



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS
GENÉTICOS VEGETAIS**



DANILLO OLEGÁRIO MATOS DA SILVA

**PARÂMETROS DE ADAPTABILIDADE E ESTABILIDADE
PARA PRODUÇÃO DE GRÃOS, TEORES DE PROTEÍNAS E
MINERAIS EM FEIJÃO-CAUPI (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.)
NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO**

DANILLO OLEGÁRIO MATOS DA SILVA

**PARÂMETROS DE ADAPTABILIDADE E ESTABILIDADE
PARA PRODUÇÃO DE GRÃOS, TEORES DE PROTEÍNAS E
MINERAIS EM FEIJÃO-CAUPI (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.)
NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Genéticos Vegetais, da Universidade Estadual de Feira de Santana, como requisito para a obtenção do título de Doutor em Recursos Genéticos Vegetais.

Orientador: Dr Carlos Antonio Fernandes Santos

Feira de Santana –BA
2018

Ficha Catalográfica - Biblioteca Central Julieta Carteado

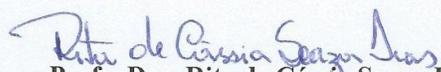
S579p Silva, Danillo Olegário Matos da
Parâmetros de adaptabilidade e estabilidade para produção de grãos,
teores de proteínas e minerais em feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.)
Walp.) no semiárido brasileiro / Danillo Olegário Matos da Silva. - 2018.
190 f.: il.

Orientador: Carlos Antonio Fernandes Santos.
Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Feira de Santana,
Programa de Pós-Graduação em Recursos Genéticos Vegetais, 2018.

1. *Vigna unguiculata* – Melhoramento genético. 2. Feijão-Caupi. I.
Santos, Carlos Antonio Fernandes, orient. II. Universidade Estadual de
Feira de Santana. III. Título.

CDU: 582.736.3

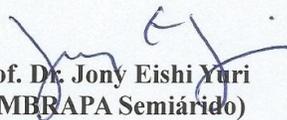
BANCA EXAMINADORA



Profa. Dra. Rita de Cássia Souza Dias
(EMBRAPA Semiárido)



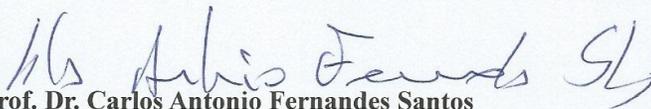
Profa. Dra. Claudineia Regina Pelacani Cruz
(Universidade Estadual de Feira de Santana - UEFS)



Prof. Dr. Jony Eishi Yuri
(EMBRAPA Semiárido)



Profa. Dra. Adriana Rodrigues Passos
(Universidade Estadual de Feira de Santana - UEFS)



Prof. Dr. Carlos Antonio Fernandes Santos
(EMBRAPA Semiárido)

Orientador e Presidente da Banca

Dedico,

Aos meus Pais, Francisco e Marlucia.

Meus irmãos, Julianna e Lucas.

Minha esposa, Jamara.

Minha filha, Júlia.

AGRADECIMENTOS

A Deus por toda a graça concedida, e a Sua Mãe, Maria Santíssima por toda a proteção.

Muitos foram os que me ajudaram ao longo dessa jornada. A todos sou muito grato. Mas, certamente, só foi possível realizar este trabalho devido ao auxílio de algumas pessoas a quem devo agradecimentos especiais.

Aos meus Pais, Francisco Olegário da Silva e Marlúcia Matos da Silva, personagens incríveis desta vida, que tudo me deram, e a quem devo tudo.

Aos meus irmãos, Julianna Matos da Silva e Lucas Vinícius Matos da Silva, por todo o carinho e companheirismo.

A minha querida esposa, Jamara Carvalho Barros da Silva, por todo carinho, compreensão e paciência, que constituiu um verdadeiro ponto de apoio durante momentos difíceis com que me deparei ao longo deste projeto.

Ao meu Orientador, Prof^o Dr. Carlos Antonio Fernandes Santos, pela atenção e, sobre tudo, pelas frutíferas discussões mantidas durante a pesquisa, que foram essenciais para o desenvolvimento deste projeto e o meu crescimento como pesquisador.

À Universidade Estadual de Feira de Santana por proporcionar o curso e aos professores do Colegiado de Pós-Graduação em Recursos Genéticos Vegetais.

À Embrapa Semiárido por toda a estrutura física e a CAPES pela concessão da bolsa de estudo.

Aos funcionários dos laboratórios de Solos, Agroambiental, Sanidade Animal e Campos Experimentais da Embrapa Semiárido.

Aos meus amigos do laboratório de genética: Andressa, Carlos, Deisy, Denise, Gleyce, Ítala, Jamile, Juciene, Paloma, Renata, Roberta, Robson, Sirando, Soniane e Washington por contribuírem diretamente para conclusão deste trabalho.

Aos meus amigos de doutorado Marcelo e Carla Maria por todos os momentos que passamos juntos.

... Meus sinceros agradecimentos.

**Não temas, porque eu sou contigo;
não te assombres, porque eu sou teu Deus;
eu te fortaleço, e te ajudo, e te sustento
com a destra da minha justiça.**

Isaías 41:10

SILVA, D. O. M. **Parâmetros de adaptabilidade e estabilidade para produção de grãos, teores de proteínas e minerais em feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) no semiárido brasileiro.** UEFS – Universidade Estadual de Feira de Santana. Tese. p. 190, 2018.

Orientador: Dr. Carlos Antonio Fernandes Santos

RESUMO

Os objetivos deste trabalho foram comparar e avaliar métodos estatísticos de análise de adaptabilidade e estabilidade para o teor de proteínas totais, minerais e produção de grãos em linhagens de feijão-caupi, bem como a retenção desses nutrientes após a cocção, para possibilitar a recomendação e registro de novos cultivares para o semiárido brasileiro. Quarenta e quatro genótipos, distribuídos em dois experimentos de diferentes densidades populacionais, foram avaliados em sete ambientes, nos estados da Bahia, Ceará, Pernambuco e Piauí. Inicialmente, foi realizado a comparação de dez métodos estatísticos de adaptabilidade e estabilidade utilizando apenas dados de produção. Coeficientes de correlação Spearman foram estimados entre os métodos. Para as avaliações de adaptabilidade e estabilidade dos genótipos aplicou-se os métodos de Eberhart e Russell, Lin e Binns e o Modelo de efeitos aditivos principais e interação multiplicativa - AMMI. Para avaliar o efeito da cocção, foram utilizados 24 genótipos, sendo dez linhagens, cinco cultivares comerciais e nove variedades mantidas por agricultores. A quantificação de proteína total foi realizada pelo método de Kjeldhal, e os minerais pelo procedimento padrão da AOAC. As análises estatísticas para os delineamentos experimentais foram efetuadas no SAS pelo procedimento GLM. O método AMMI é o mais indicado devido a disposição gráfica e alta correlação com os demais métodos. A utilização de métodos que apresentam elevada correlação, como os métodos Plaisted e Peterson e Wricke, Annicchiarico e Lin e Binns, que mostram forte associação, e produzem classificações genotípicas similares, não é recomendado. O uso de um deles em combinação com o de Eberhart e Russell ou AMMI pode agregar informação à análise de estabilidade. Foram observadas diferenças estatísticas significativas dos quadrados médios de tratamentos, dos ambientes e das interações ambientes x tratamentos para minerais, proteínas e produção de grãos. As linhagens que apresentaram os maiores teores de proteína e minerais apresentaram produções de grãos abaixo da média geral, nos dois experimentos. Os métodos de Eberhart e Russell, Lin e Binns e o AMMI

apresentam resultados semelhantes quanto a seleção de genótipos superiores. Para o teor de proteína, As linhagens C3Q, C3M, C2S e C1J apresentaram produções de grãos igual ou superior a média geral dos experimentos e média de 27% de proteína. Para os teores de ferro e zinco, a linhagem C4I e T16_2R apresentou produção de grãos igual ou superior a média geral dos experimentos, com valores médios de Fe e Zn, 15% superiores aos valores dos cultivares avaliados. Para os teores de potássio e cálcio, as linhagens C4I e C3O mostraram rendimento de grãos igual ou maior do que a média geral, com média de K e Ca mais elevadas do que os valores dos cultivares avaliados. Todas as linhagens citadas anteriormente apresentaram ampla adaptabilidade e boa estabilidade na série de ambientes avaliados mostrando grande potencial para serem lançados como novos cultivares para o semiárido brasileiro. A cocção teve efeito reduzido nos teores de proteína, potássio, cálcio, ferro e zinco, nos grãos de feijão-caupi. A linhagem CPCR3F6L17 obteve alta produtividade de grãos e elevados teores de proteína, potássio, ferro e zinco, após a cocção, mostrando-se promissora para a região estudada.

Palavras-Chave: Interação genótipo x ambiente, Biofortificação, Nutrição humana, Minerais, Cocção.

SILVA, D. O. M. Adaptability and stability parameters for grain production, protein and mineral contents in cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) in the Brazilian semi-arid region. UEFS – Universidade Estadual de Feira de Santana. Tese. p. 190, 2018.

Orientador: Dr. Carlos Antonio Fernandes Santos

ABSTRACT

The goals of this work were to compare and evaluate statistical methods of analysis of adaptability and stability for total protein, minerals and grain yield in cowpea lines, as well as retention of these nutrients after cooking to enable recommendation and registration of new cultivars for the Brazilian semiarid. Forty-four genotypes, distributed in two experiments of different population densities, were evaluated in seven environments, in the states of Bahia, Ceará, Pernambuco and Piauí. Initially, a comparison was made of ten statistical methods of adaptability and stability using only the production data. Spearman correlation coefficients were estimated between the methods. For the assessments of adaptability and stability of the genotypes the methods of Eberhart and Russell, Lin and Binns and the Model of main additive effects and multiplicative interaction - AMMI were applied. To evaluate the effect of cooking, 24 genotypes were used, including ten lines, five commercial cultivars and nine landraces maintained by farmers. The seed protein content was quantified through the Kjeldahl method. and the minerals by the AOAC standard procedure. The statistical analyzes for the experimental designs were performed in the SAS by the GLM procedure. The AMMI method is most suitable due to the graphical arrangement of both the genotypes and the environments and high correlation with others evaluated methods. The use of highly correlated methods is not recommended, as in the cases of Plaisted and Peterson and Wricke and the methods of Annicchiarico and Lin and Binnsthat show strong association and produce similar genotypic classifications. The use of one of them in combination with that of Eberhart and Russell or AMMI can add information to the stability analysis. Statistically significant differences in the genotype as well as in the genotype×environment interaction for minerals, proteins and grain yield were observed in all the assays. The lines presenting the highest protein contents showed the lowest grain yields, and it indicated the prominent “phenotypic cost” of protein in overall cowpea seed production. The methods by Eberhart and Russell, Lin and Binns and AMMI showed similar results for selection

of superior genotypes. For the protein content, the lines C3Q, C3M, C2S and C1J presented grain yields equal to or greater than the general mean of the experiments and average of 27% of protein. For iron and zinc contents, the line C4I and T16_2R presented grain yield equal to or greater than the general mean of the experiments, with mean values of Fe and Zn 15% higher than the values of the evaluated cultivars. For the potassium and calcium contents, the C4I and C3O strains showed grain yield equal to or greater than the general average, with K and Ca means higher than the values of the cultivars evaluated. All the lines mentioned above presented broad adaptability and good stability in the series of evaluated environments showing great potential to be released as new cultivars for the Brazilian semiarid. Cooking had a reduced effect on protein, potassium, calcium, iron and zinc contents in the cowpea beans. The CPCR3F6L17 obtained high grain yield and high levels of protein, potassium, iron and zinc, after cooking, being promising for the region studied.

Keywords: Genotype x environment interaction, Biofortification, Human nutrition, Minerals, Cooking.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I - COMPARAÇÃO DE MÉTODOS ESTATÍSTICOS DE ADAPTABILIDADE RELACIONADOS À PRODUÇÃO DE GRÃOS EM LINHAGENS DE FEIJÃO-CAUPI

Figura 1. Biplot AMMI para produção de grãos em 20 linhagens e três cultivares (▲) de feijão-caupi (*Vigna unguiculata*) de porte semi ramador (A-PSR) avaliados em sete ambientes (■) irrigados e de sequeiro

Figura 2. Biplot AMMI para produção de grãos em 17 linhagens e quatro cultivares de feijão-caupi (*Vigna unguiculata*) de porte ereto e de crescimento determinado (B-PED) avaliados em sete ambientes (■) irrigados e de sequeiro

CAPÍTULO III – PARÂMETROS DE ADAPTABILIDADE E ESTABILIDADE PARA TEORES DE FERRO, ZINCO E PRODUÇÃO DE GRÃOS EM LINHAGENS DE FEIJÃO-CAUPI NA REGIÃO DO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

Figura 1. Biplot AMMI para produção de grãos em 20 linhagens e três cultivares (▲) de feijão-caupi (*Vigna unguiculata*) de porte semi ramador (A-PSR) e em 17 linhagens e quatro cultivares de feijão-caupi (*Vigna unguiculata*) de porte ereto e de crescimento determinado (B-PED) avaliados em sete ambientes (■) irrigados e de sequeiro

Figura 2. Biplot AMMI para o teor de ferro em 20 linhagens e três cultivares (▲) de feijão-caupi (*Vigna unguiculata*) de porte semi ramador (A-PSR) e em 17 linhagens e quatro cultivares (▲) de feijão-caupi (*Vigna unguiculata*) de porte ereto e de crescimento determinado (B-PED) avaliados em sete ambientes (■) irrigados e de sequeiro

Figura 3. Biplot AMMI para o teor de zinco em 20 linhagens e três cultivares (▲) de feijão-caupi (*Vigna unguiculata*) de porte semi ramador (A-PSR) e em 17 linhagens e

quatro cultivares (▲) de feijão-caupi (*Vigna unguiculata*) de porte ereto e de crescimento determinado (B-PED) avaliados em sete ambientes (■) irrigados e de sequeiro

CAPÍTULO IV – PARÂMETROS DE ADAPTABILIDADE E ESTABILIDADE PARA TEORES DE POTÁSSIO, CÁLCIO E PRODUÇÃO DE GRÃOS EM LINHAGENS DE FEIJÃO-CAUPI

Figura 1. Biplot AMMI para produção de grãos, teores de potássio e cálcio de 20 linhagens e 3 cultivares (▲) de feijão-caupi (*Vigna unguiculata*) de porte semi ramador em sete ambientes (■) irrigado e de sequeiro

Figura 2. Biplot AMMI para produção de grãos, teores de potássio e cálcio de 17 linhagens e 4 cultivares (▲) de feijão-caupi (*Vigna unguiculata*) de porte ereto e de crescimento determinado em sete ambientes (■) irrigados e de sequeiro.

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO I - COMPARAÇÃO DE MÉTODOS ESTATÍSTICOS DE ADAPTABILIDADE RELACIONADOS À PRODUÇÃO DE GRÃOS EM LINHAGENS DE FEIJÃO-CAUPI

Tabela 1. Análise conjunta de variância da produção de grãos em 20 linhagens e três cultivares de feijão-caupi, porte semi ramador (PSR) e em 17 linhagens e quatro cultivares de feijão-caupi, porte ereto e de crescimento determinado (PED), avaliados em sete ambientes no semiárido brasileiro

Tabela 2. Parâmetros de adaptabilidade e estabilidade estimados pelos métodos Tradicional, de Plaisted & Peterson (P&P), de Wricke, de Finlay & Wilkinson (F&W), de Verma, Chahal & Murty (VC&M), de Huehn, de Annicchiarico (ANN), de Eberhart & Russell (E&R), de Lin & Binns (L&B) e de análise AMMI (AMMI) para produção de grãos em 20 linhagens e três cultivares de feijão-caupi, porte semi ramador (PSR), avaliados em sete ambientes no semiárido brasileiro

Tabela 3. Parâmetros de adaptabilidade e estabilidade estimados pelos métodos Tradicional, de Plaisted & Peterson (P&P), de Wricke, de Finlay & Wilkinson (F&W), de Verma, Chahal & Murty (VC&M), de Huehn, de Annicchiarico (ANN), de Eberhart & Russell (E&R), de Lin & Binns (L&B) e de análise AMMI (AMMI) para produção de grãos em 17 linhagens e quatro cultivares de feijão-caupi, porte ereto e de crescimento determinado (PED), avaliados em sete ambientes no semiárido brasileiro

Tabela 4. Estimativas do coeficiente de correlação de Spearman, aplicado às ordens de adaptabilidade e estabilidade de cada par de métodos para produção de grãos em 20 linhagens e três cultivares de feijão-caupi, porte semi ramador (acima da diagonal) e em 17 linhagens e quatro cultivares de feijão-caupi, de porte ereto e de crescimento determinado (abaixo da diagonal) avaliados em sete ambientes no semiárido brasileiro

CAPÍTULO II - PARÂMETROS DE ADAPTABILIDADE E ESTABILIDADE PARA TEOR DE PROTEÍNA TOTAL E PRODUÇÃO DE GRÃOS EM FEIJÃO-CAUPI (*Vigna unguiculata*) SUBMETIDOS A CONDIÇÕES SEMIÁRIDAS

Tabela 1. Quadrado médio total (QMT), quadrado médio do resíduo (QMR), médias e coeficiente de variação (CV) relacionado para produção e teor de proteína em 20 linhagens e três cultivares (Experimento PSR - porte semi ramador) e 17 linhagens e quatro cultivares de feijão-caupi (experimento PED - porte ereto e de crescimento determinado) avaliados em sete ambientes irrigados e de sequeiro.

