRO 143/7	17
MG-1	2	SLC 12-20	10	H-51	18
MG-17	3	PRO 116-2	11	H-71	19
MG-41	4	PRO 114/2	12	PRO 155/2	20
MG-57	5	PRO 114/4	13	END II 6-9	21
MG-65	6	PRO 133/1	14	PRO 805/4	22
MG-76	7	PRO 149/1	15	BRS 189	23
PRO 108/6	8	PRO 105/5	16	CCP 76	24
				BRS 226	25

Both individual and joint analyses of variance were carried out within the period of agricultural years from 2016 to 2018. The graphical analysis used was Biplot GGE, which considers the effects of genotypes and the interaction between genotypes and environments. In this procedure, only the main effect of genotype and GxA are fundamental and, therefore, considered together. The GGE biplot model considers together the effects of G and GxA, in the form of two multiplicative terms, whose representative equation is $Y_{ij} - \bar{y}_j = y_1 \varepsilon_{i1} \rho_{j1} + y_2 \varepsilon_{i2} \rho_{j2} + \varepsilon_{ij}$, where Y_{ij} depicts the average yield of the i -th clone in the j -th year; \bar{y}_j is the overall average of clones in year j ; $y_1 \varepsilon_{i1} \rho_{j1}$ is the first major component (PC1); $y_2 \varepsilon_{i2} \rho_{j2}$ is the second main component (PC2); y_1 and y_2 are the eigenvalues associated with PC1 and PC2, respectively; ε_{i1} and ε_{i2} are the scores of the first and second principal components, respectively, of the i -th clone; ρ_{j1} and ρ_{j2} are the scores of the first and second principal component, respectively, for the j -th year; and ε_{ij} is the model error associated with the i -th clone and j -th year (YAN; KANG, 2003). The GGE biplot analysis was performed using the R statistical program (R CORE TEAM, 2016).

Additionally, the information relation (RI) proposed by Yan and Tinker (2006) was estimated to verify if the biplot is sufficient to display the patterns of a double-entry table. For its interpretation, a PC (interaction axis of the principal component analysis), with RI value = 1, contains patterns (associations between years), and PC, with RI < 1, contains any pattern or information. Emphasizing that the 2-dimensional biplot must conveniently represent the data patterns, when only the first two PCs have an RI ≥ 1 .

RESULTS AND DISCUSSION

Table 3 presents the GGE biplot analysis originating from the data for the clones evaluated, whose cumulative percentage of the variation explained by the first two axes was estimated to be greater than 87% in the characteristics under study, thus attributing high reliability in explaining the total variation of the genotype performance added to the interaction with the environment (G + GxA) when using a two-axis model.

Efetuarão-se as análises de variância individuais e também a conjunta dentro do período dos anos agrícolas de 2016 a 2018. A análise gráfica utilizada foi Biplot GGE, que considera os efeitos dos genótipos e da interação entre genótipos e ambientes. Nesse procedimento apenas o efeito principal de genótipo e da GxA são fundamentais e, portanto, considerados conjuntamente. O modelo GGE biplot considera em conjunto os efeitos de G com a da GxA, na forma de dois termos multiplicativos, cuja equação representativa é: $Y_{ij} - \bar{y}_j = y_1 \varepsilon_{i1} \rho_{j1} + y_2 \varepsilon_{i2} \rho_{j2} + \varepsilon_{ij}$ onde Y_{ij} retrata o rendimento médio da i -ésimo clone no j -ésimo ano; \bar{y}_j é a média geral dos clones no ano j ; $y_1 \varepsilon_{i1} \rho_{j1}$ é o primeiro componente principal (PC1); $y_2 \varepsilon_{i2} \rho_{j2}$ é o segundo componente principal (PC2); y_1 e y_2 são os autovalores associados ao PC1 e PC2, respectivamente; ε_{i1} e ε_{i2} são os escores do primeiro e segundo componente principal, respectivamente, do i -ésimo clone; ρ_{j1} e ρ_{j2} são os escores do primeiro e segundo componente principal, respectivamente, para o j -ésimo ano; ε_{ij} é o erro do modelo associado com o i -ésimo clone e j -ésimo ano (YAN; KANG, 2003). A análise do GGE biplot foi efetuada empregando o programa estatístico R (R CORE TEAM, 2016).

Adicionalmente foi estimada a relação de informação (RI) proposta por Yan e Tinker (2006) para verificar se o biplot é suficiente para exibir os padrões de uma tabela de dupla entrada. Para sua interpretação, tem-se que um PC (eixo da interação da análise de componentes principais), apresentando valor RI = 1, contém padrões (associações entre anos), e PC, de RI < 1, contém qualquer padrão ou informação. Destacando que o biplot de dimensão 2 deve representar convenientemente os padrões dos dados, quando apenas os dois primeiros PCs têm um RI ≥ 1 .

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 3, é apresentada a análise GGE biplot originada dos dados dos clones avaliados, cujo percentual acumulado da variação explicada pelos dois primeiros eixos foi estimado superior a 87% nas características em pesquisa, atribuindo, portanto, elevada confiabilidade na explicação da variação total do desempenho do genótipo somado a interação com o ambiente (G+GxA), ao utilizar modelo baseado em dois eixos.

Table 3 - Singular value, explained proportion, and information ratio (RI) considering the three main components (PCs) of nut yield (PRC), of the average nut weight (PMC) and of the percentage of nuts pierced (PCF) in progeny of cashew trees. Cruz, CE

Tabela 3 - Valor singular, proporção explicada e relação de informação (IR) considerando os três componentes principais (PCs) na produtividade de castanha (PRC), no peso médio da castanha (PMC) e na percentagem de castanha furadas (PCF) em progênies de cajueiros. Cruz, CE

Character	Parameters	Components Axes		
		PC1	PC2	PC3
PRC	Singular Value	5319919.00	470622.00	113646.00
	Explained Proportion (%)	90.10	7.97	1.93
	RI	4.51	0.40	0.10
PMC	Singular Value	12.08	4.00	1.23
	Explained Proportion (%)	69.81	23.11	7.08
	RI	3.49	1.16	0.35
PCF	Singular Value	58.08	14.14	9.87
	Explained Proportion (%)	70.76	17.22	12.02
	RI	3.54	0.86	0.60

The results show that the evaluated traits present phenotypic expression substantially of genetic origin. The percentage added on the axes was similar to that obtained in cashew trees (YOKOMIZO *et al.*, 2018) and above that obtained in melon for average weight per fruit and number of fruits per plant (DEHGHANI *et al.*, 2012); in cassava for root yield (PEPRAH *et al.*, 2016); and in cashew trees in the characteristics of the number, productivity, and weight of cashews almonds (ALIYU *et al.*, 2014).