Tabela 2. Estabilidade e adaptabilidade para produção e teor de proteína em 20 linhagens e três cultivares de feijão-caupi, porte semi ramador (PSR) avaliados em sete ambientes irrigados e de sequeiro utilizando o método Eberhart & Russell, 1966 e Lin & Binns, 1988.

Tabela 3. Estabilidade e adaptabilidade para produção e teor proteína, em 17 linhagens e quatro cultivares de feijão-caupi, porte ereto e de crescimento determinado (PED) avaliados em sete ambientes irrigados e de sequeiro utilizando o método Eberhart & Russell, 1966 e Lin & Binns, 1988.

CAPÍTULO III – PARÂMETROS DE ADAPTABILIDADE E ESTABILIDADE PARA TEORES DE FERRO, ZINCO E PRODUÇÃO DE GRÃOS EM LINHAGENS DE FEIJÃO-CAUPI NA REGIÃO DO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

Tabela 1. Características dos ambientes onde foram avaliados os 44 genótipos de feijão-caupi.

Tabela 2. Quadrado médio total (QMT), quadrado médio do resíduo (QMR), médias e coeficiente de variação (CV) relacionado para produção, teores de ferro e zinco em 20 linhagens e três cultivares (Experimento PSR - porte semi ramador) e 17 linhagens e quatro cultivares de feijão-caupi (experimento PED - porte ereto e de crescimento

determinado) avaliados em sete ambientes irrigados e de sequeiro.

Tabela 3. Estabilidade e adaptabilidade para produção, ferro e zinco em 20 linhagens e três cultivares de feijão-caupi, porte semi ramador (PSR) avaliados em sete ambientes irrigados e de sequeiro utilizando o método Eberhart e Russell, 1966 e Lin e Binns, 1988.

Tabela 4. Estabilidade e adaptabilidade para produção, ferro e zinco em 17 linhagens e quatro cultivares de feijão-caupi, porte ereto e de crescimento determinado (PED) avaliados em sete ambientes irrigados e de sequeiro utilizando o método Eberhart e Russell, 1966 e Lin e Binns, 1988.

Tabela 5. Análise de variância conjunta relacionado para produção, teores de ferro e zinco em 20 linhagens e três cultivares (Experimento PSR - porte semi ramador) e 17 linhagens e quatro cultivares de feijão-caupi (experimento PED - porte ereto e de crescimento determinado) avaliados em sete ambientes irrigados e de sequeiro.

Table 6. Estimativa de correlação de Spearman entre métodos de adaptabilidade e estabilidade para produção de grãos, e teores de ferro e zinco em 20 linhagens e três cultivares (Experimento PSR - porte semi ramador) e 17 linhagens e quatro cultivares de feijão-caupi (experimento PED - porte ereto e de crescimento determinado) avaliados em sete ambientes irrigados e de sequeiro.

CAPÍTULO IV – PARÂMETROS DE ADAPTABILIDADE E ESTABILIDADE PARA TEORES DE POTÁSSIO, CÁLCIO E PRODUÇÃO DE GRÃOS EM LINHAGENS DE FEIJÃO-CAUPI

Tabela 1. Quadrado médio total (QMT), quadrado médio do resíduo (QMR), médias e coeficiente de variação (CV) relacionado para produção, teores de potássio e cálcio em 20 linhagens e três cultivares (Experimento PSR - porte semi ramador) e 17 linhagens e quatro cultivares de feijão-caupi (experimento PED - porte ereto e de crescimento determinado) avaliados em sete ambientes irrigados e de sequeiro.

Tabela 2. Estabilidade e adaptabilidade para produção, potássio e cálcio em 20 linhagens e três cultivares de feijão-caupi, porte semi ramador (PSR) avaliados em sete ambientes irrigados e de sequeiro utilizando o método Eberhart & Russell, 1966 e Lin & Binns, 1988.

Tabela 3. Estabilidade e adaptabilidade para produção, potássio e cálcio, em 17 linhagens e quatro cultivares de feijão-caupi, porte ereto e de crescimento determinado (PED) avaliados em sete ambientes irrigados e de sequeiro utilizando o método Eberhart & Russell, 1966 e Lin & Binns, 1988.

Tabela 4. Análise de variância conjunta relacionado para produção, teores de potássio e cálcio em 20 linhagens e três cultivares (Experimento PSR - porte semi ramador) e 17 linhagens e quatro cultivares de feijão-caupi (experimento PED - porte ereto e de crescimento determinado) avaliados em sete ambientes irrigados e de sequeiro.

CAPÍTULO V - RETENÇÃO DE PROTEÍNAS E MINERAIS APÓS A COCÇÃO EM GENÓTIPOS DE FEIJÃO-CAUPI

Tabela 1. Quadrado médio da produção, cocção e teores de proteína, potássio, cálcio, ferro e zinco em genótipos de feijão-caupi

Tabela 2. Médias de produção, tempo de cocção, diferença entre médias (DM) e teores de proteínas, potássio, cálcio, ferro e zinco de 24 genótipos avaliados antes (AC) e depois (DC) da cocção

Tabela 3. Estimativa de correlação de Pearson entre produção de grãos, cocção e teores de proteína, potássio, cálcio, ferro e zinco de 24 genótipos de feijão-caupi avaliadas após a cocção

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

%	Porcentagem
A	Ambiente
AC	Antes da Cocção
a.C.	Antes de Cristo
ACP	Análise de Componentes Principais
AMMI	Modelo de efeitos aditivos principais e interação multiplicativa
ANN	Annicchiarico
ANOVA	Análise de Variância
AOAC	Associação de Químicos Analíticos Oficiais
BA	Bahia
BRS	Brasil
C	Cocção
Ca	Cálcio
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CE	Ceará
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CPI	componentes principais da interação
CV	Coefficiente de Variação
DC	Depois da Cocção
DHE	Distinguibilidade, Homogeneidade e Estabilidade
DM	Diferença entre Médias
E&R	Eberhart & Russell
FAO	Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura
Fe	Ferro
F&W	Finlay & Wilkinson
G	Genótipo
G	Grama
G x A	Interação Genótipo x Ambiente

GL	Graus de Liberdade
ha	Hectare
HCl	Ácido Clorídrico
IDR	Ingestão Diária Recomendada
I_i	Índice de confiança
IITA	Instituto Internacional de Agricultura Tropical
L&B	Lin & Binns
K	Potássio
kg ha⁻¹	kilograma por hectare
M	Média
M	Metro
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
min	Minutos
mg kg	Miligramas por kilogramas
mL	Mililitro
MPg	Média de Produção de grãos
MPr	Média de Proteína
N	Nitrogênio
OMS	Organização Mundial de Saúde
PE	Pernambuco
PED	Porte ereto de crescimento determinado
PI	Piauí
Pi	Parâmetro de estabilidade
Pi.gen	Parâmetro de estabilidade do genótipo
Pi.fav	Parâmetro de estabilidade a ambientes favoráveis
Pi.unfav	Parâmetro de estabilidade a ambiente desfavoráveis
PSR	Porte Semi ramador
P&P	Plaisted & Peterson
QMR	Quadrado Médio do Resíduo
QMT	Quadrado Médio do Tratamento
QTL	Quantitative Trait Loci

RNC	Registro Nacional de Cultivares
SQ	Soma dos Quadrados
S_{1i}	Média das diferenças entre as classificações do genótipo i nos ambientes
S_{2i}	Variância das classificações do genótipo i nos ambientes
S_{3i}	Soma dos desvios de cada classificação em relação à média das classificações
t	Tonelada
t ha⁻¹	tonelada por hectare
VC&M	Verma, Chahal & Murty
Zn	Zinco
°C	Graus celsius
β₀	média do genótipo
β_i	coeficiente de regressão
σ_{dii}	variância dos desvios da regressão
ω_i	Ecovalência

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	23
REVISÃO DE LITERATURA.....	25
Feijão-Caupi: Origem e Produção.....	25
Importância Social e Econômica do Feijão-Caupi	26
Melhoramento Genético de Feijão-Caupi	27
Programa de Melhoramento Genético de Feijão-Caupi na Embrapa Semiárido	29
Biofortificação do Feijão-Caupi.....	30
Interação Genótipo x Ambiente (GxA).....	31
Métodos de Adaptabilidade e Estabilidade	32
Adaptabilidade e Estabilidade Aplicados no Feijão-Caupi.....	33
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	35
COMPARAÇÃO DE MÉTODOS ESTATÍSTICOS DE ADAPTABILIDADE RELACIONADOS À PRODUÇÃO DE GRÃOS EM LINHAGENS DE FEIJÃO-CAUPI	45
INTRODUÇÃO	48
MATERIAL E MÉTODOS	49
RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
CONCLUSÃO	56
REFERÊNCIAS	57
PARÂMETROS DE ADAPTABILIDADE E ESTABILIDADE PARA TEOR DE PROTEÍNA TOTAL E PRODUÇÃO DE GRÃOS EM FEIJÃO-CAUPI(<i>Vigna unguiculata</i>) SUBMETIDOS A CONDIÇÕES SEMIÁRIDAS.....	67
INTRODUÇÃO	68
RESULTADOS.....	70
DISCUSSÃO.....	72
MATERIAIS E MÉTODOS	75
CONCLUSÃO	77
AGRADECIMENTOS.....	77
REFERÊNCIAS	77
PARÂMETROS DE ADAPTABILIDADE E ESTABILIDADE PARA TEORES DE FERRO, ZINCO E PRODUÇÃO DE GRÃOS EM LINHAGENS DE FEIJÃO-CAUPI NA REGIÃO DO SEMIÁRIDO BRASILEIRO	85

INTRODUÇÃO	87
MATERIAL E MÉTODOS	88
DISCUSSÃO.....	94
CONCLUSÃO	97
REFERÊNCIAS	97
PARÂMETROS DE ADAPTABILIDADE E ESTABILIDADE PARA TEORES DE POTÁSSIO, CÁLCIO E PRODUÇÃO DE GRÃOS EM LINHAGENS DE FEIJÃO-CAUPI	112
INTRODUÇÃO	114
MATERIAL E MÉTODOS	116
RESULTADO E DISCUSSÃO	118
CONCLUSÃO	122
REFERÊNCIAS	123
RETENÇÃO DE PROTEÍNAS E MINERAIS APÓS A COCÇÃO EM GENÓTIPOS DE FEIJÃO-CAUPI	132
INTRODUÇÃO	133
MATERIAL E MÉTODOS	136
RESULTADOS E DISCUSSÃO	138
CONCLUSÃO	143
REFERÊNCIAS	143
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	147
ANEXOS	151

INTRODUÇÃO GERAL

O feijão-caupi é cultivado em mais de 65 países, com grande importância nutricional e econômica. Segundo pesquisadores o oeste da África é o seu centro primário de origem. No Brasil o feijão-caupi foi introduzido no século XVI por colonizadores portugueses, no estado da Bahia, de onde foi levado para outras regiões. A depender da região o feijão-caupi apresenta várias denominações, como feijão de corda, feijão macassar, feijão de praia, feijão miúdo, feijão de colônia, feijão de estrada, feijão fradinho, entre outros.

Dados da FAO mostram que a área plantada no ano de 2017 foi de dez milhões de hectares, produzindo 5 milhões de toneladas, sendo a Nigéria, o Níger e o Brasil, os países mais produtores. No Brasil, região Nordeste se destaca pela alta produção, porém apresenta baixa produtividade. Mas, isso não reflete o potencial genético das cultivares melhoradas, e sim devido a maior parte do cultivo do feijão-caupi ser realizado por pequenos produtores sem adoção de tecnologias.

Muitas empresas vêm trabalhando em parcerias objetivando disponibilizar cultivares mais produtivas e tolerantes aos estresses bióticos e abióticos. O líder de pesquisa é o International Institute of Tropical Agriculture (IITA), outros programas de melhoramento como a Universidade da Califórnia e a Embrapa tem sido fortalecidos e expandidos. No Brasil o melhoramento do feijão-caupi iniciou em 1925, na Embrapa Arroz e Feijão, e depois transferido para Embrapa Meio Norte tendo parceria com outros centros da Embrapa e universidades. Na Embrapa Semiárido o programa de melhoramento de feijão-caupi iniciou-se em 1996, com o objetivo de desenvolver cultivares específicos para a região do Vale do São Francisco, tanto para área dependente de chuva como para área irrigada.

Os principais objetivos do melhoramento do feijão-caupi no Brasil são: melhoria da arquitetura da planta, aumento da produtividade, resistência às principais pragas e doenças, tolerância ao déficit hídrico, precocidade, resposta favorável na associação com bactérias do solo que fixam nitrogênio atmosférico, tolerância à salinidade, maior adequação ao processamento industrial, alta adaptabilidade e estabilidade aos diferentes ambientes de cultivo e melhoria da qualidade comercial e nutricional (proteína e minerais) do grão.

A ausência de proteína e minerais na alimentação tem contribuído negativamente para a saúde pública, afetando quase metade da população mundial, especialmente crianças, adolescentes e mulheres grávidas (Kraemer & Zimmermann 2007). O feijão-caupi apresenta uma grande variabilidade na composição química dos grãos, o que permite a seleção de genótipos com alta concentração nutricional. Além disso, o feijão-caupi é considerado pela

Organização Mundial da Agricultura e Alimentação (Food and Agriculture Organization - FAO) como uma das melhores opções para o aumento de oferta de proteínas, em razão do baixo custo de produção.

Considerando que o feijão-caupi é uma cultura estratégica, do ponto de vista socioeconômico, e a mais importante leguminosa de grãos no semiárido brasileiro, com capacidade de produzir em condições de estresse e de suprir parte das demandas proteicas das populações mais carentes da região. Os programas de melhoramento de feijão-caupi no Nordeste têm desenvolvido variedades com potencial produtivo e resistência a doenças adequada aos sistemas de produção, porém pouco se vê sobre compostos nutricionais, o que se faz necessário já que as fontes de proteína de origem vegetal têm sido amplamente utilizadas para a alimentação humana principalmente para as populações menos favorecidas, em razão do baixo custo.

Diferentemente da produção, estudos de adaptabilidade e estabilidade relacionado ao teor de proteína e minerais em feijão-caupi são escassa na literatura. Diante disso, o objetivo da presente trabalho foi de comparar e avaliar métodos estatísticos de análise de adaptabilidade e estabilidade para o teor de proteínas totais, minerais e produção de grãos em linhagens de feijão-caupi, bem como a retenção desses nutrientes após a cocção, para possibilitar a recomendação e registro de novos cultivares para o semiárido brasileiro.

REVISÃO DE LITERATURA

Feijão-Caupi: Origem e Produção

O feijão-caupi é uma Dicotiledônea pertencente à ordem Fabales, família Fabacea, subfamília Faboideae, tribo Phaseoleae, subtribo Phaseolineae, gênero *Vigna*, secção *Catjang* e espécie *Vigna unguiculata* (L.) Walp. (PADULOSI e NG, 1997). É uma espécie autógama, herbácea e anual (SINGH et al., 2002), considerada rústica, possuidora de ampla capacidade de adaptação e de alto potencial produtivo, características estas, que conferem à cultura grande valor (FREIRE FILHO et al., 2005). Além disso, é uma importante fonte alimentar e componente essencial dos sistemas de produção nas regiões secas dos trópicos, que cobrem parte da Ásia, Estados Unidos, Europa, Oriente Médio e Américas Central e do Sul (SINGH et al., 2002).

A provável origem do nome caupi, uma latinização dos nomes “cow” e “pea”, deve-se ao fato de que esta planta foi uma importante fonte de feno para vacas em muitas partes do mundo (TIMKO et al., 2007). No Brasil, existem várias denominações diferentes, a depender da região: feijão macassar ou feijão-de-corda no Nordeste; feijão-de-praia, feijão-da-colônia, feijão-de-estrada, na região Norte; feijão-miúdo, na região Sul; e feijão-fradinho nos estados da Bahia, Sergipe e Rio de Janeiro (TEIXEIRA et al., 1988; FREIRE FILHO et al., 2011).

Relatos de pesquisadores indicam que o oeste da África é o centro primário de diversidade da espécie (NG; MARÉCHAL, 1985; STEELE; MEHRA, 1980). A partir da África, o feijão-caupi expandiu-se, chegando provavelmente à região da Índia durante o período Neolítico (TIMKO et al., 2007), sendo esta região, considerada o segundo centro de domesticação. No século VIII a.C., a cultura chegou na Europa, onde era negociada com vários países do Mediterrâneo (NEGRI; TOSTI, 2002). No Brasil, acredita-se que o feijão-caupi tenha sido introduzido no século XVI, por colonizadores portugueses, através do estado da Bahia, de onde foi levado para outras regiões do país (FREIRE FILHO et al., 2005).

A organização para alimentação e agricultura das nações unidas estima que são plantados anualmente 10 milhões de hectares em todo o mundo, produzindo cerca de cinco milhões de toneladas de feijão-caupi (FAO 2017). Os países que possuem a maior área cultivada e maiores produções de feijão-caupi do mundo são a Nigéria, Níger e o Brasil, entretanto, as maiores produtividades, acima de 2500 kg ha⁻¹, são observadas na Croácia, República de

Macedônia, Trinidad e Tobago, Bósnia Herzegovina, Egito e Filipinas (FREIRE FILHO et al., 2011).

Na década de 1980, o Brasil era o segundo maior produtor de feijão-caupi, contribuindo com 26% da produção mundial e 82% da produção do continente americano (WATT et al., 1987). Desde então, houve gradativa queda na produção, colocando o Brasil na terceira posição (SINGH et al., 2000), ficando o cultivo em algumas regiões restrito à agricultura de subsistência.

A produção média anual de feijão-caupi no Brasil foi 592,6 mil toneladas em uma área de aproximadamente 1,3 milhões de hectares. A região Nordeste teve uma produção média anual de 327,2 t, confirmando sua superioridade em relação a outras regiões produtoras. Porém, apresentou a menor média de produtividade (303 kg ha⁻¹), em relação às demais regiões (CONAB 2017). Entretanto, essa produtividade não reflete o potencial genético das cultivares melhoradas, pois já foram obtidas, em condições experimentais, produtividades de grão secos acima de 3 t ha⁻¹ (BEZERRA, 1997). A baixa produção reflete principalmente a forma de cultivo feita, predominantemente, por pequenos agricultores numa exploração sem adoção de tecnologia, como controle de pragas e doenças.

A cultura está em expansão para a região Centro-Oeste, principalmente pelos médios e grandes empresários que cultivam de maneira tecnificada. Quando comparado com a região Nordeste, essa região ainda apresenta uma pequena área plantada (172,8 mil hectares) porém se destaca na produtividade (1283 kg ha⁻¹) com superioridade em mais de 400% (CONAB 2017). De acordo com Rocha et al. (2016), a expansão da cultura é resultado do desenvolvimento de variedades em sistema de cultivo totalmente mecanizado, possibilitando a adaptação do produto para alcançar mercados no Brasil e também no exterior.

Em 2013, o Brasil exportou cerca de 24 mil toneladas de feijão-caupi, em um total de US\$ 16,5 milhões, segundo o Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. Sendo a Índia e o Egito os maiores compradores, outros mercados têm sido atendidos, como os Emirados Árabes, Arábia Saudita, China, Israel, Irã e Indonésia (SINIMBU, 2014).

Importância Social e Econômica do Feijão-Caupi

O feijão-caupi (*V. unguiculata* (L.) Walp.) é uma leguminosa cultivada em várias partes do mundo, sendo um alimento básico em mais de 65 países, desempenhando um papel importante na nutrição humana, não só por causa de sua boa qualidade proteica com alto valor

nutricional, mas também por ser fundamental para a alimentação dos animais (BADIANE et al., 2012; SINGH, 2006). No Brasil, constitui um dos alimentos mais consumidos, fornecendo nutrientes importantes como proteína, ferro, zinco e vitaminas (CHAGAS, 1994). Grangeiro et al., (2005), ressaltam que o feijão-caupi é considerado pela Organização Mundial da Agricultura e Alimentação (Food and Agriculture Organization - FAO) como uma das melhores opções para o aumento de oferta de proteínas, em razão do baixo custo de produção.

Na região semiárida do Nordeste brasileiro, que se caracteriza por baixa disponibilidade hídrica, é a principal cultura de subsistência. Nessas condições, ele é cultivado praticamente durante todo o ano, seja em monocultivo ou em consórcio com outras culturas, em sequeiro ou em cultivos irrigados (CARDOSO, 2000). Além do seu alto valor nutritivo, o feijão-caupi apresenta ótima capacidade de fixação de nitrogênio atmosférico, através da simbiose com *Bradyrhizobium japonicum* (FREIRE FILHO et al., 2007), e capacidade de se desenvolver satisfatoriamente em solos de baixa fertilidade, apresentando ainda certa tolerância à salinidade (MELO et al., 2005). Tornou-se uma das principais alternativas sociais e econômicas para as populações rurais nas regiões Norte e Nordeste, e seu cultivo tem se expandido para outras regiões, alcançando novos mercados no país e no exterior (OLIVEIRA et al., 2010; ROCHA et al., 2009).

A comercialização do feijão-caupi é realizada de três formas: grão seco, que representa a quase totalidade do mercado, vagens e grãos verdes. No período de 2005 a 2009, a cultura gerou em média 1.070.150,23 empregos por ano, produziu suprimento alimentar para 27.525.380,63 milhões de pessoas e gerou uma produção anual no valor de R\$ 668.316.241,67 (FREIRE FILHO et al., 2011). Além disso, seus benefícios nutricionais e funcionais vem ganhando importância industrial para ser usado como um ingrediente potencial para formulações alimentares, e a geração de renda do feijão-caupi é de grande importância para o produtor brasileiro, principalmente no nordeste do Brasil (BRASIL, 2008; HAMID et al., 2014). Para que ocorresse esse crescimento, foi fundamental o trabalho de preservação de germoplasma e de melhoramento genético realizado na espécie.

Melhoramento Genético de Feijão-Caupi

O feijão-caupi é uma planta diploide com $2n = 22$ cromossomos (EHLERS; HALL, 1997). É uma planta autógama, com aproximadamente 99% de autofecundação, apresentando na mesma flor o órgão feminino e o órgão masculino, que são protegidos por pétalas,

apresentando ainda o fenômeno da cleistogamia. Por essa razão, as flores do feijão-caupi ao se abrirem nas primeiras horas da manhã já estão polinizadas, por conseguinte é necessário realizar emasculação antes da abertura das anteras para realizar o cruzamento entre parentais (FREIRE FILHO et al., 2005).

Os métodos de melhoramento utilizados em feijão-caupi têm sido os clássicos, aplicados às espécies autógamas. Os métodos mais usados são: introdução de germoplasma; seleção massal em cultivares locais; seleção de planta individual com teste de progênie em cultivares locais; método genealógico; método da descendência de uma única semente - single seed descent (BRIM, 1966; FEHR et al., 1987); método da descendência de uma única vagem - single pod descent (FEHR et al., 1987); método dos retrocruzamentos.

Atualmente muitas empresas de pesquisas privadas, públicas e universidades, vem trabalhando em sistema de parceria, objetivando melhorar a espécie e disponibilizar cultivares de feijão-caupi mais produtivas e tolerantes a estresses bióticos e abióticos visando a sua recomendação para todas as regiões de cultivo (FREIRE FILHO et al., 2011). O líder em pesquisas no mundo é o International Institute of Tropical Agriculture. Entretanto, os programas de melhoramento de feijão-caupi das Universidades da Califórnia e Riverside, nos Estados Unidos, e da Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias (EMBRAPA) no Brasil têm sido fortalecidos e expandidos. De acordo com Nunes (2012), pesquisas significativas sob vários aspectos do melhoramento de feijão-caupi estão sendo também realizadas na Burkina Faso, Índia, Mali, Nigéria e Senegal, dentre outros países.

No Brasil, os trabalhos de melhoramento genético do feijão-caupi começaram por volta de 1925, mas só ganharam maiores dimensões no fim dos anos cinquenta e início da década de sessenta (PAIVA et al., 2014). O Programa de Melhoramento Genético do Feijão-caupi foi iniciado na Embrapa Arroz e Feijão, na década de 1970. Posteriormente, na década de 1990, o programa foi transferido para a Embrapa Meio-Norte onde segue até então, em parceria com outras unidades da Embrapa e instituições de pesquisa (FREIRE FILHO et al., 2005).

Os principais objetivos do melhoramento do feijão-caupi no Brasil são: melhoria da arquitetura da planta, aumento da produtividade, resistência às principais pragas e doenças, tolerância ao déficit hídrico, precocidade, resposta favorável na associação com bactérias do solo que fixam nitrogênio atmosférico, tolerância à salinidade, maior adequação ao processamento industrial, melhoria da qualidade comercial e nutricional (proteína e minerais) do grão e alta adaptabilidade e estabilidade aos diferentes ambientes de cultivo.

Programa de Melhoramento Genético de Feijão-Caupi na Embrapa Semiárido

Na Embrapa Semiárido, o programa de melhoramento de feijão-caupi iniciou-se em 1996 em parceria com a Embrapa Meio Norte. O programa tem como objetivo o desenvolvimento de cultivares específicos para a região do Vale do São Francisco, tanto para área dependente de chuva como para área irrigada, uma vez que, a recomendação de cultivares desenvolvidas em outras regiões não é a melhor opção do ponto de vista agrônomo, além da especificidade do mercado local para tipo de grão (SANTOS, 2008).

O banco de germoplasma da Embrapa Semiárido possui cerca de 1000 acessos de feijão-caupi, incluindo linhagens de cruzamentos diversos. Inicialmente, os trabalhos de melhoramento foram direcionados para produtividade de grãos, porte da planta, precocidade, tamanho e cor de grãos. No período de 2007 a 2010 quatro cultivares (BRS Pujante, Tapaihum, Carijó e Acauã) foram registradas no Ministério da Agricultura, Abastecimento e Pecuária, estando disponíveis para produção de sementes por empresas credenciadas (SANTOS, 2011).

A BRS Pujante, obtida do cruzamento dos genótipos TE 90-180-26F e Epace 10, é recomendada para cultivo nas áreas irrigadas e de sequeiro, na região semiárida dos estados de Pernambuco e Bahia. A BRS Tapaihum, obtida do cruzamento entre a cultivar Epace 11 e o acesso 293588, é a primeira cultivar de tegumento preto registrada no Brasil. A BRS Carijó, obtida do cruzamento entre a cultivar BR 10 Gurgueia e o acesso 293588, é a primeira cultivar do grupo fradinho desenvolvida para as condições de cultivo nos sertões do Pernambuco, Bahia e Piauí. A BRS Acauã resultante do cruzamento entre a BR 10 Gurgueia x Canapu, é a primeira cultivar tipo ‘canapu’ desenvolvida pela pesquisa agropecuária brasileira (SANTOS, 2008).

Os resultados das pesquisas realizadas durante esses 20 anos, incluindo diferentes áreas, estão disponíveis em relatórios técnicos, dissertações, monografias e trabalhos científicos publicados em revistas nacionais e estrangeiras (AQUINO, 2016; AQUINO et al 2016; DDAMULIRA et al., 2015; DDAMULIRA et al., 2017; OHLSON et al., 2018; RODRIGUES, 2011; RODRIGUES et al., 2012; RIBEIRO, 2012; RIBEIRO et al., 2014; RIBEIRO et al., 2016; SANTOS et al. 2008; SANTOS; BOITEUX, 2013; SANTOS; BOITEUX, 2015; SANTOS et al., 2012; SEIDO, 2017; SILVA; SANTOS 2016; SILVA; SANTOS 2017; SILVA et al., 2016; SILVA et al., 2017).

Atualmente, além das características agrônomicas, avaliações dos teores nutricionais têm ganhado destaque no programa de melhoramento genético de feijão-caupi da Embrapa

Semiárido, com o objetivo de melhorar a qualidade e o aproveitamento nutricional. Santos e Boiteux (2013) ressaltam que, o desenvolvimento de cultivares melhoradas, que apresentem maiores teores de proteína e minerais, em combinação com um bom desempenho agrônomico, são considerados componentes importantes em programas que estão focados em eliminar a desnutrição humana.

Biofortificação do Feijão-Caupi

A deficiência nutricional tem aumentado, afetando quase metade da população mundial, especialmente crianças, adolescentes e mulheres grávidas. As últimas estimativas da FAO (2014) é que 805 milhões de pessoas ainda sofrem de fome crônica e não têm acesso à quantidade de alimento recomendada pela Organização Mundial de Saúde para ingestão diária de carboidratos, proteínas e gorduras. A deficiência de proteína e minerais constitui um problema de saúde pública (KRAEMER; ZIMMERMANN, 2007).

A biofortificação é uma estratégia aplicada na agricultura que busca aumentar os teores nutricionais biodisponíveis para o ser humano, em partes comestíveis de plantas cultivadas, representando uma ferramenta adicional para combater a deficiência de nutrientes (GRAHAM et al., 2007; NUTTI et al., 2009). Belarmino et al. (2013) ressaltam que a biofortificação de feijão-caupi, com elevados teores de Fe e Zn, é de relevante importância em programas de melhoramento que visam a obtenção de grãos com maior conteúdo nutricional. Para Freire Filho et al. (2011) a biofortificação do feijão-caupi terá grande impacto no futuro, pois representa uma rica fonte de alimento, principalmente de proteínas, ferro e zinco, para o suprimento da dieta de populações carentes de nutrientes, mas com grande tradição de consumo, como é o caso de muitos países africanos, asiáticos e do nordeste da América do Sul.

Os minerais são de grande importância para saúde humana. O ferro é requerido em todos os tecidos do corpo para funções celulares básicas, sendo muito importante para os músculos, o cérebro e as células vermelhas do sangue (RIOS et al., 2011). Enquanto uma dieta deficiente em zinco pode provocar atraso no crescimento, cicatrização lenta, impotência sexual e intolerância à glicose pela diminuição da produção de insulina (COZZOLINO, 2007). O cálcio é essencial para a contração muscular, tem função no sistema nervoso, na expansão e contração dos vasos sanguíneos (MCDOWELL, 1992). Já o potássio é o terceiro mineral mais abundante no corpo humano e é essencial para a vida humana (COMA, 1991).

O equilíbrio na dieta alimentar melhora a qualidade de vida, reduzindo a ocorrência de doenças provocadas pela ingestão inadequada de nutrientes (GRAHAM et al., 2007). Para Oliveira (2014), iniciativas que obtenham cultivares de feijão-caupi produtivas, biofortificadas, com altos teores de proteína e minerais, adaptadas aos vários ambientes de cultivo, e que sejam disponibilizadas aos agricultores e consumidores, é cada vez mais necessária.

Alguns trabalhos tem demonstrado que o feijão-caupi apresenta uma grande variabilidade da composição química dos grãos, o que possibilita a seleção de genótipos com elevado conteúdo nutricional. Avaliando o potencial de 28 populações F1 e oito populações F3, Carvalho et al. (2011) verificaram que os teores de ferro e zinco variaram, respectivamente, de 64,66 a 102 mg kg⁻¹ e 36 a 55,33 mg kg⁻¹. Freire Filho et al. (2011), estudando oito cultivares de feijão-caupi, encontraram teor de ferro variando de 48,8 a 77,4 mg kg⁻¹ e teor de zinco, de 35,6 a 53,7 mg kg⁻¹.

Santos e Boiteux (2013) avaliaram linhagens resultantes de seis cruzamentos, envolvendo parentais com altos teores de proteína e minerais e alta produtividade, e encontraram variação de 36,5 a 137 mg kg⁻¹ para o teor de ferro, e 36,00 a 58,00 mg kg⁻¹ para o teor de zinco na semente. A média do teor de proteína foi de 28,2%. Os autores concluíram que é possível a obtenção de cultivares de feijão-caupi, combinando altos valores de minerais e proteína para a dieta humana.

Interação Genótipo x Ambiente (GxA)

Nos programas de melhoramento, na fase de seleção e, principalmente, na fase de recomendação, o conhecimento do componente interação genótipo x ambiente é de grande importância. Para Cruz et al. (2012) a presença dessa interação é decorrente do comportamento diferenciado de materiais genéticos frente à variação do ambiente, sendo este um fator que dificulta a seleção de genótipos mais adaptados.

Para Ramalho et al. (2008), a interação genótipos por ambientes é o principal complicador do trabalho dos melhoristas, exigindo que o melhoramento seja conduzido nas condições em que o genótipo será utilizado. Este fenômeno é caracterizado quando o comportamento dos genótipos não é consistente nos diferentes ambientes. Ou seja, as condições ambientais influenciam nas respostas dos genótipos. Este autor afirma que indivíduos geneticamente distintos desenvolvem-se de modo diferente, no mesmo ambiente, mas também indivíduos

geneticamente idênticos desenvolvem-se desigualmente em ambientes distintos. Quando um mesmo grupo de genótipos é avaliado, em diferentes condições ambientais (locais, épocas ou anos), o ambiente pode alterar a expressão de um determinado caráter em tais genótipos. Assim, a interação genótipo x ambiente é entendida como sendo o comportamento relativo dos genótipos às alterações ambientais.

Para Lin e Binns (1988), conceitualmente, o efeito do ambiente sobre o genótipo depende de dois elementos principais: solo e clima. O solo é persistente de ano para ano e pode ser considerado como elemento fixo. Porém o clima é mais complexo, uma vez que este é constituído por uma parte persistente (zona climática) e outra parte imprevisível, representada por variações do tempo de ano para ano.

Chaves (2001) acrescenta que no melhoramento de plantas, considerações a respeito da interação de genótipos com ambientes são essenciais para a eficiência do processo. Isto porque a maioria dos caracteres de importância para o melhoramento, nas diferentes espécies, são caracteres métricos. Estes caracteres apresentam distribuição contínua, possuem herança poligênica e sofrem grande influência das variações ambientais. Araújo (2008) afirma que uma população que ocupa uma área geográfica com ampla variação ambiental, estará sujeita a pressões de seleção diferentes, ao longo de sua extensão espacial. Uma alternativa para amenizar a influência dessa interação é avaliar os genótipos no maior número possível de ambientes e aplicar métodos que os classifiquem conforme sua adaptabilidade e estabilidade.