Regarding the information ratio (RI) of the axes, considering the first four component axes (Table 3), only the first PC axis showed a pattern (RI > 1); in this case, for the PRC characteristic, it indicated the existence of associations between years. On the second axis, the existence of a standard in PMC and PCF could also be seen. As for PRC, although the second axis had an RI below 1, it may contain some independent information, which may also be relevant. Thus, it should be considered that only the first two axes in the graphical analysis were sufficient to represent the data patterns.

Figure 1 (“which-won-where”) of analysis of mega-environments aims to group the clones of early dwarf cashew trees and allow a visualization of the years in which these clones were superior, making it possible to identify the existence of different mega-environments in a region. In the evaluation, the 25 clones were identified with a letter followed by a number (T1 to T25) and the three years as A2016 to A2018.

Os resultados mostram que as características avaliadas apresentam expressão fenotípica substancialmente de origem genética. A porcentagem somada nos eixos foi similar ao obtido em cajueiros (YOKOMIZO *et al.*, 2018) e acima do obtido em melão para peso médio por fruto e número de frutos por planta (DEHGHANI *et al.*, 2012); em mandioca para produtividade de raízes (PEPRAH *et al.*, 2016); e em cajueiros nas características do número de amêndoas, produtividade e peso de amêndoas (ALIYU *et al.*, 2014).

Sobre a relação de informação dos eixos (RI), considerando os quatro primeiros eixos componentes (Tabela 3), pode-se observar que somente o primeiro eixo PC conteve padrão (RI > 1), neste caso, para a característica PRC é indicativo da existência de associações entre os anos. No segundo eixo, também, pode-se notar a existência de padrão em PMC e PCF. Já para PRC, apesar do segundo eixo possuir IR abaixo de 1, pode conter alguma informação independente, que pode ser pertinente também. Desta forma, deve-se considerar que bastam apenas os dois primeiros eixos na análise gráfica para representar os padrões dos dados.

A Figura 1 (“which-won-where”) de análise de mega-ambientes tem como finalidade agrupar os clones de cajueiro-anão precoce e permitir a visualização em qual ou quais anos esses clones são superiores. Possibilitando identificar a existência de distintos mega-ambientes numa região. Na avaliação, os 25 clones foram identificados com letra seguida de número (T1 a T25), e os três anos como A2016 a A2018.

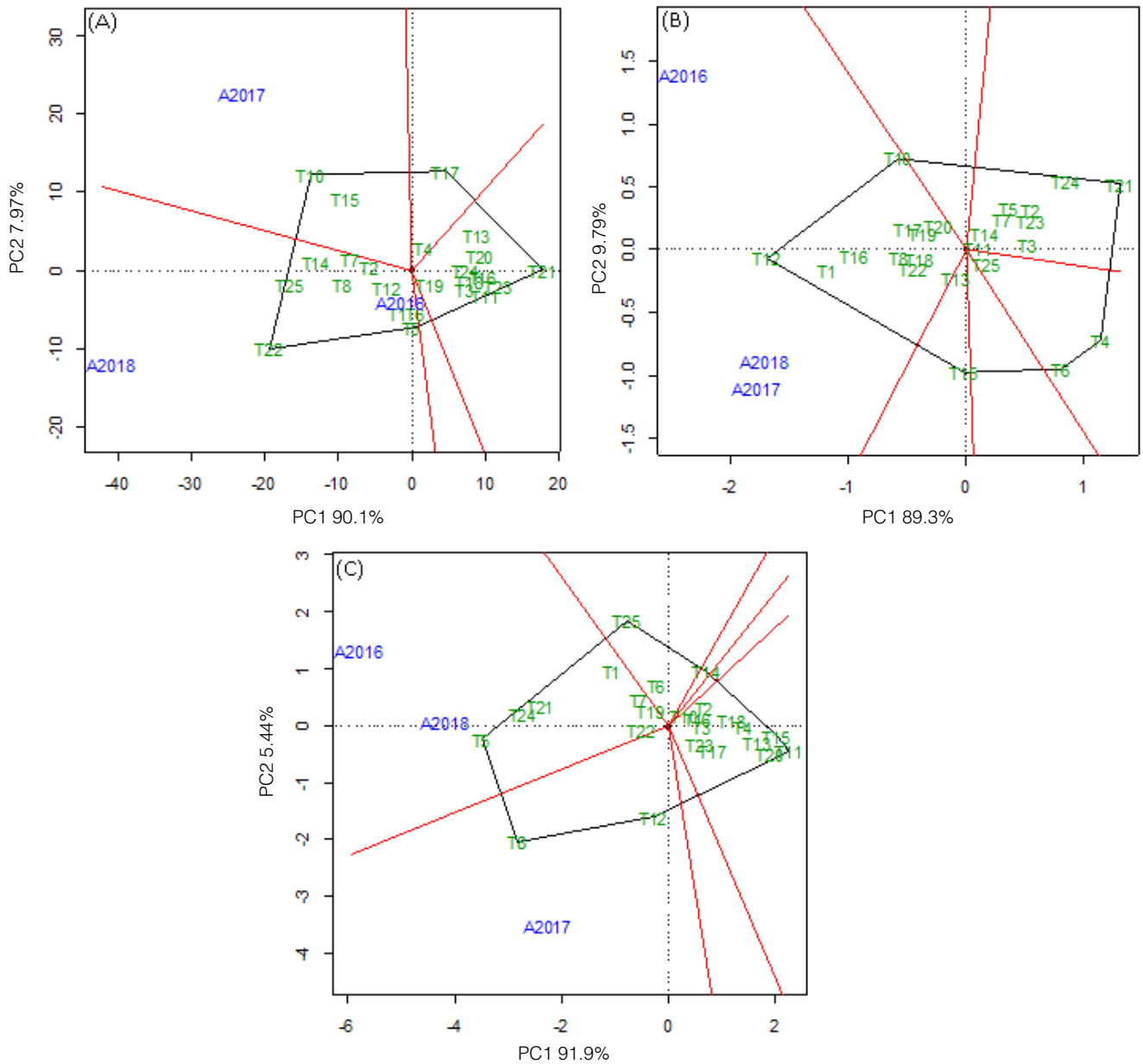


Figure 1 - Visualization, through GGE Biplot (“Which-won-where”), of the clones with the best performance and in which years. (A) nut yield, in kg ha^{-1} ; (B) average nut weight, in g; and (C) percentage of nuts pierced, in clones of early dwarf cashew tree. Cruz, CE.

Figura 1 - Visualização, por meio de GGE Biplot (“Which-won-where”), dos clones com melhor desempenho e em quais anos. (A) produtividade de castanha, em kg ha^{-1} ; (B) peso médio da castanha, em g; e (C) porcentagem de castanha furada, em clones de cajueiro-anão precoce. Cruz, CE.

In Figure 1A, for PRC, the lines with the origin of the biplot indicate the existence of five mega-environments, while in PMC (Figure 1B) there is a suggestion of six mega-environments, and for PCF, the lines show seven mega-environments (Figure 1C).

Na Figura 1A, para PRC, tem-se que as linhas com origem do biplot indicam a existência de cinco mega-ambientes, enquanto em PMC (Figura 1B) há sugestão de seis mega-ambientes, e para PCF, as linhas mostram sete mega-ambientes (Figura 1C).

The predominance of the division generating more than two mega-environments was similar to the behavior in cashew trees obtained by Yokomizo *et al.* (2018) and different from that observed for peach fruit yield in three years (CITADIN *et al.*, 2014); in cashew trees for the number of nuts per plant, yield and nut weight by Aliyu *et al.* (2014); in strawberry productivity, it was found that each location made up a mega-environment (COSTA *et al.*, 2016), similarly to that mentioned in cassava by Peprah *et al.* (2016). Regarding the clones, there was similarity to the cited references of the existence of those that were not specifically associated with a mega-environment in Figures 1A, 1B, and 1C. As for the neighborhood of clones with mega-environments that contain some year, there was a tendency for many clones not to be located in the vicinity of any mega-environment, in contrast to the cited references.

The clones that were plotted at the vertices of each sector represent the ones with superior performance in these environments. Based on this information, in the PRC characteristic, clone T22 was the superior one in the sector for the years 2016 and 2018, followed by T10 for the year 2017 (Figure 1A). For PMC, clone T12 is highlighted in all years (Figure 1B). Clone T5 was the best for PCF in the years 2016 and 2018, followed by clone T8 for 2017 (Figure 1C). Regarding the observed behavior, the existence of clones showing specific adaptation to certain environments or years is a common fact, also occurring in the work of Yokomizo *et al.* (2018) and in other species such as in studies with cashew (ALIYU *et al.*, 2014), peach (CITADIN *et al.*, 2014), strawberry (COSTA *et al.*, 2016), and cassava (PEPRAH *et al.*, 2016). Revealing that, when there is variability in a group of genotypes, there will be those that exhibit adaptability to specific environments or years.

Based on the graphs, the existence of clones that have superior adaptability in certain years was verified, but there was a predominance of those with intermediate performance and lack of specific adaptability to any year. These clones, therefore, can be considered as the ones that underperform every year.

Figures 2A, 2B, and 2C present the ideotype clones for each trait. Clones located nearer the center of the circles are considered more similar to the ideotype.

O predomínio da divisão gerando mais de dois mega-ambientes foi similar ao comportamento em cajueiros obtido por Yokomizo *et al.* (2018) e diferente ao observado na produtividade de frutos de pêssego em três anos (CITADIN *et al.*, 2014); em cajueiros para número de castanha por planta, produtividade e peso de castanha por Aliyu *et al.* (2014); em produtividade de morangueiro, constatou-se que cada local compôs um mega-ambiente (COSTA *et al.*, 2016), similarmente ao citado em mandioca por Peprah *et al.* (2016). Sobre os clones, houve similaridade com as referências citadas da existência daqueles que não se associaram especificamente a algum mega-ambiente nas Figuras 1A, 1B e 1C. Quanto à vizinhança dos clones com mega-ambientes que contém algum ano, verificou-se que há tendência de muitos clones não se situarem nas proximidades de qualquer mega-ambiente diferindo das referências citadas.

Os clones que foram plotados nos vértices de cada setor representam os de desempenho superior nesses ambientes. Baseado nesta informação, na característica PRC, tem-se que o clone T22 foi o superior no setor dos anos 2016 e 2018, seguido por T10 para o ano 2017 (Figura 1A). Para PMC, tem-se como destaque o clone T12 em todos os anos (Figura 1B). O clone T5 foi o melhor para PCF nos anos 2016 e 2018, em seguida está o clone T8 para 2017 (Figura 1C). No que concerne ao comportamento observado, a existência de clones apresentando adaptação específica a certos ambientes ou anos é um fato corriqueiro, também ocorrendo no trabalho de Yokomizo *et al.* (2018) e em outras espécies como nos estudos com cajueiro (ALIYU *et al.*, 2014), pêssego (CITADIN *et al.*, 2014), morangueiro (COSTA *et al.*, 2016) e mandioca (PEPRAH *et al.*, 2016). Revelando que, quando há variabilidade num grupo de genótipos, existirão os que exibem adaptabilidade a ambientes ou anos específicos.

Baseado nos gráficos constatou-se a existência de clones que possuem adaptabilidade superior em determinados anos, mas houve predomínio daqueles com desempenho intermediário e de ausência de adaptabilidade específica a qualquer ano. Esses clones, portanto, podem ser considerados como aqueles que possuem desempenho inferior em todos os anos.

Nas Figuras 2A, 2B e 2C são apresentados os clones ideótipos para cada característica. Os clones localizados próximos do centro dos circuncírculos e são considerados como mais similares ao ideótipo.