Métodos de Adaptabilidade e Estabilidade

Na literatura existem diferentes definições sobre adaptabilidade e estabilidade de plantas. Cruz et al. (2012) definiram adaptabilidade como a capacidade de os genótipos aproveitarem vantajosamente o estímulo do ambiente. E estabilidade sendo a capacidade de os genótipos mostrarem um comportamento altamente previsível em função do estímulo do ambiente. Diversos métodos têm sido propostos para investigar a adaptabilidade e estabilidade de feijão-caupi, e as análises aplicadas têm sido motivo de vários estudos, predominando o uso de metodologias que utilizam regressão linear, principalmente as de Eberhart e Russell (1966) e de Cruz et al. (1989), não paramétricas, como a de Lin e Binns (1988), e multivariadas, como o modelo de efeitos aditivos principais e interação multiplicativa (AMMI).

A utilização do método proposto por Eberhart e Russell (1966) possibilita a identificação de cultivares de feijão com comportamento previsível. O processo em si está baseado na

análise de regressão linear, em que o índice ambiental é a variável independente, e a média do caráter avaliado de cada cultivar, em cada ambiente, é a variável dependente (EBERHART; RUSSELL, 1966). O coeficiente de regressão está associado ao componente linear, indicando a adaptabilidade do genótipo, sendo estimado por $Y_{ij} = \beta_0 + \beta_i I_j + S_{di}^2$, onde Y_{ij} é a média do genótipo i no ambiente j ; β_0 é a média do genótipo i em todos os ambientes; β_i é o coeficiente de regressão; I_j é o índice de ambiente e S_{di}^2 é o desvios da regressão, mais o erro experimental contido em Y_{ij} .

Lin e Binns (1988) definiram como medida para estimar a adaptabilidade e estabilidade, o quadrado médio da distância entre a média da cultivar e a resposta média máxima obtida no ambiente. A classificação dos ambientes baseia-se nos índices definidos como a diferença entre a média dos genótipos avaliados em cada local e a média geral, sendo o parâmetro P_i denominado como medida de adaptabilidade e estabilidade de comportamento. Assim, o estimador é dado por $P_i = \sum_{j=1}^n (Y_{ij} - M_j)^2 / 2n$, onde P_i é a estimativa do parâmetro de estabilidade do genótipo i ; Y_{ij} é o comportamento do genótipo i no ambiente j ; M_j é a resposta máxima observada entre todos os genótipos no ambiente j ; e n é o número de ambientes.

A metodologia de efeitos aditivos principais e interação multiplicativa (AMMI) destaca-se por descrever melhor a interação genótipo x ambiente, mediante o descarte de ruídos adicionais, presentes nas estimativas tradicionais da interação. Utiliza conjuntamente a análise de variância para os efeitos principais de genótipos e ambientes e a Análise dos Componentes Principais (ACP) para a interação. Procura identificar os genótipos mais estáveis e adaptáveis, e realiza o zoneamento agrônômico dos ambientes (DUARTE e VENCOVSKY, 1999).

Adaptabilidade e Estabilidade Aplicados no Feijão-Caupi.

Avaliando o comportamento de 64 linhagens e 4 cultivares de feijão-caupi, em diversos ambientes no Vale do São Francisco, Santos et al. (2008) por meio da metodologia de Eberhart e Russell (1966) detectaram que a linhagem PC 95-05-12-2-2 apresentou média dos grãos alta, valor do β_i próximo de 1,0 e o S_{di}^2 próximo de zero, indicando ser um genótipo com adaptabilidade ampla e altamente previsível, sendo lançada como cultivar BRS Pujante. Oliveira (2008), também utilizou o método Eberhart e Russell para avaliação da adaptabilidade e estabilidade da produtividade de grãos de feijão-caupi, no semiárido

piauiense, e por meio desta metodologia indicou as cultivares Canapuzinho, Canapu-BA e BRS Xiquexique.

Utilizando o método de efeitos principais aditivos e interação multiplicativa (AMMI) na produtividade de 20 genótipos de feijão-caupi, Rocha et al. (2007) observaram que as linhagens TE-97-321G-4, EVX-92-49E e EVX-63-10E apresentaram alta adaptabilidade, mas somente a última foi altamente previsível, e que a cultivar BRS Guariba e as linhagens EVX-92-49E e TE97-321G-4 expressaram melhor potencial genético em ambientes de alta produtividade. Com o mesmo método, Freire Filho et al. (2005) observaram que os genótipos Evx 47-6E e Evx 92-49E mostraram-se adaptados a ambientes de baixa produtividade, enquanto que o genótipo Evx 63-10E apresentou a maior média e adaptação específica a ambientes de alta qualidade.

Utilizando três metodologias paramétricas e uma metodologia não-paramétrica, Nunes et al. (2014) observaram que a regressão linear indicou que as cultivares Califórnia Blackeye-3 e Califórnia Blackeye-5 tinham estabilidade e grande capacidade de adaptação. O modelo de regressão bi-segmentado indicou que os genótipos MNC04-783B-7-3 e Califórnia Blackeye-3 apresentaram adaptação às condições ambientais favoráveis e desfavoráveis, respectivamente. O método não-paramétrico destacou a linhagem MNC04-783B-7-3 como o genótipo mais adequado e estável.

Diferentemente da produção, estudos de adaptabilidade e estabilidade relacionado ao teor de proteína e minerais em feijão-caupi são escassa na literatura. Com exceção do trabalho de Santos e Vitorino (2013), que estimaram parâmetros de estabilidade e adaptabilidade para o teor total de proteínas em linhagens de feijão-caupi, utilizando o método Eberhart e Russell (1966), não foi encontrado outros estudos de adaptabilidade e estabilidade relacionado ao teor de proteína e minerais em feijão-caupi. No estudo citado, os autores apresentaram linhagens sendo potenciais candidatas para serem recomendadas como novas cultivares para a região do Vale do São Francisco, desde que apresentem produtividades de grãos compatíveis com as cultivares comerciais disponíveis para a região.

Embora existam programas que vêm tentando manter a alta produtividade e elevar o conteúdo nutricional dos grãos de feijão caupi, estes têm se limitado a metodologias convencionais de melhoramento genético e necessitariam de um impulso visando aumentar sua eficiência (SINGH et al., 2002). Lemos et al. (2004) observaram que os genótipos de feijão com produtividade de grãos abaixo da média experimental apresentaram os maiores teores de proteína bruta. Enquanto Moura et al. (2012), ressaltaram que o rendimento de grãos apresentou correlação negativa para os teores de ferro e zinco. Tal fator limitante poderia ser

minimizado de forma complementar com o uso de ferramentas da biotecnologia moderna, especialmente pelo uso de marcadores moleculares tanto na caracterização, na avaliação e no manejo de germoplasma, como na identificação de cultivares e no desenvolvimento de mapas genéticos.

De acordo com Timko, (2007), há uma necessidade da utilização de ferramentas biotecnológicas modernas para complementar melhoramento convencional em feijão-caupi. Tais esforços devem concentrar-se no desenvolvimento de marcadores moleculares e protocolos para uso em seleção assistida por marcadores, sendo que o suporte para tais esforços devem vir de uma cooperação de programas de melhoramento de instituições públicas e privadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AQUINO, D. A. L. Variabilidade fenotípica e estimativas de parâmetros de adaptabilidade e estabilidade para produção de grão verde em genótipos de feijão-caupi. **Dissertação de Mestrado** – UFRPE. 68p. 2016.

AQUINO, D. A. L.; SANTOS, C. A. F.; SILVA, D. O. M. Adaptability and stability parameters for immature seeds and pods and mature dried seeds in cowpea genotypes in Brazil northeast. **African Journal of Agricultural Research**, v. 11, p. 5071-5079, 2016.

ARAÚJO, M. F. C. Teste estatístico para contribuição de genótipos e ambientes na matriz de interação GE. **Dissertação de Mestrado** ESALQ/USP, Piracicaba, 113p. 2008.

BADIANE, F.A.; GOWDA, B.S.; CISSÉ, N.; DIOUF, D.; SADIO, O.;TIMKO, M. P. Genetic relationship of cowpea (*Vigna unguiculata*) varieties from Senegal based on SSR markers. **Genetics and Molecular Research** v. 11, n. 1, p. 292-304, 2012.

BELARMINO, L. C.; NOGUEIRA, A. C. W.; AMORIM, L. L. B.; WINTER, P. KAHL, G.; BENKO-ISEPPON, A. M. B. Genetic components useful for iron and zinc biofortification in *Vigna unguiculata* (L.) Walp. **III Congresso nacional de feijão-caupi**. Recife. 2013.

BEZERRA, A. A. C. Variabilidade e diversidade genética em caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) precoce, de crescimento determinado e porte ereto e semi-ereto. **Dissertação de Mestrado** - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife. 105p. 1997.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Projeções do Agronegócio Brasil 2008/09 a 2018/19**. 2008. Disponível em: http://www.agricultura.gov.br/arq_editor/file/Ministerio/planos%20e%20programas/projecoes%20do%20agronegocio.pdf. Acesso em: 15 Jun. 2015.

BRIM, C.A. A modified pedigree method of selection in soybeans. **Crop Science**, Madison, v. 6, p. 220, 1966.

CARDOSO, M. J. (Org.). **A cultura do feijão caupi no Meio-Norte do Brasil**. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2000. 263 p. (Embrapa Meio-Norte. Circular Técnica, 28).

CARVALHO, L. C. B.; DAMASCENO-SILVA, K. J.; ROCHA, M. M.; FRANCO, L. J. D.; SILVA, L. R. A.; CARVALHO, J. S.; SOUSA, C. M. B.; SILVA, J. D. L. Avaliação de populações biofortificadas em feijão-caupi por meio de cruzamentos dialélicos. In: Reunião de Biofortificação no Brasil, 4., 2011, Teresina. **Anais**. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2011. 1 CD-ROM.

CHAGAS, J.M. Considerações sobre a cultura de feijão de inverno em Minas Gerais. **Informe Agropecuário**, v.17, n.178, 1994

CHAVES, L.J. Interação de genótipos com ambientes. In: NASS, L.L.; VALOIS, A.C.C.; MELO, I.S. de; VALADARES-INGLIS, M.C. (Ed.). **Recursos genéticos e melhoramento – plantas**. Rondonópolis: Fundação MT, 2001. p.673-713.

COMA - Committee on Medical Aspects of Food Policy. **Dietary Reference Values for Food Energy and Nutrients for the United Kingdom**, N. 41. Department of Health. HMSO, London. 1991.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**. v. 4 – Safra 2016/2017. Quarto levantamento, Brasília, p. 1-162, 2017.

COZZOLINO, S. M. F. **Deficiências de minerais. Estudos Avançados**, São Paulo, v. 60, p. 119-126, 2007.

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

CRUZ, C.D.; TORRES, R.A. de A.; VENCOVSKY, R. An alternative approach to the stability analysis proposed by Silva and Barreto. **Revista Brasileira de Genética**, Ribeirão Preto, v.12, n.3, p.567-80, 1989.

DDAMULIRA, G.; SANTOS, C. A. F.; OBUO, P.; ALANYO, M.; LWANGA, C. K. Grain Yield and Protein Content of Brazilian Cowpea Genotypes under Diverse Ugandan Environments. **American Journal of Plant Sciences**, v. 06, p. 2074-2084, 2015.

DDAMULIRA, G.; SANTOS, C. A. F.; ALANYO, M.; RAMATHANI, I. D. D.; MAPHOSA, M. Maturity, protein content and yield stability of cowpea in Uganda. **South African Journal of Plant and Soil**, v. 34, p. 255-261, 2017.

DUARTE, J.B.; VENCOVSKY, R. Interação genótipo x ambientes: uma introdução à análise AMMI. Ribeirão Preto: **Sociedade Brasileira de Genética**, 1999. 60p.

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

EHLERS, J. D. HALL, A. E. Cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp.). **Field Crops Research** v. 53, p. 187-204, 1997.

FAO. Human **Vitamin and Mineral Requirements**. In: Report 7^a Joint FAO/OMS Expert Consultation. Bangkok, Thailand, 286p. 2001.

FAO. FAOSTAT. Crops. Cow peas, dry. Disponível em: <http://faostat3.fao.org/browse/Q/QC/E>. Acesso em 23 de novembro de 2017.

FAO, IFAD and WFP. The State of Food Insecurity in the World 2014. **Strengthening the enabling environment for food security and nutrition**. Rome, FAO. 2014.

FEHR, W. R.; FEHR, E. L.; JESSEN, H. J. **Principles of cultivar development: theory and technique**. New York: Macmillan, v. 1, p. 319-327, 1987.

FREIRE FILHO, F. R.; RIBEIRO, V. Q.; BARRETO, P. D.; SANTOS, A. A. Melhoramento genético. In: FREIRE FILHO, F. R.; LIMA, J. A. A.; RIBEIRO, V. Q. (eds). **Feijão-caupi: Avanços tecnológicos**. Brasília, Embrapa Informação Tecnológica. p. 27-92, 2005.

FREIRE FILHO, F. R.; RIBEIRO, V. Q.; ROCHA, M. de M.; DAMASCENO-SILVA, K. J.; NOGUEIRA, M. do S. da R.; RODRIGUES, E. V. **Feijão-caupi: produção, melhoramento genético, avanços e desafios**. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 84p. 2011.

FREIRE FILHO, F. R.; ROCHA, M. M.; RIBEIRO, V. Q.; LOPES, A. C. A. Adaptabilidade e estabilidade produtiva de feijão-caupi. **Ciência Rural**, v.35, p.24-30, 2005.

FREIRE FILHO, F. R.; VILARINHO, A. A.; CRAVO, M. S.; CAVALCANTE, E. S. Panorama da cultura do feijão-caupi no Brasil. In: Workshop sobre a cultura do feijão-caupi em Roraima, 2007, Boa Vista. **Anais...** Boa Vista, Embrapa Roraima, p. 2-12, 2007.

GRANGEIRO, T. B. Composição bioquímica da semente. In: FREIRE FILHO, F. R.; LIMA, J. A. de A.; RIBEIRO, V. Q. (Ed.). **Feijão-caupi: avanços tecnológicos**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Teresina: Embrapa Meio-Norte, p. 338-365, 2005.

GRAHAM, R. D.; WELCH, R. M.; SAUNDERS, D. A.; ORTIZ-MONASTERIO, L.; OUIS, H. E.; BONIERBALE, M.; HAAN, S.; BURGOS, G.; THIELE, G.; LIRIA, R.; MEISNER, C. A.; BEEBE, S. E.; POTTS, M. J.; KADIAN, M.; HOBBS, P. R.; GUPTA, R. K.; TWOMLOW, S. **Nutritious subsistence food systems, Advances in Agronomy**. v. 92, p. 1-74, 2007.

HAMID, S.; MUZAFFAR, S.; WANI, I.A.; MASOODI, F. A.; BHAT, M. M. Physical and cooking characteristics of two cowpea cultivars grown in temperate Indian climate. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**, 2014.

KRAEMER, K.; ZIMMERMANN, M. B. Nutritional anemia. **Sight and Life Press**. Basel, Switzerland, p. 45-58, 2007.

LEMOS, L. B.; OLIVEIRA, R. S.; PALOMINO, E. C.; SILVA, T. R. B. Características agronômicas e tecnológicas de genótipos de feijão do grupo comercial Carioca. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 4, p. 319-326, 2004.

LIN, C. S.; BINNS, M. R. A superiority measure of cultivar performance for cultivars x location data. **Canadian Journal of Plant Science**, v.68, n.1, p.193-198, 1988.

MCDOWELL, L. R. **Minerals in Animal and Human Nutrition**. Academic Press Inc., CA, USA. 1992

MELO, F. de B.; CARDOSO, M. J.; SALVIANO, A. A. C. Fertilidade do solo e adubação. In: In: FREIRE FILHO, F. R.; LIMA, J. A. A.; RIBEIRO, V. Q. (eds). **Feijão-caupi: Avanços tecnológicos**. Brasília, Embrapa Informação Tecnológica. p. 231-242, 2005.

MOURA, J.O; ROCHA, M. M.; GOMES, R. L. F.; FREIRE FILHO, F. R.; SILVA, K. J. D. Path analysis of iron and zinc contents and others traits in cowpea. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 12, n. 4, p. 245-252, 2012.

NEGRI V, TOSTI N. Phaseolus genetic diversity maintained on-farm in central Italy. **Genetic Resources and Crop Evolution**, v. 49, p. 511–520. 2002.

NG, N.Q.; MARÉCHAL, R. Cowpea taxonomy, origin germoplasm. In: SINGH, S. R.; RACHIE, K. O. (Ed.). **Cowpea research, production and utilization**. Chichester: John Wiley, p.11- 21. 1985.

NUNES, H. F. Adaptabilidade e estabilidade da produtividade de grãos de genótipos de feijão-caupi do tipo fradinho em cultivos de sequeiro e irrigado. **Dissertação de Mestrado**. Universidade Federal do Piauí, 106p. 2012.