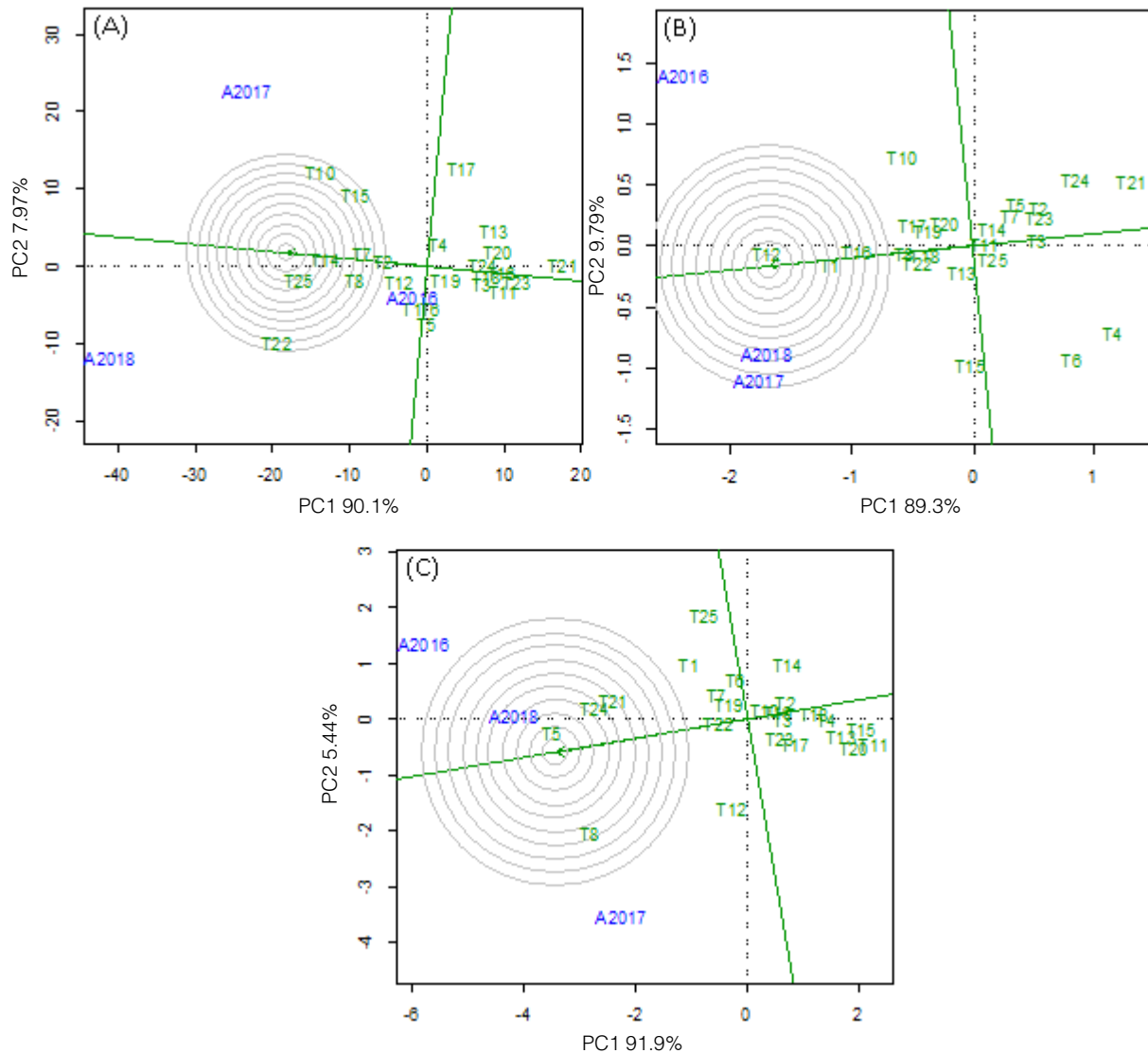


Figure 2 - The GGE Biplot, with mean-environment axis (EAM), to verify similarity of clones in relation to the ideotype (in the center of the concentric circles). (A) nut yield, in kg ha^{-1} ; (B) average nut weight, in grams; and (C) percentage of nuts pierced, in cashew clones. Cruz, CE.

Figura 2 - O GGE Biplot, com eixo do ambiente-média (EAM), para verificar similaridade dos clones em relação ao ideótipo (no centro dos círculos concêntricos). (A) produtividade de castanha, em kg ha^{-1} ; (B) peso médio da castanha, em g; e (C) porcentagem de castanha furada, em clones de cajueiros. Cruz, CE.

Figures 2A and 2C emphasize an important concept in relation to the stable genotype with exceptional performance in evaluated characteristics (YAN; TINKER, 2006; YAN, 2011), forming what is called an ideotype, which is a perfect plant for use in a given environment, much desired by genetic improvement programs. The GGE biplot “Average versus Stability” is a powerful graph in the evaluation of genotypes in terms of stability and productivity (YAN, 2014), allowing the identification of those clones that approximate the ideotype.

As Figuras 2A e 2C enfatizam um conceito importante em relação ao genótipo estável com excepcional desempenho em suas características (YAN; TINKER, 2006; YAN, 2011), formando aquilo que é intitulado como ideótipo, que é uma planta perfeita para uso em determinado ambiente, muito almejada pelos programas de melhoramento genético. O GGE biplot “Média versus Estabilidade” é um gráfico poderoso na avaliação de genótipos nos aspectos de estabilidade e produtividade (YAN, 2014), permitindo identificar aqueles clones que se aproximam do ideótipo.

The clones that approximated the ideotype were T25, T14, T7, T8, T2, T10, T15, and T22 for PRC (Figure 2A); clones T12, T1, and T16 for PMC (Figure 2B); and T5, T24, T21, and T8 for PCF (2C). In the work of Aliyu *et al.* (2014), two clones were identified as the most similar to the ideotype, and the number of clones here was greater, similar to precocity in cashew trees obtained by Yokomizo *et al.* (2018). Several clones showed stability behavior; however, it does not mean that they added positively to the means, only that their performance was consistent in terms of stability but not in productivity. They cannot, therefore, be classified as close to ideotypes.

The objective of the trial years study is to identify those that can be used for the effective selection of superior genotypes for the mega-environment. A selected test year must have a longer vector than that of early dwarf cashew clones, a greater capacity to generate greater distinction than the effect of the clones, and also greater representation in relation to the other years. The years with short vectors have less discriminatory power, which causes similarity between all clones; therefore, they should not be used when the presence of factors that can generate differentiation between genetic materials is desired (HONGYU *et al.*, 2015).

For the characteristics PRC and PCF, long vectors were found in all years, meaning that they did not have greater discriminatory power than clones (Figures 3A and 3C) and generated a greater distinction in the behavior of clones, similar to the result of Aliyu *et al.* (2014), in cashew, for number, weight, and yield of almonds of cashews per plant and for yield, precocity, and average mass, in cashew, observed by Yokomizo *et al.* (2018), in which all environments had superior discrimination, with no genotype presenting a longer vector. For the characteristic PRC, the year 2016 had less discriminatory power than some clones, similar to that mentioned by Peprah *et al.* (2016), in cassava, for productivity, where in general the environments had longer vectors than the genotypes, with few exceptions.

Figures 3A to 3C also show the year(s) that may represent all others. For PRC, we have the test years 2016 (Figure 3A); and for PCF, the year 2018 (Figure 3C), whose angles of the straight lines with EAM (environment-average axis) were smaller and, therefore, the most representative. For the characteristic PMC, there was no year that represented an average of the other years (Figure 3B), in agreement with Aliyu *et al.* (2014) and Yokomizo *et al.* (2018), who also found the presence of environments with greater and lesser representative capacity in cashew trees.

Os clones que se aproximam do ideótipo para PRC foram T25, T14, T7, T8, T2, T10, T15 e T22 (Figura 2A), para PMC foram os clones T12, T1 e T16 (Figura 2B) e, para PCF, foram T5, T24, T21 e T8 (2C). No trabalho de Aliyu *et al.* (2014) foram identificados dois clones como os mais assemelhados ao ideótipo, sendo que o quantitativo de clones aqui foi maior, similar para precocidade em cajueiro obtido por Yokomizo *et al.* (2018). Diversos clones apresentaram comportamento de estabilidade, contudo, não significa que somaram de forma positiva para as médias, mas somente que o desempenho foi consistente em termos de estabilidade, mas não em produtividade e então não podendo ser classificados como próximos de ideótipos.

O objetivo do estudo dos anos de teste foi identificar aqueles que podem ser empregados para a seleção eficaz de genótipos superiores para mega-ambiente. Um ano de teste selecionado deve possuir vetor mais longo que o dos clones de cajueiro-anão precoce, possuindo maior capacidade de gerar maior distinção do que o efeito dos clones e também ter maior representatividade em relação aos demais anos. Os anos com vetores curtos tem menor influência para discriminar, o que causa similaridade entre todos os clones, portanto, não devem ser utilizados quando se deseja a presença de fatores que possam gerar diferenciação entre os materiais genéticos (HONGYU *et al.*, 2015).

Nas características PRC e PCF foram constatados vetores longos em todos os anos, significando que não possuem maior poder discriminatório em relação aos clones (Figuras 3A e 3C), conseguindo gerar maior distinção de comportamento dos clones, similar ao resultado de Aliyu *et al.* (2014), em cajueiro, para número, peso e produtividade de amêndoas por planta e para produtividade, precocidade e massa média, em cajueiro observado por Yokomizo *et al.* (2018), em que todos os ambientes tiveram discriminação superior, não existindo qualquer genótipo apresentando vetor mais longo. Na característica PRC, o ano de 2016 teve menor poder discriminatório do que alguns clones, análogo ao citado por Peprah *et al.* (2016) para produtividade em mandioca, onde em geral os ambientes apresentaram vetores mais longos que os genótipos, com poucas exceções.

As Figuras 3A a 3C também mostram o(s) ano(s) que possa(m) representar todos os demais. Para PRC, tem-se os anos de teste 2016 (Figura 3A); e para PCF, o ano de 2018 (Figura 3C), cujos ângulos das retas com EAM (eixo do ambiente-média) foram menores e, portanto, os mais representativos. Na característica PMC, verifica-se que não houve ano que represente uma média dos demais anos (Figura 3B), semelhante ao encontrado por Aliyu *et al.* (2014) e Yokomizo *et al.* (2018), os quais também constataram a presença de ambientes com maior e menor capacidade representativa em cajueiros.