NUNES, H.F.; FREIRE FILHO, F.R.; RIBEIRO, V.Q.; GOMES, R.L.F. Grain yield adaptability and stability of blackeyed cowpea genotypes under rainfed agriculture in Brazil. **African Journal Agricultural Research**, v. 9, p. 255-261, 2014.

NUTTI, M.R.; ROCHA, M.M.; WATANABE, E.; CARVALHO, J.L.V. de; FREIRE FILHO, F.R.; SILVA, K.J.D. e. Biofortificação de feijão-caupi no Brasil. In: CONGRESSO NACIONAL DE FEIJÃO-CAUPI, 2., 2009, Belém, PA. Da agricultura de subsistência ao agronegócio: **Anais**. Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, p. 26-38. 1 CD-ROM. 2009.

OHLSON, E.; SEIDO, S.L.; MOHAMMED, S.; SANTOS, C.A.F.; TIMKO, M. QTL mapping of ineffective nodulation and nitrogen utilization-related traits in the ic-1 mutant of cowpea. **Crop Science**, v. 58, p. 1-9, 2018.

OLIVEIRA, D.G. Seleção simultânea para produção, biofortificação e culinária em populações segregantes de feijão-caupi. **Dissertação de Mestrado** (Genética e Melhoramento) – Universidade Federal do Piauí, Teresina, 71p. 2014.

OLIVEIRA, J.T.S. Seleção de genótipos tradicionais e melhorados de feijão-caupi adaptados a região semi-árida piauiense. **Dissertação de Mestrado** - Universidade Federal do Piauí, Teresina. 62p. 2008.

OLIVEIRA, O.M.S.; SILVA, J.F.; GONCALVES, J.R.P.; KLEHM, C.S. Período de convivência das plantas daninhas com cultivares de feijão-caupi em várzea no Amazonas. **Planta daninha**, v. 28, n. 3, p. 523-530, 2010.

PADULOSI, S.; NG, N. Q. Origin, taxonomy, and morphology of *Vigna unguiculata* (L.) Walp. In. SING, B. B.; MOHAN RAJ, D. R.; DASHIEL, K. E.; JACKAI, L. E. N. (Ed.) **Advances in cowpea research**. Ibadan: **International Institute of Tropical Agriculture**; Tsukuba: Japan International Research Center for Agricultural Sciences, p.1-11. 1997.

PAIVA, B.J. FREIRE FILHO, F.R. TEÓFILO, E.M. RIBEIRO, V.Q. **Feijão-caupi: melhoramento genético no Centro de Ciências Agrárias**. Fortaleza: Edições UFC, 2014.

RAMALHO, M. A. P.; SANTOS, J. B. dos; PINTO, C. A. B. P. **Genética na agropecuária**. 4, ed. Lavras: UFLA, 461 p. 2008.

RIBEIRO, H.L.C. Estimação de parâmetros genéticos e análise de trilha para caracteres da arquitetura da planta de feijão caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.). **Dissertação de Mestrado**. UEFS – Universidade Estadual de Feira de Santana. 76p. 2012.

RIBEIRO, H.L.C. ; SANTOS, C.A.F. ; BOITEUX, L.S. Genetic parameters of earliness and plant architecture traits suitable for mechanical harvesting of cowpea (*Vigna unguiculata*). **Australian Journal of Crop Science**, v. 8, p. 1232-1238, 2014.

RIBEIRO, H.L.C.; SANTOS, C.A.F.; DINIZ, L.S.; NASCIMENTO, L.A.; NUNES, E.D. Phenotypic correlations and path analysis for plant architecture traits and grain production in three generations of cowpea. **Revista Ceres** (Online), v. 63, p. 33-38, 2016.

RIOS, S.A.; PAES, M.C.D.; ABREU, S.C.; CARDOSO, W.S. Deficiências nutricionais e a biofortificação de alimentos. In: BORÉM, A.; RIOS, S. A. (Ed.). **Milho biofortificado**. Visconde do Rio Branco: Suprema, p. 9-21. 2011.

ROCHA, M.M.; CARVALHO, K.J.M.; FREIRE FILHO, F.R.; LOPES, A.C.A.; GOMES, R.L.F.; SOUSA, I.S. Controle genético do comprimento do pedúnculo em feijão-caupi. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, n. 3, p. 270-275, 2009.

ROCHA, M. M.; CARVALHO, K. J. M.; MENESEZ JÚNIOR, J. A. N.; HASHIMOTO, J. M.; NEVES, A. C.; SOUSA, F. M. **Feijão-caupi: melhoramento genético para o avanço da cultura**. Embrapa Meio Norte, Teresina. 2016.

ROCHA, M. de M.; FREIRE FILHO, F.R.; RIBEIRO, V.Q.; CARVALHO, H.W.L. de; BELARMINO FILHO, J.; RAPOSO, J.A.A.; ALCÂNTARA, J. dos P.; RAMOS, S.R.R.; MACHADO, C. de F. Adaptabilidade e estabilidade produtiva de genótipos de feijão-caupi de

porte semi-ereto na região Nordeste do Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.42, p.1283-1289, 2007.

RODRIGUES, M. A. Identificação e mapeamento de marcadores associados a locos de resistência a virose do mosaico dourado em feijão caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.). **Dissertação de Mestrado** (Recursos Genéticos Vegetais) UEFS. 54p. 2011.

RODRIGUES, M.A.; SANTOS, C.A.F.; SANTANA, J.R.F. Mapping of AFLP loci linked to tolerance to cowpea golden mosaic virus. **Genetics and molecular research**, v. 11, p. 3789-3797, 2012.

SANTOS, C.A.F. BRS Tapaihum, BRS Carijó e BRS Acauã: novas cultivares de feijão caupi para o vale do São Francisco. In: Congresso Brasileiro de Olericultura, 51. **Anais..** Viçosa: ABH. p. 3086-3094, 2011.

SANTOS, C.A.F.; COSTA, D. C. C. ; SILVA, W.R. ; BOITEUX, L.S. Genetic analysis of total seed protein content in two cowpea crosses. **Crop Science**, v. 52, p. 2501, 2012.

SANTOS, C.A.F.; BOITEUX, L.S. Breeding biofortified cowpea lines for semi-arid tropical areas by combining higher seed protein and mineral levels. **Genetics and Molecular Research**, v. 12, n. 4, p. 6782-6789, 2013.

SANTOS, C. A. F.; BOITEUX, L. S . Genetic control and transgressive segregation of zinc, iron, potassium, phosphorus, calcium, and sodium accumulation in cowpea (*Vigna unguiculata*) seeds.. **Genetics and Molecular Research**, v. 14, p. 259-268, 2015.

SANTOS, C. A. F.; BARROS, G. A. de A.; SANTOS, I. C. N.; FERRAZ, M. G. de S. Comportamento agrônomo e qualidade tecnológica de grãos de linhagens de feijão-caupi avaliadas no Vale do São Francisco. **Horticultura Brasileira**, v. 26, p. 404-408, 2008.

SANTOS, C. A. F.; VITORINO, W. R. S. Adaptabilidade e estabilidade de linhagens de feijão-caupi para teor de proteína total no vale do são francisco. **III Congresso Nacional de Feijão Caupi**. Recife, PE. 2013.

SEIDO, S. L. Estudos biométricos e de QTL associados à fixação biológica de nitrogênio em feijão-caupi. **Tese de doutorado** – UFRPE. 136p. 2017.

SILVA, D.O.M.; SANTOS, C.A.F. Adaptability and stability parameters of iron and zinc concentrations and grain yield in cowpea lines in the Brazilian semiarid region. **Crop Science**, v. 58, p. 1-12, 2017.

SILVA, D.O.M.; SANTOS, C. A. F. Adaptability and stability parameters for potassium and calcium contents and grain yield in cowpea lines. **African Journal of Agricultural Research**, v. 36, p. 3366-3374, 2016.

SILVA, D.O.M.; SANTOS, C. A. F.; BOITEUX, L. S. Adaptability and stability parameters of total seed yield and protein content in cowpea (*Vigna unguiculata*) genotypes subjected to semi-arid conditions. **Australian Journal of Crop Science**, v. 8, p. 1164-1169, 2016.

SILVA, D.O.M.; SANTOS, C. A. F.; SEIDO, S. L.; COELHO, W.C.P.; AQUINO, D. A. L. Retention of proteins and minerals after cooking in cowpea genotypes¹. **Pesquisa Agropecuaria Tropical** (Online), v. 47, p. 353-359, 2017.

SINGH, B. B.; MATSUI, T.; Cowpea varieties for drought tolerance. In: FATOKUN, C. A.; TARAWALI, S. A.; SINGH, B. B.; KORMAWA, P. W.; TAMÓ, M. (Eds.) **Challenges and Opportunities for Enhancing Sustainable Cowpea Production**. Ibadan: International Institute of Tropical Agriculture, p.287-300. 2002.

SINGH, B. B. Cowpea breeding at IITA: highlights of advances impacts. In: CONGRESSO NACIONAL DE FEIJÃO-CAUPI, 1.; REUNIÃO NACIONAL DE FEIJÃO-CAUPI, 6., 2006, Teresina. Tecnologias para o agronegócio: **Anais**. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2006. 1 CD-ROM. (Embrapa Meio-Norte. Documentos, 121).

SINGH, B.B., EHLERS, J.D., SHARMA, B. AND FREIRE-FILHO, F.R. Recent progress in cowpea breeding. In: Fatokun, C.A., Tarawali, S.A., Singh, B.B., Kormawa, P.M. and Tamò, M (Eds.) **Challenges and opportunities for enhancing sustainable cowpea production**. Proceedings of the World Cowpea Conference III held at the International Institute of Tropical Agriculture (IITA), Ibadan, Nigeria. pp. 185-195. 2000.

SINIMBU F. **Feijão-caupi conquista mercado internacional**. Embrapa Meio-Norte. 2014. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/2006738/feijao-caupi-conquista-mercado-internacional>. Acesso em 08 Jan 2018.

STEELE, W. M, MEHRA, K. L. Structure, evolution and adaptation to farming system and environment in *Vigna*. In: SUMMERFIELD, D. R; BUNTING, A. H. (eds.) **Advances in legume science**. England: Royol Botanic Gardens, p. 459-468. 1980.

TEIXEIRA, S. M.; MAY, P. H.; SANTANA, A. C. Produção e importância econômica do caupi no Brasil. In: ARAÚJO, J.P.P. de; WATT, E.E., org. **O caupi no Brasil**. (Goiânia: EMBRAPA-CNPAP/Ibadan: IITA, p.101-136. 1988.

TIMKO, M. P.; EHLERS, J. D. ROBERTS, P. A. Cowpea. In: C. KOLE (ed) Pulses, Sugar and Tuber Crops, Genome Mapping and Molecular Breeding in Plants, **Springer – Verlag**, v. 3, p. 49-67.2007.

WATT, E. E.; ZIMMERMANN, F. J. P.; FONSECA, J. R.; FREIRE, M. S. Coleções de germoplasma de caupi: conservação e avaliação no Brasil. In: Araújo, J. P. P. de; Watt, E. E. (Org.). **O Caupi no Brasil**. Brasília: Embrapa-CNPAP; Ibadan, IITA, p. 234-248.1987.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). Meeting of Interested Parties (MIP) 2001. **Micronutrient deficiencies: battling iron deficiency anaemia**. Geneva, 2001. Disponível em: <http://www.who.int/mip2001/files/2232/NHDbrochure.pdf>. Acesso em: 22 Jun. 2015.

CAPÍTULO I

COMPARAÇÃO DE MÉTODOS ESTATÍSTICOS DE ADAPTABILIDADE RELACIONADOS À PRODUÇÃO DE GRÃOS EM LINHAGENS DE FEIJÃO-CAUPI

Artigo – Comparação de métodos estatísticos de adaptabilidade relacionados à produção de grãos em linhagens de feijão-caupi, submetido à Pesquisa Agropecuária Tropical, em 12/02/2018

COMPARAÇÃO DE MÉTODOS ESTATÍSTICOS DE ADAPTABILIDADE RELACIONADOS À PRODUÇÃO DE GRÃOS EM LINHAGENS DE FEIJÃO-CAUPI

RESUMO

A interação genótipo x ambiente constitui-se um dos maiores problemas dos programas de melhoramento, seja na fase de seleção, como na recomendação dos cultivares. Entre as alternativas para se amenizar a influência dessa interação, seria a utilização de cultivares com ampla adaptabilidade e boa estabilidade. Atualmente, existem dezenas de métodos, que apresentam diferenças nos procedimentos biométricos. O objetivo deste trabalho foi comparar e avaliar dez métodos estatísticos de análise de adaptabilidade e estabilidade fenotípica em linhagens de feijão-caupi. Foram utilizados dados de produtividade de grãos de 44 linhagens de feijão-caupi, avaliados em dois experimentos, em sete ambientes distribuídos pelos estados da Bahia, Ceará, Pernambuco e Piauí. As avaliações de adaptabilidade e estabilidade dos genótipos foram realizadas utilizando os métodos Tradicional; Plaisted e Peterson; Wricke; Finlay e Wilkinson; Verma, Chahal e Murty; Huehn; Annicchiarico; Eberhart e Russell; Lin e Binns e o método multiplicativo baseados em componentes principais (AMMI). Coeficientes de correlação Spearman foram estimados entre os métodos. O método AMMI foi o mais indicado devido à disposição gráfica dos genótipos e ambientes. Não é recomendado a utilização conjunta de métodos que apresentam elevada correlação, como Plaisted e Peterson e Wricke e os métodos de Annicchiarico e Lin e Binns. O uso de um desses métodos em combinação com o de Eberhart e Russell ou AMMI pode adicionar informações à análise de estabilidade.

Palavras-chave: *Vigna unguiculata*; Interação genótipo x ambiente; Estatística.

COMPARASION OF METHODS OF ADAPTABILITY RELATED TO GRAIN PRODUCTION IN COWPEA LINES

ABSTRACT

The genotype x environment interaction is one of the major problems of breeding programs, either in the selection phase or in the recommendation of the cultivars. Among the alternatives to soften the influence of this interaction has been recommended the use of cultivars with wide adaptability and good stability. Currently, there are dozens of methods, which present differences in biometric procedures. The objective of this work was to compare and evaluate ten statistical methods of analysis of adaptability and phenotypic stability in cowpea lines. Grain yield data from 44 cowpea lines were evaluated in seven environments in the states of Bahia, Ceará, Pernambuco and Piauí. The adaptability and stability evaluations of the genotypes were performed using the traditional methods; Plaisted and Peterson; Wricke; Finlay and Wilkinson; Verma, Chahal and Murty; Huehn; Annicchiarico; Eberhart and Russell; Lin and Binns and the main component-based multiplicative method (AMMI). Spearman correlation coefficients were estimated between methods. The AMMI method is most suitable due to the graphical arrangement of both the genotypes and the environments. The use of highly correlated methods is not recommended, as in the cases of Plaisted and Peterson and Wricke and the methods of Annicchiarico and Lin and Binns that show strong association and produce similar genotypic classifications. The use of one of them in combination with that of Eberhart and Russell or AMMI can add information to the stability analysis.

Key words: *Vigna unguiculata*; Genotype x environment interaction; Statistic.

INTRODUÇÃO

O feijão-caupi (*Vigna unguiculata*) é uma das espécies de leguminosas mais adaptáveis, versáteis e nutritivas (Ferreira et al., 2017), sendo cultivada largamente em regiões semiáridas, devido a sua tolerância ao estresse hídrico, e apresenta produção de grãos significativas quando comparado com outras leguminosas, como o feijão comum e grão de bico (Silva et al. 2016). A seleção e recomendação de cultivares de feijão-caupi com elevada produção, adaptadas aos vários ambientes de cultivo, é de grande importância, principalmente em locais onde fontes nutricionais para as populações são escassas (Silva et al., 2017).

O conhecimento da interação genótipo x ambiente é essencial na fase de seleção e recomendação de cultivares, constituindo-se em um dos maiores problemas dos programas de melhoramento. De acordo com Cruz et al. (2012), isso ocorre devido o comportamento diferenciado de materiais genéticos frente à variação do ambiente, dificultando a seleção de genótipos mais adaptados. Entre as alternativas para se amenizar a influência dessa interação, seria a aplicação de métodos de adaptabilidade e estabilidade.

A adaptabilidade é a capacidade de os genótipos aproveitarem vantajosamente o estímulo do ambiente, enquanto, a estabilidade é a capacidade de os genótipos mostrarem um comportamento altamente previsível em função do estímulo do ambiente (Cruz e Regazzi, 1997). Existem dezenas de métodos estatísticos para estudos de adaptabilidade e estabilidade, apresentando diferenças nos procedimentos biométricos, com tendência no aumento do número de parâmetros, tornando a análise e a interpretação dos dados mais difícil.

A adaptabilidade e estabilidade de produção de grãos em feijão-caupi tem sido investigado, principalmente, por meio de análises descrita por Eberhart e Russell (1966), Lin e Binns (1988), e métodos multiplicativos baseados em componentes principais (AMMI) (Gauch e Zobel 1996). Cargnelutti Filho et al. (2007) ressaltam que a avaliação dos dados por

vários métodos, e a consideração das peculiaridades de cada um, são adequados para a melhor tomada de decisão em relação à indicação de cultivares. No entanto, é necessário utilizar métodos que apresentem baixa correlação entre eles.