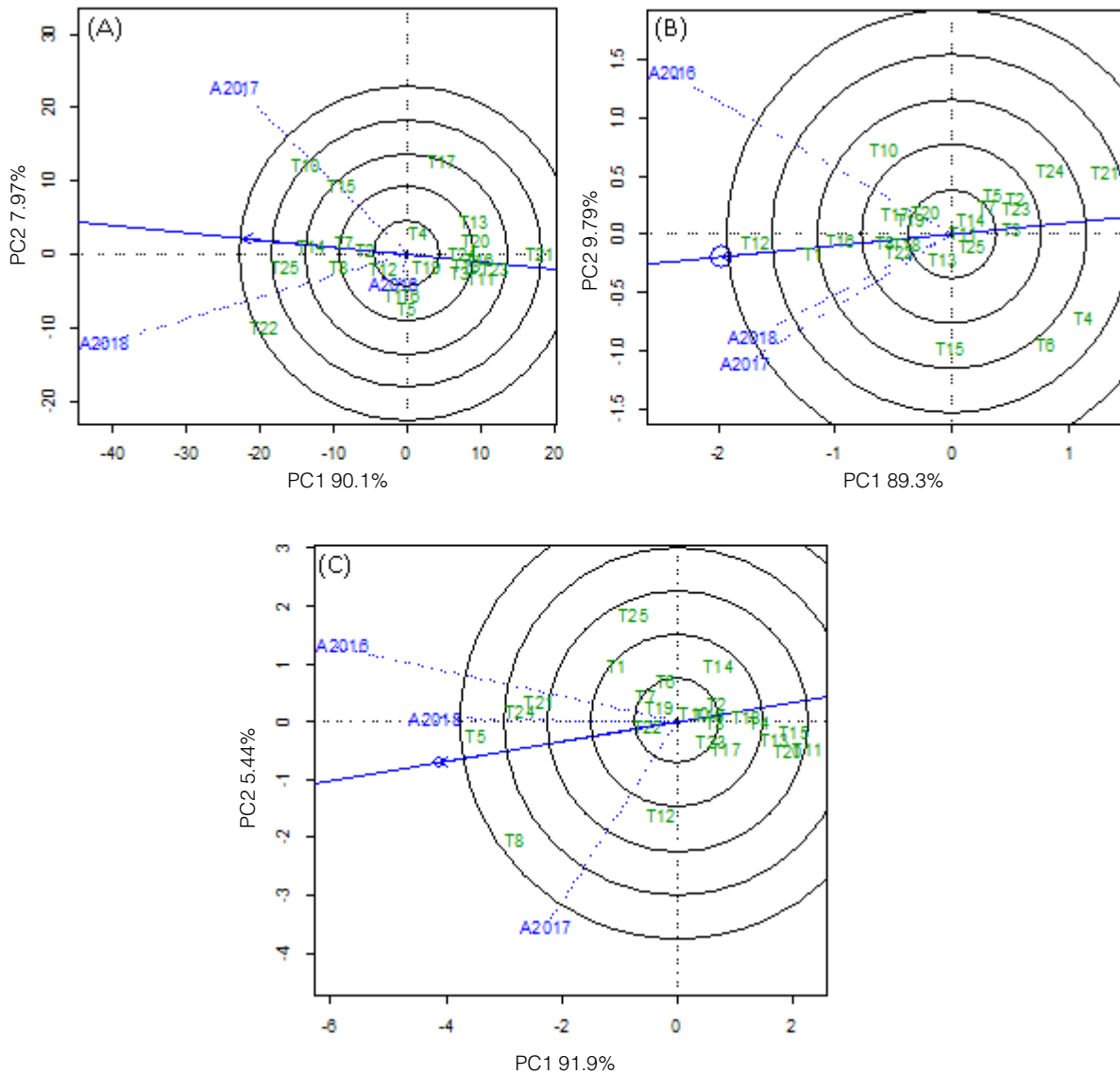


Figure 3 - Discrimination capacity and representativeness of test years by GGE Biplot. (A) nut yield, in kg ha^{-1} ; (B) average nut weight, in grams and (C) percentage of nuts pierced (C), in cashew clones. Cruz, CE.

Figura 3 - Capacidade de discriminação e representatividade dos anos de teste pelo GGE Biplot. (A) produtividade de castanha, em kg ha^{-1} ; (B) peso médio da castanha, em g e (C) porcentagem de castanha furada (C), em clones de cajueiros. Cruz, CE.

The evaluation of the performance of clones by GGE Biplot is based on the analysis of the dispersion of clones by the “environment-average axis” or represented by the acronym EAM, which is nothing more than a straight line with a directional arrow that starts at the origin of the biplot and of the average year. The arrow in the positive direction indicates a higher average performance among the clones under investigation.

A avaliação do desempenho dos clones pelo GGE Biplot é fundamentada na análise de dispersão dos clones pelo “eixo do ambiente-média” ou representada pela sigla EAM, que nada mais é que uma linha reta com uma seta direcional que começa na origem do biplot e do ano médio. A seta no sentido positivo indica um maior desempenho médio entre os clones em pesquisa.

When there is the existence of dispersion in relation to the origin of the biplot due to the non-adjacency of the so-called EAM line, there is an indication of the existence of greater performance variability, that is, less stability (YAN, 2011), as can be seen in the dispersion of the clones in Figures 4A to 4C.

Quando há a existência de dispersão em relação a origem do biplot pela não adjacência da chamada linha EAM, tem-se a indicação da existência de maior variabilidade de desempenho, isto é, menor estabilidade (YAN, 2011), conforme pode ser constatado na dispersão dos clones nas Figuras 4A a 4C.

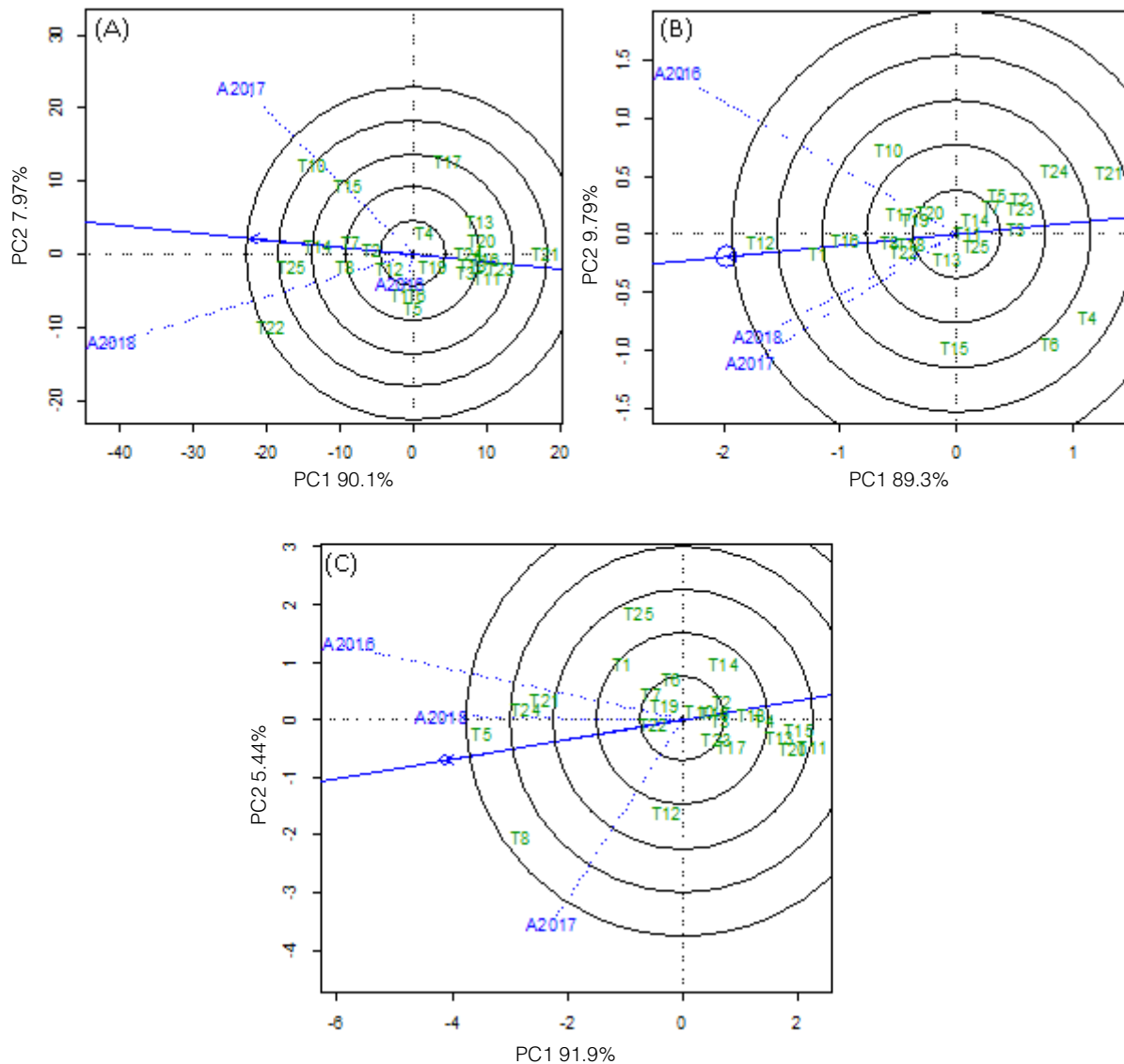


Figure 4 - Average performance and stability of clones based on the mean-environment axis (EAM) by the GGE Biplot (“Average versus Stability”). (A) nut yield, in kg ha^{-1} ; (B) average nut weight, in grams and (C) percentage of nuts pierced in clones of early dwarf cashew tree Cruz, CE.

Figura 4 - Desempenho médio e estabilidade dos clones baseado no eixo do ambiente-média (EAM) pelo GGE Biplot (“Média versus Estabilidade”). (A) produtividade de castanha, em kg ha^{-1} ; (B) peso médio da castanha, em g e (C) porcentagem de castanha furada em clones de cajueiro-anão precoce. Cruz, CE

It can be observed that as a function of an average value for PRC, the clones that performed above the general average, standing out in the set, were T22, T25, T10, T14, T18, T7, T8, and T2, and those with greater stability were T14 and T2 (Figure 4A). For PMC were clones T12, T1, T16, T8, T10, T22, T17, T18, and T19, the most stable being T12, T1, T16, T8, and T22 (Figure 4B), and for PCF were clones T5, T24, T21, T1, T12, and T22, standing out in terms of stability T5 and T22 (Figures 4C). Stability was observed in several clones; however, they failed to stand out for higher values in the traits.

It is important to mention that, in relation to the results obtained for the variation in relation to the quantity of clones with stability, those that showed specific adaptability to certain years and, also, those that did not show stability or adaptability, were similar to cashew trees (ALIYU *et al.*, 2014; YOKOMIZO *et al.*, 2018), peach (CITADIN *et al.*, 2014), strawberry (COSTA *et al.*, 2016), and cassava (PEPRAH *et al.*, 2016). Thus, allowing for the understanding that, in the evaluation of a set of genetic materials, in general, few demonstrate adaptability and stability over the years, as a result of the existence of peculiar intrinsic factors that differentiate each year.

CONCLUSIONS

The clones close to the ideotype for nut yield (PRC) are T25, T14, T7, T8, T2, T10, T15, and T22; average nut weight (PMC), T12, T1, and T16; and percentage of nuts pierced (PCF), T5, T24, T21, and T8. Only T8 is common for PRC and PCF;

The clones with performance above the general average that stand out in terms of stability are PCR - T14 and T2; PMC - T12, T1, T16, T8, and T22 and PCF - T5 and T22;

The years 2016 for PRC and 2018 for PCF represent the average of environmental factors for all years (test years), while for PMC there was no year to be considered as the average of the others.

The years studied had greater discriminating capacity, in relation to clones, for PRC and PCF, with the exception of 2016 for PRC.

Pode-se observar que em função de um valor médio para PRC, os clones que tiveram desempenho acima da média geral, sobressaindo no conjunto, foram T22, T25, T10, T14, T18, T7, T8 e T2, e possuindo maior estabilidade foram T14 e T2 (Figura 4A). Para PMC foram os clones T12, T1, T16, T8, T10, T22, T17, T18 e T19, sendo os mais estáveis T12, T1, T16, T8 e T22 (Figura 4B), e para PCF foram os clones T5, T24, T21, T1, T12 e T22, destacando-se em termos de estabilidade T5 e T22 (Figuras 4C). A estabilidade foi observada em diversos clones, contudo, esses não conseguiram se destacar para valores superiores nas características.

Importante citar que, em relação aos resultados obtidos para a variação em relação ao quantitativo de clones com estabilidade, os que apresentaram adaptabilidade específica a determinados anos e, também, aqueles que não apresentaram estabilidade nem adaptabilidade, foi similar ao cajueiro (ALIYU *et al.*, 2014; YOKOMIZO *et al.*, 2018), pêssego (CITADIN *et al.*, 2014), morangueiro (COSTA *et al.*, 2016) e mandioca (PEPRAH *et al.*, 2016). Permitindo, assim, o entendimento que na avaliação de um conjunto de materiais genéticos, em geral, poucos demonstram adaptabilidade e estabilidade nos anos, por consequência da existência de fatores intrínsecos peculiares que diferencia cada ano.

CONCLUSÕES

Os clones próximos do ideótipo para produtividade de castanha (PRC) são: T25, T14, T7, T8, T2, T10, T15 e T22; peso médio de castanha (PMC), T12, T1 e T16; e percentagem de castanha furada (PCF), T5, T24, T21 e T8. Apenas o T8 é comum para PRC e PCF;

Os clones com desempenho acima da média geral que se destacam quanto à estabilidade são: PCR - T14 e T2; PMC - T12, T1, T16, T8 e T22 e PCF - T5 e T22;

Os anos 2016 para PRC e 2018 para PCF representam média dos fatores ambientais de todos os anos (anos de teste), enquanto para PMC não houve ano a ser considerado como média dos demais;

Os anos estudados tiveram maior capacidade discriminante, em relação aos clones, para PRC e PCF, excetuando-se 2016 para PRC.