Silva e Duarte (2006), trabalhando com soja, afirmam que os métodos de Annicchiarico e Lin e Binns mostram forte associação entre si e o uso simultâneo dos dois não é indicado. Silva Filho et al. (2008) recomendam a utilização conjunta dos métodos de Lin e Binns e AMMI para estudo de estabilidade fenotípica em algodão. Pereira et al. (2009), trabalhando com feijoeiro comum, observaram que os métodos de Lin e Binns e Annicchiarico não apresentaram correlação com Eberhart e Russell, podendo ser utilizados em conjunto.

Devido a importância da avaliação da interação genótipo x ambiente e dos vários métodos de adaptabilidade e estabilidade baseados em diferentes princípios, o objetivo do presente estudo foi avaliar e comparar métodos estatísticos de adaptabilidade e estabilidade para produção de grãos em linhagens de feijão-caupi, afim de recomendar os métodos mais adequados para essas análises.

MATERIAL E MÉTODOS

Dados utilizados

Os dados de produção foram obtidos de linhagens de feijão-caupi, avaliados em sete ambientes, nos estados da Bahia, Ceará, Pernambuco e Piauí. Essas linhagens foram desenvolvidas e selecionadas para altos teores de proteínas e produção de grãos, e são resultantes de cruzamentos de três acessos introduzidos do International Institute for Tropical Agriculture (IITA), com três cultivares adaptadas ao semiárido brasileiro, conforme procedimentos descritos por Santos e Boiteux (2013). As linhagens selecionadas formaram dois experimentos, considerando o tipo do porte da planta: I) porte semi ramador e crescimento indeterminado (PSR), com 23 tratamentos, sendo 20 linhagens e três cultivares

controles, e 2) porte ereto e de crescimento determinado (PED), com 21 tratamentos, sendo 17 linhagens e quatro cultivares controles.

O delineamento experimental foi de blocos casualizados, com três repetições, sendo quatro ambientes irrigados no segundo semestre do ano e três ambientes de sequeiro, no primeiro semestre do ano. Cada parcela apresentou as dimensões de 3,0 x 2,0 m, com área útil de 3 m². A parcela experimental do experimento PSR foi formada por duas fileiras linhas, no espaçamento de 1,0 m entre as fileiras de 0,1 m entre plantas, resultando na densidade populacional e 100.000 plantas/ha, enquanto a parcela experimental do experimento PED foi formada por quatro fileiras, no espaçamento de 0,5 m entre as fileiras de 0,1 m entre plantas, com densidade populacional de 200.000 plantas/ha.

Análise estatística

As análises estatísticas para os delineamentos experimentais foram efetuadas no SAS (SAS, 1989), pelo procedimento GLM e a opção Lsmeans (SAS, 1989). A produção de grãos foi corrigida pelo método da covariância, com o stand de plantas médio das parcelas de cada experimento, como descrito por Vencovsky e BARRIGA (1992), usando programa SAS.

As avaliações de adaptabilidade e estabilidade dos genótipos foram realizadas utilizando dez métodos estatísticos: Tradicional, Plaisted e Peterson (1959), Wricke (1962), Finlay e Wilkinson (1963), Verma, Chahal e Murty (1978), Huehn (1990), Annicchiarico (1992), Eberhart e Russell (1966), Lin e Binns (1988), disponíveis no programa Genes (Cruz, 2006) e o método multiplicativo baseados em componentes principais (AMMI), disponível no SAS.

Métodos de adaptabilidade e estabilidade

O método tradicional é o mais antigo para avaliar a performance genotípica. Nesse método, a variação de ambientes dentro de cada genótipo é usada como estimador do parâmetro de estabilidade, de modo que o genótipo que apresentar o menor quadrado médio será considerado o mais estável. Plaisted e Peterson (1959) verificaram que, quando são

testados genótipos por ambiente e que, dessa variância, cada genótipo contribui com uma determinada fração, quanto menor for essa contribuição, mais estável será o genótipo.

Wricke (1962), denominou o parâmetro de estabilidade como “ecovalência” e sua estimativa baseia-se na decomposição da soma dos quadrados da interação genótipo por ambiente nas partes devidas a genótipos isolados: quanto menor o valor da ecovalência mais estável será o genótipo.

Finlay e Wilkinson (1963) desenvolveram uma metodologia baseada no processo de regressão linear. A adaptabilidade expressa a resposta do genótipo diante das variações ambientais, que consiste no coeficiente de regressão linear simples da resposta individual do genótipo, transformada, sobre a média ambiental. Os conceitos de adaptabilidade e estabilidade são interpretados por um único parâmetro: coeficiente de regressão (β_{1i}): quanto mais próximo de um mais estável é o genótipo

O método Eberhart e Russell (1966) também se baseia em análise de regressão linear, mas com dados não transformados, usando na avaliação individual dos genótipos, a produtividade média do genótipo (β_0), o seu coeficiente de regressão (β_1) e a variância dos desvios dessa regressão (σ_{dii}^2). Nesse método, de acordo com coeficiente de regressão, o genótipo pode apresentar ampla adaptabilidade ($\beta_1=1$), adaptabilidade a ambientes favoráveis ($\beta_1>1$) ou adaptabilidade a ambientes desfavoráveis ($\beta_1<1$). A menor variância dos desvios da regressão ($\sigma_{dii}=0$) define o genótipo como estável.

O método de Verma, Chahal e Murty (1978) é baseado em regressão bisegmentada, consistindo de duas regressões lineares, sendo uma para ambientes favoráveis (β_1), com índices positivos, e outra para ambientes desfavoráveis (β_2), com índices negativos: os menores valores define o genótipo mais estável. Lin e Binns (1988) definiram como medida para estimar a estabilidade e adaptabilidade de cultivares o quadrado médio da distância entre a média do cultivar e a resposta média máxima obtida no ambiente. É um método baseado em

análise não paramétrica, onde o genótipo mais estável é aquele que apresenta o menor valor P_i .

O método Huenh (1990), também é baseado em análise não paramétrica. A adaptabilidade e estabilidade, é obtida através da estimativa dos parâmetros: S_{1i} - média das diferenças absolutas entre as classificações do genótipo i nos ambientes; S_{2i} - variância das classificações do genótipo i nos ambientes; e S_{3i} - soma dos desvios absolutos de cada classificação em relação à média das classificações. O genótipo com máxima estabilidade apresenta S_1 , S_2 e S_3 iguais a zero.

No método Annicchiarico (1992), a estabilidade é medida pela superioridade do genótipo em relação à média de cada ambiente. O método baseia-se na estimativa de um índice de confiança (I_i) de um determinado genótipo de comportamento relativamente superior, ou seja, quanto maior esse índice mais estável será o genótipo.

A metodologia AMMI destaca-se por descrever a interação genótipo x ambiente, mediante o descarte de ruídos adicionais, presentes nas estimativas tradicionais da interação. Utiliza conjuntamente a análise de variância para os efeitos principais de genótipos e ambientes e a Análise dos Componentes Principais (ACP) para a interação. Procura identificar os genótipos mais estáveis e adaptáveis, e realiza o zoneamento agrônômico dos ambientes (Duarte e Vencovsky, 1999).

Foi aplicado a correlação de Spearman para comparação dos métodos. A classificação da adaptabilidade e estabilidade dos genótipos foi realizada de acordo com Silva e Duarte (2006). Os métodos que apresentaram apenas um parâmetro foram classificados, do menor para o maior, pelo seu valor absoluto de estimativa. Enquanto que os métodos com dois ou mais parâmetros foi obtido uma média com as estimativas de cada genótipo antes de classificá-los.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na análise de variância conjunta observou-se diferença estatística pelo teste F ($p < 0.01$) para os efeitos do ambiente, genótipos e interação genótipo x ambiente, tanto no experimento de porte semi ramador e crescimento indeterminado – PSR, quanto no experimento de porte ereto e de crescimento determinado – PED (Tabela 1). Isso indica que o comportamento relativo dos genótipos foi influenciado pelas condições ambientais. A significância da interação genótipo x ambiente justifica a necessidade de realizar estudos para aplicar métodos de adaptabilidade e estabilidade.

A produção de grãos no experimento PSR variou de 883 a 1341 kg ha⁻¹, sendo o cultivar BRS Acauã o mais produtivo, acompanhado da linhagem C3R, com 1228 kg ha⁻¹ (Tabela 2). Já no experimento PED essa variação foi de 893 a 1344 kg ha⁻¹, com o cultivar BRS Carijó mais produtivo (Tabela 3). As relações entre os maiores e menores quadrados dos resíduos observados foram inferiores a sete nos dois experimentos, indicando homogeneidade das variâncias residuais, condição necessária para a análise conjunta de experimentos (Cruz e Regazzi, 1997).

Os parâmetros e estimativas de adaptabilidade e estabilidade fenotípica de cada método utilizado são apresentados nas tabelas 2 e 3 para os experimentos PSR e PED, respectivamente. Nessas tabelas, ainda é possível observar a classificação que os genótipos apresentaram conforme o método, sendo essa ordem numérica utilizada para análise de correlação Spearman. A partir dessa correlação, observou-se que na associação entre métodos e média de produção, cerca de 50 e 55 % apresentaram estatística significativa ($p < 0.05$) nos experimentos PSR e PDE, respectivamente (Tabela 4).

Quando comparado apenas os dez métodos, a associação significativa ($p < 0.05$) ficou em torno de 55.6 % nos dois experimentos (Tabela 4). Silva e Duarte (2006) avaliando onze

métodos na cultura da soja, encontraram associação de 40%. Enquanto Pereira et al. (2009) trabalhando com feijoeiro-comum encontraram associação em torno de 48 %. Essa estatística significativa sugere a necessidade de selecionar métodos que apresentem baixa correlação para as análises em conjunto de adaptabilidade e estabilidade.

No experimento PSR, a correlação da média de produção foi significativa ($p < 0.01$) apenas com os métodos Annicchiarico (1992) e Lin e Binns (1988). Esses resultados se assemelham ao encontrado por Silva e Duarte (2006), em que para esses métodos a maior estabilidade estará obrigatoriamente associada a maior produtividade. Para Cargnelutti Filho (2007) isso ocorre, provavelmente, pela expressão que estima os índices de estabilidade a ambientes gerais, favoráveis e desfavoráveis, cujo valor é o desvio da cultivar i em relação ao material de desempenho máximo (maior produtividade) em cada ambiente.

No experimento PED, além dos citados anteriormente, os métodos Tradicional, Verma et al. (1978) e Huehn (1990) também apresentaram correlação significativa ($p < 0.05$) com a média de produção. Em ambos os experimentos, os métodos de Plaisted e Peterson (1959) e Wricke (1962) foram os que se destacaram com a correlação máxima, ou seja, mostraram forte associação e produziram classificações genotípicas similares, não sendo recomendado a utilização em conjunto. No entanto, o uso de um deles em combinação com os métodos Annicchiarico (1992) ou Lin e Binns (1988) são recomendados, pois apresentaram baixa correlação nos dois experimentos.

O método Eberhart e Russell é outro que pode ser utilizado em conjunto com os métodos Annicchiarico (1992) e Lin e Binns (1988), pois apresentaram correlação baixa e não significativa. Avaliando métodos estatísticos na produção de soja, Silva e Duarte (2006) observaram boa concordância entre os métodos que utilizam regressão, como: Finlay e Wilkinson (1963), Eberhart e Russell (1966), Verma et al. (1978) e Toler (1990). No presente estudo é possível observar resultados semelhantes (Tabela 4).

Para Duarte e Vencovsky (1999), o método AMMI foi desenvolvido com a proposta de melhor descrever a interação genótipo x ambiente, mediante o descarte de ruídos presentes nas estimativas da interação. O método destaca-se devido a disposição gráfica tanto dos genótipos quanto dos ambientes, facilitando na interpretação dos dados (Figuras 1 e 2). Com exceção de Annicchiarico (1992) e de Lin e Binns (1988) o método AMMI apresentou correlação significativa com todos os outros avaliados (Tabela 4).

Quanto a produção, o método AMMI não apresentou correlação significativa com a média dos genótipos, o que indica que os genótipos identificados como mais estáveis e adaptados não são, necessariamente, os mais produtivos. Um exemplo disso é que, tanto no experimento PSR quanto no experimento PED, os dois genótipos de maior média de produtividade (BRS Acauã, C3R, BRS Carijó e BRS Tapaihum), foram classificados, respectivamente, como o 20º, 4º, 9º e 16º em estabilidade e adaptabilidade pelo método AMMI (Tabela 2 e 3).

A literatura apresenta recentes trabalhos de adaptabilidade e estabilidade de feijão-caupi em que os autores utilizaram os métodos AMMI, Lin e Binns, e Eberhart e Russel em conjunto e recomendaram novas cultivares para região estudada (Aquino et al. 2016; Silva e Santos, 2016). A associação mais forte foi apresentada com os métodos de Plaisted e Peterson e de Wricke, em ambos os experimentos. Silva e Duarte (2006) também observaram forte associação entre esses métodos, porém, o método AMMI não se correlacionou com a maioria dos métodos avaliados.

O feijão-caupi é uma leguminosa cultivada em várias partes do mundo, sendo um alimento básico em mais de 65 países. Tem desempenhado um papel importante na nutrição humana, não só por causa de sua boa qualidade proteica com alto valor nutricional, mas também por ser fundamental para a alimentação dos animais (Singh, 2006; Badiane et al. 2012).

Avaliações multi-locais de genótipos de feijão-caupi que associem altos rendimentos de grãos e elevados teores nutricionais são de grande importância, pois permitem indicar genótipos que tenham boa performance em diferentes ambientes de cultivo ou genótipos que respondam a melhoria no manejo, como uso de irrigação (Silva et al. 2016). No entanto, para garantir a qualidade dos genótipos que serão selecionados, é necessário a aplicação de métodos estatísticos de adaptabilidade e estabilidade que apresentem baixa correlação e fácil interpretação dos dados.

CONCLUSÃO

O método AMMI é o mais indicado devido a disposição gráfica tanto dos genótipos quanto dos ambientes, além de se correlacionar com a maioria dos métodos estudados. Os genótipos identificados como mais estáveis e adaptados pelo método AMMI, não são, necessariamente, os mais produtivos, pois este não apresentou correlação significativa com a produção de grãos. A utilização de métodos que apresentam elevada correlação, como nos casos de Plaisted e Peterson e Wricke e os métodos de Annicchiarico e Lin e Binns que mostraram forte associação e produziram classificações genotípicas similares, não é recomendada. O uso de um desses métodos em combinação com o de Eberhart e Russell ou AMMI podem contribuir para informações consistentes e complementares à análise de estabilidade.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pelo apoio financeiro. Carlos A F Santos é pesquisador de produtividade do CNPq.

REFERÊNCIAS

- Annicchiarico, P. 1992. Cultivar adaptation and recommendation from alfalfa trials in Northern Italy. *Journal of Genetics and Breeding*, v.46, p.269-278.
- Aquino, D. A. L., Santos, C.A.F. Silva, D.O.M. 2016. Adaptability and stability parameters for immature seeds and pods and matured dried seeds in cowpea genotypes in Brazil northeast. *African Journal of Agricultural Research*, V. 11, n. 50, p. 5071-5079. DOI: 10.5897/AJAR2016.11934
- Badiane, F. A., B. S. Gowda, N. Cissé, D. Diouf, O. Sadio, and M. P. Timko 2012: Genetic relationship of cowpea (*Vigna unguiculata*) varieties from Senegal based on SSR markers. *Genetics and Molecular Research*, v. 11, p. 292-304. doi: 10.4238/2012.
- Cargnelutti Filho A., D. Perecin, E. B. Malheiros and J. P. Guadagnin 2007: Comparison of adaptability and stability methods related to grain yield of maize cultivars. *Bragantia*, Campinas, v.66, n.4, p.571-578.
- Cruz C. D. 2006 Programa Genes: Estatística experimental e matrizes. Viçosa: Ed. UFV.
- Cruz, C. D., and A. J. Regazzi 1997: Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético. Viçosa: UFV. 390p.
- Cruz C. D., A. J. Regazzi and P. C. S. Carneiro 2012: Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético. Vol. 1. Viçosa: UFV, 514 p.
- Duarte J. B., and R. Vencovsky 1999. Interação genótipos x ambientes: uma introdução à análise AMMI. Ribeirão Preto: Sociedade Brasileira de Genética. 60p.
- Eberhart, A. S., and W. A. Russell 1966. Stability parameters for comparing varieties. *Crop Science*, v. 6, p. 36-40.

Ferreira A.C.T., Felito R.A., Rocha A.M., Carvalho M.A.C., Yamashita O.M. Water and salt stresses on germination of cowpea (*Vigna unguiculata* cv. BRS Tumucumaque) Seeds. Rev. Caatinga, Mossoró, v. 30, n. 4, p. 1009 –1016, 2017.

Finlay, K.W.; Wilkinson, G.N. 1963. The analysis of adaptation in a plant breeding programme. Australian Journal of Agricultural Research, v.14, p.742-754.

Gauch, H. G.; Zobel, R. W. AMMI analysis of yield trials. In: Kang, M. S.; Gauch, H. G. (Ed.). Genotype by environment interaction. Boca Raton: CRC Press, 1996. v. 4, p. 85-122.

Huehn, M. Nonparametric measures of phenotypic stability. Part I: theory. Euphytica, v.47, p.195-201, 1990.

Lin C. S., and M. R. Binns. A superiority measure of cultivar performance for cultivar x location data. Canadian Journal of Plant Science v. 68, p. 193-198. 1988.

Pereira, H. S., L. C. Melo, M. J. Del Peloso, L. C. Faria, J. G. C. Costa, J. L. Cabrera Díaz, C. A. Rava, A. Wendland. Comparison of methods for phenotypic adaptability and stability analysis in common bean. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 44, p.374-383, 2009. doi: 10.1590/S0100-204X2009000400007.

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, v.36, p.381-385, 1959.

Santos C.A.F., Boiteux L.S. Breeding biofortified cowpea lines for semi-arid tropical areas by combining higher seed protein and mineral levels. Genetics and Molecular Research, v. 12, n. 4, p. 6782-6789, 2013.

SAS. SAS/STAT User's Guide, Version 6, Fourth Edition, Volume 1. Cary: SAS Institute Inc., 1989, 890 p.

- Silva, D.O.M., and C.A.F. Santos. Adaptability and stability parameters for potassium and calcium contents and grain yield in cowpea lines. *African Journal of Agricultural Research*, v. 11, p. 3366–3374. 2016. doi:10.5897/AJAR2016.11526
- Silva, D.O.M.; Santos, C. A. F.; Boiteux, L S. Adaptability and stability parameters of total seed yield and protein content in cowpea (*Vigna unguiculata*) genotypes subjected to semi-arid conditions. *Australian Journal of Crop Science*, v. 8, p. 1164-1169, 2016.
- Silva DOM, Santos CAF, Seido SL, Coelho WCP, Aquino DAL. Retention of proteins and minerals after cooking in cowpea genotypes. *Pesq. Agropec. Trop.*, Goiânia, v. 47, n. 3, p. 353-359, 2017.
- Silva, W. C. J., and J. B. Duarte, Métodos estatísticos para estudo de adaptabilidade e estabilidade fenotípica em soja. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.41, p.23-30. 2006.
- Silva Filho, J. L., C. L. Morello, F. J. C. Farias, F. M. Lamas, M. B. Pedrosa and J. L. Ribeiro. Comparação de métodos para avaliar a adaptabilidade e estabilidade produtiva em algodoeiro. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.43, p.349-355. 2008.
- Singh B. B. Cowpea breeding at IITA: highlights of advances impacts. In: Congresso Nacional de Feijão-Caupi, 1.; Reunião Nacional de Feijão-Caupi, 6. Teresina. *Tecnologias para o agronegócio: anais*. Teresina: Embrapa Meio-Norte .1 CD-ROM. (Embrapa Meio-Norte. Documentos, 121). 2006.
- Toler, J. E. Patterns of genotypic performance over environmental arrays. 1990. 154p. Thesis (Ph.D)-Clemson University, Clemson.
- Vencovsky R., Barriga, P. *Genética biométrica no fitomelhoramento*. Ribeirão Preto: Sociedade Brasileira de Genética. 496p. 1992.
- Verma, M.M.; Chahal, G.S.; Murty, B.R. Limitations of conventional regression analysis: a proposed modification. *Theoretical and Applied Genetics*, v.53, p.89-91, 1978.

Wricke, G. Zur Berechnung der Ökovalenz bei Sommerweizen und Hafer. Pflanzenzuchtung, v.52, p.127-138, 1965.

Tabela 1. Análise conjunta de variância da produção de grãos em 20 linhagens e três cultivares de feijão-caupi, porte semi ramador (PSR) e em 17 linhagens e quatro cultivares de feijão-caupi, porte ereto e de crescimento determinado (PED), avaliados em sete ambientes no semiárido brasileiro

	Experimento PSR			Experimento PED		
	GL	SQ	QM	GL	SQ	QM
Repetição	2	162870	81435 ^{NS}	2	235397	117698 ^{NS}
Ambiente	6	123462656	20577109**	6	98539893	16423315**
Genótipo	22	7273181	330599**	20	6726907	336345**
Ambiente*Genótipo	132	27646025	209439**	120	22071393	183928**
Erro	311	22971875	73864	285	27906436	97917

** , * , NS: Significativo a 1%, 5% e não significativo para o teste F, respectivamente.

Tabela 2. Parâmetros de adaptabilidade e estabilidade estimados pelos métodos Tradicional, de Plaisted & Peterson (P&P), de Wricke, de Finlay & Wilkinson (F&W), de Verma, Chahal & Murty (VC&M), de Huehn, de Annicchiarico (ANN), de Eberhart & Russell (E&R), de Lin & Binns (L&B) e de análise AMMI (AMMI) para produção de grãos em 20 linhagens e três cultivares de feijão-caupi, porte semi ramador (PSR), avaliados em sete ambientes no semiárido brasileiro

Genótipos	Produção kg ha ⁻¹	Tradicional	P&P	Wricke	F&W	VC&M	Huehn			ANN	E&R	L&B	AMMI		
				ω_i	β_{li}	β_1	β_2	S_1	S_2	S_3	I_i	β_i	σ_{dii}	P_i	IPCA1
C2R	886 ²¹	1695992 ²¹	51385 ¹⁶	1397842 ¹⁶	1.3 ²⁰	1.9 ²¹	0.6 ⁸	7.7 ²	46.9 ²	2.3 ²	72.7 ²³	1.3 ²⁰	37767 ¹⁴	344349 ²³	13.8 ¹⁹
C3S	904 ¹⁹	1081626 ¹³	28935 ⁸	624783 ⁸	1.0 ⁴	0.5 ¹⁴	0.8 ⁴	6.4 ⁹	32.9 ⁹	2.1 ¹⁵	77.8 ²¹	1.0 ⁴	16770 ⁷	305069 ¹⁹	-3.2 ⁷
C3M	1150 ⁶	814228 ⁶	17865 ²	243595 ²	0.9 ⁸	0.7 ⁸	1.0 ¹	3.6 ⁷	9.9 ⁷	2.2 ¹⁶	110.0 ⁴	0.9 ⁹	-10959 ⁶	152055 ⁵	-0.1 ²
C3Q	1021 ¹¹	1403381 ¹⁸	43249 ¹³	1117676 ¹³	1.1 ¹³	0.7 ⁹	-0.7 ²²	8.9 ¹⁶	57.3 ¹⁶	3.7 ¹¹	87.7 ¹³	1.2 ¹³	40905 ¹⁵	219184 ⁸	-5.6 ¹²
C3B	1214 ³	836851 ⁸	33217 ⁹	772216 ⁹	0.9 ¹⁰	1.1 ⁶	1.6 ¹¹	5.6 ¹⁰	22.3 ¹⁰	4.3 ¹²	114.7 ³	0.9 ¹⁰	21638 ⁸	144688 ⁴	6.3 ¹³
C6P	1013 ¹³	948798 ¹⁰	20636 ⁴	338998 ⁴	0.9 ³	0.9 ⁴	0.4 ⁹	5.7 ¹³	23.8 ¹³	2.1 ²³	92.9 ¹⁰	1.0 ³	-2161 ²	224767 ⁹	3.3 ⁸
C1M	959 ¹⁶	2171113 ²³	80325 ²¹	2394382 ²¹	1.4 ²³	2.4 ²³	1.3 ⁷	7.0 ²²	46.3 ²¹	1.9 ²¹	78.9 ¹⁹	1.4 ²³	58313 ¹⁸	301820 ¹⁸	14.8 ²¹
C3F	883 ²³	673731 ²	27918 ⁷	589737 ⁷	0.8 ¹⁵	0.5 ¹³	1.9 ¹⁴	5.6 ⁵	23.9 ⁴	1.7 ⁵	80.1 ¹⁸	0.8 ¹⁵	1281 ¹	315024 ²¹	-2.8 ⁶
C3L	950 ¹⁷	1058815 ¹¹	12377 ¹	54589 ¹	1.1 ⁵	1.2 ⁷	1.1 ³	3.7 ¹	10.1 ¹	1.3 ¹⁸	87.6 ¹⁴	1.0 ⁶	-22570 ⁹	249086 ¹³	0.9 ³
C2C	968 ¹⁵	1774830 ²²	51843 ¹⁷	1413622 ¹⁷	1.3 ²¹	1.9 ²⁰	0.4 ¹⁰	8.8 ⁸	55.5 ⁸	3.1 ⁴	81.7 ¹⁷	1.3 ²¹	29413 ¹²	287946 ¹⁶	12.1 ¹⁷
C1T	901 ²⁰	1488025 ¹⁹	49131 ¹⁵	1320204 ¹⁵	1.2 ¹⁴	1.8 ¹⁹	-0.1 ¹⁸	9.4 ³	63.6 ⁵	3.4 ¹	75.7 ²²	1.1 ¹⁴	50964 ¹⁷	331871 ²²	12.5 ¹⁸
C3R	1228 ²	740878 ⁴	21830 ⁵	380105 ⁵	0.9 ¹¹	0.6 ¹¹	-0.1 ¹⁶	4.9 ¹²	16.3 ¹²	3.7 ¹⁷	119.1 ²	0.8 ¹¹	-6056 ⁴	125105 ²	-1.0 ⁴
C4G	1023 ¹⁰	685093 ³	41577 ¹²	1060091 ¹²	0.8 ¹⁸	0.9 ⁵	1.2 ⁵	7.5 ¹⁵	40.6 ¹⁴	3.3 ¹⁰	94.5 ⁹	0.7 ¹⁸	27058 ¹⁰	251814 ¹⁴	3.9 ¹⁰
C6A	883 ²²	746401 ⁵	40810 ¹¹	1033693 ¹¹	0.8 ¹⁶	0.5 ¹²	-0.5 ¹⁹	7.1 ⁴	40.9 ³	2.0 ³	78.4 ²⁰	0.8 ¹⁶	30778 ¹³	310255 ²⁰	-10.1 ¹⁵
C2T	934 ¹⁸	885758 ⁹	25124 ⁶	493530 ⁶	0.9 ⁷	1.0 ²	-0.5 ²¹	6.7 ¹⁹	30.5 ¹⁸	2.1 ²²	85.1 ¹⁶	0.9 ⁵	6603 ⁵	293622 ¹⁷	4.9 ¹¹
C3P	1055 ⁸	635467 ¹	44508 ¹⁴	1161036 ¹⁴	0.7 ¹⁹	0.4 ¹⁵	1.8 ¹²	8.4 ¹⁷	51.2 ¹⁵	3.6 ¹³	98.3 ⁸	0.7 ¹⁹	27301 ¹¹	239393 ¹¹	-1.3 ⁵
C6D	990 ¹⁴	1075036 ¹²	40471 ¹⁰	1022000 ¹⁰	0.9 ²	0.9 ¹	1.8 ¹³	8.5 ²³	53.0 ²³	2.9 ²⁰	85.8 ¹⁵	1.0 ¹	43453 ¹⁶	256330 ¹⁵	-0.1 ¹
C1V	1019 ¹²	1565343 ²⁰	56350 ¹⁹	1568807 ¹⁹	1.2 ¹⁷	2.1 ²²	2.1 ¹⁷	9.3 ¹¹	60.1 ¹¹	3.8 ⁶	89.7 ¹¹	1.2 ¹⁷	64770 ¹⁹	243650 ¹²	10.6 ¹⁶
C4I	1102 ⁷	1124310 ¹⁴	20502 ³	334391 ³	1.1 ⁹	0.9 ³	0.9 ²	5.0 ⁶	17.6 ⁶	2.9 ⁷	101.3 ⁷	1.0 ⁸	-4448 ³	171894 ⁶	3.8 ⁹
T16_2R	1171 ⁴	1292080 ¹⁶	52535 ¹⁸	1437450 ¹⁸	1.1 ⁶	0.4 ¹⁷	-0.0 ¹⁵	7.2 ¹⁴	36.9 ¹⁷	3.1 ⁸	104.8 ⁵	1.0 ⁷	69547 ²⁰	131728 ³	-9.5 ¹⁴
Acauã	1341 ¹	1295696 ¹⁷	70553 ²⁰	2057882 ²⁰	1.0 ¹	0.4 ¹⁶	0.8 ⁶	6.1 ¹⁸	26.2 ¹⁹	4.5 ⁹	121.5 ¹	1.0 ³	112508 ²¹	63731 ¹	-14.6 ²⁰
Pujante	1050 ⁹	1216813 ¹⁵	105397 ²²	3257731 ²²	0.9 ¹²	0.7 ¹⁰	4.6 ²³	9.7 ²⁰	63.3 ²⁰	3.7 ¹⁴	88.6 ¹²	0.8 ¹²	185586 ²³	226464 ¹⁰	-16.1 ²²
Canapu	1153 ⁵	815179 ⁷	126168 ²³	3972969 ²³	0.6 ²²	0.3 ¹⁸	2.5 ²⁰	9.9 ²¹	74.6 ²²	4.5 ¹⁹	104.4 ⁶	0.5 ²²	175495 ²²	184265 ⁷	-22.5 ²³

^{1/}Ordem dos genótipos

Tabela 3. Parâmetros de adaptabilidade e estabilidade estimados pelos métodos Tradicional, de Plaisted & Peterson (P&P), de Wricke, de Finlay & Wilkinson (F&W), de Verma, Chahal & Murty (VC&M), de Huehn, de Annicchiarico (ANN), de Eberhart & Russell (E&R), de Lin & Binns (L&B) e de análise AMMI (AMMI) para produção de grãos em 17 linhagens e quatro cultivares de feijão-caupi, porte ereto e de crescimento determinado (PED), avaliados em sete ambientes no semiárido brasileiro