CITED SCIENTIFIC LITERATURE

- ALIYU, O. M.; ADEIGBE, O. O.; LAWAL, O. O. Phenotypic stability analysis of yield components in Cashew (*Anacardium occidentale* L.) using additive main effect and multiplicative interaction (AMMI) and GGE biplot analyses. **Plant Breeding Biotechnology**, v. 2, n. 4, p. 354-369, 2014.
- ARAÚJO, M. F. C.; ARAÚJO, L. B.; FARIA, P. N.; DIAS, C. T. S. Statistical test for genotype and environment contribution in the genotype and environment contribution in the genotypes x environments interaction matrix. **Interciencia**, v. 37, n. 7, p. 515-519, 2012.
- CITADIN, I.; SCARIOTTO, S.; SACHET, M. R.; ROSA, F. J.; RASEIRA, M. C. B.; WAGNER JÚNIOR, A. Adaptability and stability of fruit set and production of peach trees in a subtropical climate. **Scientia Agricola**, v. 71, n. 2, p. 133-138, 2014.
- CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Castanha de caju - Análise Mensal - Maio/2020**. 8p. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/analises-do-mercado-agropecuario-e-extrativista/analises-do-mercado/historico-mensal-de-castanha-de-caju/item/13704-castanha-de-caju-analise-mensal-maio-2020>>. Acesso em: 14 jul 2021
- COOPER, M.; TECHNOW F.; MESSINA, C.; GHO, C.; TOTIR, R. Use of crop growth models with whole-genome prediction: application to a maize multi-environment trial. **Crop Science**, v. 56, n. 5, p. 2141-2156, 2016.
- COSTA, A. F.; TEODORO, P. E.; BHERING, L. L.; LEAL, N. R.; TARDIN, F. D.; DAHER, R. F. Biplot analysis of strawberry genotypes recommended for the State of Espírito Santo. **Genetics and Molecular Research**, v. 15, n. 3, p. 1-9, 2016.
- CRUZ, C. D.; CARNEIRO, P. C. S.; REGAZZI, A. J. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. 3. ed. Viçosa: Editora UFV. 2014. 668p.
- DEGHANI, H.; FEYZIAN, E.; JALALI, M.; REZAI, A.; DANE, F. Use of GGE Biplot methodology for genetic analysis of yield and related traits in melon (*Cucumis melo* L.). **Canadian Journal of Plant Science**, v. 92, n. 1, p. 77-85, 2012. DOI: <https://doi.org/10.4141/cjps2010-046>
- 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**, v. 56, n. 5, p. 2090-2105, 2016. DOI: [doi: 10.2135/cropsci2015.01.0061](https://doi.org/10.2135/cropsci2015.01.0061)
- GAUCH, H. G. A Simple Protocol for AMMI Analysis of Yield Trials. **Crop Science**, v. 53, n. 5, p. 1860-1869, 2013. DOI: <https://doi.org/10.2135/cropsci2013.04.0241>
- HONGYU, K.; SILVA, F. L.; OLIVEIRA, A. C. S.; SARTI, D. A.; ARAUJO, L. B.; DIAS, C. T. S. Comparação entre os modelos AMMI e GGE Biplot para os dados de ensaios multi-ambientais. **Revista Brasileira de Biometria**, v. 33, n. 2, p. 139-155, 2015.
- INMET - BDMEP Instituto Nacional de Meteorologia - Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa **Dados históricos – Estação 82392 – Sobral - CE**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>>. Acesso em: 29 jul 2021.
- JARQUÍN, D.; CROSSA, J.; LACAZE, X.; CHEYRON, P. D.; DAUCOURT, J.; LORGEOU, J.; PIRAUX, F.; GUERREIRO, L.; PÉREZ, P.; CALUS, M.; BURGUEÑO, J.; LOS CAMPOS, G. A reaction norm model for genomic selection using high-dimensional genomic and environmental data. **Theoretical and Applied Genetics**, v. 127, n. 3, p. 595-607, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00122-013-2243-1>
- LADO, B.; BARRIOS, P. G.; QUINCKE, M.; SILVA, P.; GUTIÉRREZ, L. Modeling genotype x environment interaction for genomic selection with unbalanced data from a wheat breeding program. **Crop Science**, v. 56, n. 5, p. 2165-2179, 2016. DOI: <https://doi.org/10.2135/cropsci2015.04.0207>
- MATHEY, M. M.; MOOKERJEE, S.; MAHONEY, L. L.; GÜNDÜZ, K.; ROSYARA, U.; HANCOCK, J. F.; STEWART, P. J.; WHITAKER, V. M.; BASSIL, N. V.; DAVIS, T. M.; FINN, C. E. Genotype by Environment Interactions and Combining Ability for Strawberry Families Grown in Diverse Environments. **Euphytica**, v. 213, n. 112, p. 112, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10681-017-1892-6>

- MORAIS-JÚNIOR, O. P.; DUARTE, J. B.; BRESEGHELLO, F.; COELHO, A. S. G.; MORAIS, O. P.; MAGALHÃES-JÚNIOR, A. M. Single-step reaction norm models for genomic prediction in multi-environment recurrent selection trials. **Crop Science**, v. 58, n. 2, p. 592-607, 2018. DOI: <https://doi.org/10.2135/cropsci2017.06.0366>
- PEPRAH, B. B.; AGYEMAN, A.; PARKES, E.; KWADWO, O.; ISSAC, A. K.; EMMANUEL, O.; LABUSCHAGNE, M. T. Stability, agronomic performance and genetic variability of 10 cassava genotypes in Ghana. **Journal of Plant Breeding and Crop Science**, v. 8, n. 9, p. 157-167, 2016. DOI: <https://doi.org/10.5897/JPBCS2016.0581>
- R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2016. Disponível em: <http://www.R-project.org/>. Acesso em: 4 jan 2021.
- RAMALHO, M. A. P.; ABREU, A. F. B.; SANTOS, J. B.; NUNES, J. A. R. **Aplicações da genética quantitativa no melhoramento de plantas autógamas**. Lavras: UFLA. 2012. 305 p.
- RIBEIRO, L. P. D.; SILVA, A. P. M.; LIMA, A. A.; SILVA, E. O.; RINNAN, A.; PASQUINI, C. Non-destructive determination of quality traits of cashew apples (*Anacardium occidentale* L.) using a portable near infrared spectrophotometer. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, v. 24, n. 1, p. 77-82, 2016.
- SANTOS, F. O. **Atividades biológicas de *Anacardium occidentale* (Linn)**. 2011. 56 f. Dissertação (Mestrado em Sistema Agrosilvo-pastoris) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2011.
- YAN, W. GGE Biplot vs. AMMI Graphs for Genotype-by-Environment Data Analysis. **Journal of the India Society of Agricultural Statistics**, v. 65, n. 2, p. 181-193, 2011.
- YAN, W. **Crop variety trials: Data management and analysis**. John Wiley & Sons, New York. 2014. 361p.
- YAN, W.; KANG, M. S. **GGE Biplot Analysis: A Graphical Tool for Breeders, Geneticists, and Agronomists**. CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 2003. 271p.
- YAN, W.; TINKER, A. Biplot analysis of multi-environment trial data: principles and applications. **Canadian Journal of Plant Science**, v. 86, n. 3, p. 623-645, 2006.
- YOKOMIZO, G. K.; VIDAL NETO, F. C.; HONGYU, K.; BARROS, L. M. GGE biplot for stability and adaptability in cashew tree clones. **Agro@ambiente On-line**, v. 12, p. 162-178, 2018. DOI: <https://doi.org/10.18227/1982-8470ragro.v12i3.4887>