Genótipos	Produção	Tradicional	P&P	Wricke	F&W	VC&M		Huehn			ANN	E&R		L&B	AMMI
						ω_i	β	β_1	β_2	S_1	S_2	S_3	I_i	β_i	σ_{dii}
C1N	1171 ⁸	1313631 ¹⁶	27062 ¹¹	495434 ¹¹	1.3 ¹⁵	0.7 ⁷	1.2 ⁸	6.0 ⁸	24.0 ⁷	2.9 ⁹	96.4 ⁷	1.3 ¹⁵	-14016 ¹¹	269489 ⁹	-4.1 ⁶
C1R	1044 ¹⁶	840354 ⁸	26459 ⁹	474783 ⁹	1.0 ⁵	0.9 ²	0.4 ¹⁶	6.2 ¹⁰	29.0 ¹¹	2.2 ⁶	86.8 ¹⁷	1.0 ⁵	5721 ⁸	372226 ¹⁸	-4.0 ⁵
C3O	1203 ⁶	349205 ¹	76735 ¹⁹	2198531 ¹⁹	0.5 ²¹	-0.1 ¹⁶	-0.1 ²¹	9.5 ²¹	63.6 ²¹	5.0 ²⁰	106.2 ³	0.5 ²¹	36153 ¹⁶	235210 ⁷	7.6 ¹⁷
C2I	953 ²⁰	733982 ⁵	19396 ¹	232605 ¹	0.9 ⁷	1.2 ⁵	1.0 ³	3.9 ¹	11.6 ¹	1.0 ¹	79.2 ²⁰	0.9 ⁷	-11807 ⁹	404584 ¹⁹	-1.9 ¹
C1G	1130 ⁹	1023075 ¹³	24462 ⁶	406301 ⁶	1.1 ¹⁰	0.8 ⁴	1.4 ¹¹	6.2 ¹¹	26.3 ¹⁰	2.8 ⁸	93.6 ¹⁰	1.1 ⁹	-989 ¹	304343 ¹¹	-6.2 ¹³
C1S	1107 ¹⁴	869808 ⁹	29704 ¹²	586039 ¹²	1.0 ³	0.0 ¹⁴	1.0 ⁴	6.6 ¹²	31.0 ¹²	3.3 ¹³	92.9 ¹¹	1.0 ³	13263 ¹⁰	344579 ¹⁴	-8.7 ¹⁸
C2J	1129 ¹⁰	1478886 ¹⁸	67467 ¹⁸	1880752 ¹⁸	1.2 ¹⁴	2.3 ¹⁷	0.7 ⁹	9.2 ²⁰	62.6 ²⁰	3.5 ¹⁴	88.1 ¹⁶	1.2 ¹⁴	84549 ¹⁹	202587 ⁴	13.8 ¹⁹
C1J	1121 ¹¹	931996 ¹¹	25001 ⁷	424797 ⁷	1.0 ⁴	0.5 ¹¹	0.3 ²⁰	6.1 ⁹	26.3 ⁹	2.2 ⁷	95.0 ⁹	1.0 ⁴	2442 ²	249457 ⁸	1.9 ²
C1F	1111 ¹³	1147511 ¹⁵	25479 ⁸	441162 ⁸	1.2 ¹²	1.0 ¹	1.3 ¹⁰	4.9 ³	15.8 ³	2.1 ⁵	90.7 ¹³	1.2 ¹¹	-4536 ⁴	322260 ¹²	-6.3 ¹⁴
C2O	1243 ⁴	1086547 ¹⁴	23949 ⁵	388720 ⁵	1.1 ¹¹	1.1 ³	1.5 ¹⁵	4.9 ⁴	17.8 ⁵	3.6 ¹⁵	105.5 ⁴	1.1 ¹⁰	-5021 ⁵	232239 ⁶	-2.3 ³
C2S	1196 ⁷	751945 ⁶	22868 ⁴	351667 ⁴	0.9 ⁸	0.7 ⁶	0.5 ¹³	4.5 ²	14.9 ²	3.0 ¹¹	103.5 ⁶	0.9 ⁸	-3925 ³	276386 ¹⁰	-5.5 ¹⁰
C2B	1009 ¹⁹	659138 ⁴	94010 ²⁰	2790823 ²⁰	0.6 ¹⁷	-1.5 ²⁰	1.0 ¹	9.1 ¹⁹	56.6 ¹⁸	3.6 ¹⁶	83.6 ¹⁹	0.6 ¹⁷	113293 ²⁰	496665 ²¹	-14.7 ²⁰
C2A	1111 ¹²	1418036 ¹⁷	41252 ¹⁴	981972 ¹⁴	1.3 ¹⁶	1.8 ¹²	0.6 ¹²	7.4 ¹⁶	37.6 ¹⁶	2.9 ¹⁰	88.6 ¹⁵	1.3 ¹⁶	15958 ¹³	329596 ¹³	-5.7 ¹¹
C2Q	1032 ¹⁷	881135 ¹⁰	21460 ²	303366 ²	1.0 ¹	0.5 ⁹	1.2 ⁷	5.3 ⁷	22.6 ⁶	1.6 ³	85.1 ¹⁸	1.0 ¹	-5409 ⁶	364971 ¹⁶	-4.2 ⁷
C1O	1022 ¹⁸	567990 ²	21511 ³	305128 ³	0.8 ⁹	0.5 ¹⁰	1.0 ²	5.1 ⁶	17.6 ⁴	1.8 ⁴	88.7 ¹⁴	0.8 ¹²	-16045 ¹⁴	367170 ¹⁷	-3.3 ⁴
C1I	1078 ¹⁵	623912 ³	35691 ¹³	791311 ¹³	0.8 ¹³	-0.4 ¹⁸	0.8 ⁵	7.1 ¹⁴	36.2 ¹⁴	3.0 ¹²	92.4 ¹²	0.8 ¹³	14461 ¹²	353772 ¹⁵	-6.6 ¹⁵
C2M	893 ²¹	791257 ⁷	26819 ¹⁰	487115 ¹⁰	0.9 ⁶	0.2 ¹³	0.8 ⁶	5.0 ⁵	25.8 ⁸	1.3 ²	71.0 ²¹	0.9 ⁶	5565 ⁷	479205 ²⁰	-4.6 ⁸
Marrom	1307 ³	1770450 ²⁰	67283 ¹⁷	1874451 ¹⁷	1.4 ¹⁸	3.4 ¹⁹	1.4 ¹⁴	7.2 ¹⁵	37.0 ¹⁵	4.8 ¹⁹	107.3 ²	1.4 ¹⁸	48273 ¹⁸	185481 ³	5.9 ¹²
Carijó	1344 ¹	954095 ¹²	41537 ¹⁵	991724 ¹⁵	1.0 ²	2.1 ¹⁵	1.6 ¹⁹	6.6 ¹³	35.0 ¹³	5.1 ²¹	114.3 ¹	1.0 ²	40444 ¹⁷	135732 ²	5.3 ⁹
Tapaihum	1323 ²	1820184 ²¹	63038 ¹⁶	1728902 ¹⁶	1.4 ¹⁹	1.4 ⁸	1.6 ¹⁷	7.6 ¹⁷	40.0 ¹⁷	4.5 ¹⁸	104.7 ⁵	1.4 ¹⁹	26168 ¹⁵	123155 ¹	7.4 ¹⁶
Canapu	1211 ⁵	1652913 ¹⁹	286037 ²¹	9374599 ²¹	0.6 ²⁰	3.8 ²¹	1.6 ¹⁸	9.0 ¹⁸	58.2 ¹⁹	3.9 ¹⁷	95.4 ⁸	0.6 ²⁰	535127 ²¹	228627 ⁵	36.1 ²¹

¹⁷Ordem dos genótipos

Tabela 4. Estimativas do coeficiente de correlação de Spearman, aplicado às ordens de adaptabilidade e estabilidade de cada par de métodos para produção de grãos em 20 linhagens e três cultivares de feijão-caupi, porte semi ramador – PSR (acima da diagonal) e em 17 linhagens e quatro cultivares de feijão-caupi, de porte ereto e de crescimento determinado – PED (abaixo da diagonal) avaliados em sete ambientes no semiárido brasileiro

	Produção	TR	P&P	Wricke	F&W	ANN	Huehn	VC&M	E&R	L&B	AMMI
Produção		0.15	-0.13	-0.13	0.20	0.95**	-0.14	0.11	0.02	0.95**	-0.02
TR	-0.59**		0.49*	0.49*	0.09	0.34	0.32	0.37	0.38	0.16	0.56**
P&P	-0.39	0.31		1.00**	0.50*	0.06	0.80**	0.77**	0.87**	0.04	0.84**
Wricke	-0.39	0.31	1.00**		0.50*	0.06	0.80**	0.77**	0.87**	0.04	0.84**
F&W	-0.38	0.31	0.67**	0.67**		0.29	0.46*	0.53**	0.78**	0.37	0.49*
ANN	0.92**	-0.33	-0.27	-0.27	-0.29		0.04	0.25	0.18	0.95**	0.15
Huehn	-0.48*	-0.29	0.91**	0.91**	0.59**	-0.36		0.70**	0.78**	0.03	0.59**
V,C&M	-0.57**	0.25	0.75**	0.75**	0.38	-0.49*	0.81**		0.76**	0.18	0.68**
E&R	-0.29	0.20	0.77**	0.77**	0.84**	-0.21	0.67**	0.45*		0.20	0.74**
L&B	0.95**	-0.67**	-0.41	-0.41	-0.36	0.83**	-0.50*	-0.61**	-0.30		0.09
AMMI	-0.22	0.20	0.78**	0.78**	0.57**	-0.11	0.73**	0.48*	0.57**	-0.24	

**, *, NS: Significativo a 1%, 5% e não significativo para o teste F, respectivamente. TR - Tradicional, P&P - Plaisted & Peterson. F&W - Finlay & Wilkinson. ANN - Annicchiarico. VC&M - Verma, Chahal & Murty. E&R - Eberhart & Russell. L&B - Lin & Binns.

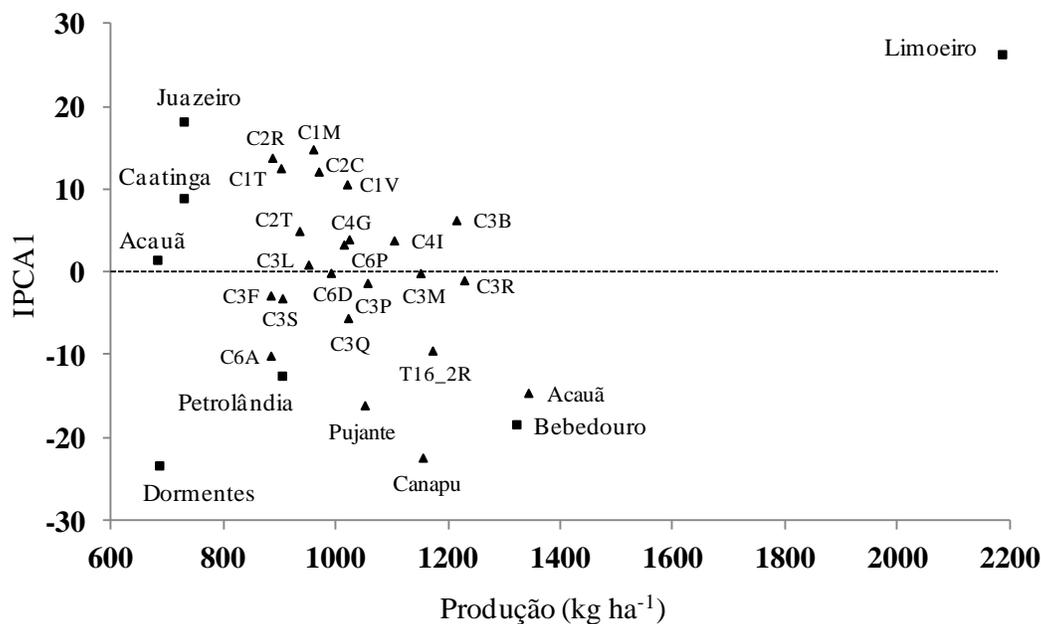


Figura 1. Biplot AMMI para produção de grãos em 20 linhagens e três cultivares (▲) de feijão-caupi (*Vigna unguiculata*) de porte semi ramador (A-PSR) avaliados em sete ambientes (■) irrigados e de sequeiro

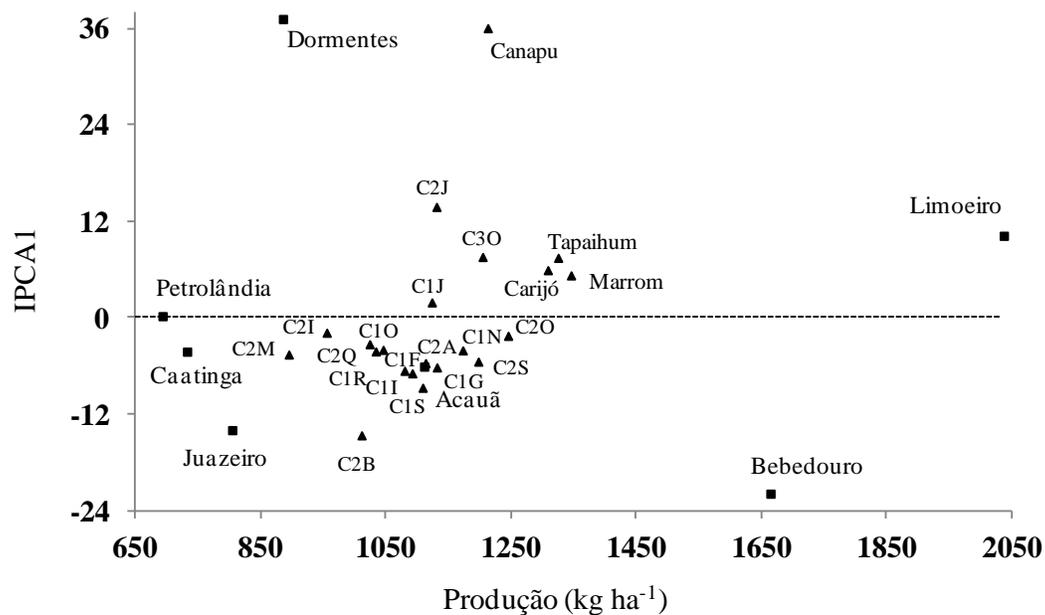


Figura 2. Biplot AMMI para produção de grãos em 17 linhagens e quatro cultivares de feijão-caupi (*Vigna unguiculata*) de porte ereto e de crescimento determinado (B-PED) avaliados em sete ambientes (■) irrigados e de sequeiro

CAPÍTULO II

PARÂMETROS DE ADAPTABILIDADE E ESTABILIDADE PARA TEOR DE PROTEÍNA TOTAL E PRODUÇÃO DE GRÃOS EM FEIJÃO-CAUPI (*Vigna unquiculata*) SUBMETIDOS A CONDIÇÕES SEMIÁRIDAS

Artigo - Adaptability and stability parameters of total seed yield and protein content in cowpea (*vigna unquiculata*) genotypes subjected to semi-arid conditions publicado no Australian Journal of Crop Science, disponível em: http://www.cropj.com/silva_10_8_2016_1164_1169.pdf

PARÂMETROS DE ADAPTABILIDADE E ESTABILIDADE PARA TEOR DE PROTEÍNA TOTAL E PRODUÇÃO DE GRÃOS EM FEIJÃO-CAUPI (*Vigna unguiculata*) SUBMETIDOS A CONDIÇÕES SEMIÁRIDAS

Danillo Olegario Matos da Silva¹, Carlos Antonio Fernandes Santos², Leonardo Silva Boiteux³

¹Programa de Pós Graduação em Recursos Genéticos Vegetais, UEFS, BA; ²Embrapa Semiárido, Petrolina, PE, Brasil; ³Embrapa Hortaliças, Brasília, DF, Brasil. danilloolegario@hotmail.com

Resumo

A seleção de genótipos de feijão-caupi que associem alta produção de grãos, elevado teor de proteínas, com ampla adaptabilidade e boa estabilidade em vários ambientes, será uma grande contribuição para populações que tem dificuldades em adquirir proteínas de origem animal em regiões semiáridas. O objetivo do presente estudo foi avaliar a adaptabilidade e estabilidade para o teor de proteína e produção de grãos em linhagens de feijão-caupi para possibilitar a recomendação de novas cultivares, que combinem alta produção de grãos e proteínas. Quarenta e quatro genótipos, distribuídos em dois experimentos de diferentes densidades populacionais, foram avaliados em sete ambientes, em dois delineamentos de blocos casualizados, com três repetições. A quantificação de proteína total em feijão seco foi realizada pelo método de Kjeldhal. Foi realizada a correção da produção de grãos por covariância com o stand médio de plantas. Foram observadas diferenças estatísticas significativas para genótipos e para a interação genótipo×ambiente para as duas variáveis, nos dois experimentos. As linhagens que apresentaram os maiores teores de proteínas apresentaram produções de grãos abaixo da média geral, nos dois experimentos. As linhagens C3Q, C3M, C2S e CIJ apresentaram produções de grãos igual ou superior a média geral de 1050 kg/ha dos experimentos, média de 27% de proteínas, estabilidade ampla e boa previsibilidade na série de ambientes avaliados, tanto pela metodologia de Eberhart e Russell, como Lin e Binns, tendo grande potencial para serem recomendadas como novas cultivares para a região do semiárido brasileiro.

Palavras-chave: *Vigna unguiculata*, interação genótipo×ambiente, semiárido.

ADAPTABILITY AND STABILITY PARAMETERS OF TOTAL SEED YIELD AND PROTEIN CONTENT IN COWPEA (*Vigna unguiculata*) GENOTYPES SUBJECTED TO SEMI-ARID CONDITIONS

Abstract

The selection of superior cultivars through the combination of high yield and protein content cowpea seeds in semi-arid tropical regions have a huge positive impact on the production-market chains in places where there is short availability of protein sources for human consumption. The main aim of the present study is to estimate the adaptability and stability parameters of total seed yield and protein content in cowpea genotypes in order to release new cultivars by combining these value-added traits. Forty-four inbred lines and cultivars were assessed under seven different environmental conditions, either rain-fed or irrigated crop management, in seven sites of the Brazilian semi-arid region. The seed protein content was quantified through the Kjeldahl method. Grain yield was adjusted in mean of plant per plot by the covariance method. Statistically significant differences in the genotype as well as in the genotype×environment interaction were observed in all the assays. The inbred lines presenting the highest protein contents showed the lowest grain yields, and it indicated the prominent “phenotypic cost” of protein in overall cowpea seed production. However, the breakage between the herein assessed association was observed in inbred lines subgroups such as ‘C3Q’, ‘C3M’, ‘C2S’, and ‘CIJ’. These lines showed yield close to or above 1050 kg/ha and mean protein content of 27%, as well as good adaptability and stability in different environments, as it was simultaneously indicated through two methodologies. Therefore, these inbred lines may represent a potential elite germplasm in cowpea breeding programs and/or in the releasing of new cultivars adapted to the semi-arid region.

Key words: *Vigna unguiculata*, genotype×environment interaction, semi-arid.

INTRODUÇÃO

O Feijão-Caupi [*Vigna unguiculata* (L.) Walp.] é uma cultura importante em regiões semiáridas, devido à sua capacidade natural para suportar o estresse hídrico e apresentar teor de proteína nas suas sementes, principalmente em locais onde há falta de fontes de proteínas para as

populações (Vasconcelos et al. 2010). Além disso, as sementes de feijão-caupi são ricas em calorias, bem como sais minerais e vitaminas essenciais (Iqbal et al. 2006; Santos e Boiteux, 2015). O teor de proteína total em sementes de feijão-caupi em bancos de germoplasmas é de aproximadamente 22 a 25% (Boukar et al. 2011). Trabalhos voltados para incrementar teor de proteína total permitirá o desenvolvimento de cultivares de caupi que atinjam teor de proteína de até 30% (Singh, 2007). Recentemente, linhas segregantes de feijão-caupi, apresentaram valor proteico médio de 34% sendo identificados em progênies derivadas de uma série de cruzamentos contrastantes (Santos et al. 2012). O valor total de proteínas de sementes de soja (que é a principal fonte de proteínas na dieta agrícola) é de aproximadamente 40% (Iqbal et al. 2006).

De acordo com a FAO (2014), estima-se que aproximadamente 805 milhões de pessoas estavam cronicamente subnutridas entre 2012 e 2014, e que não tinham acesso à ingestão diária de proteínas e carboidratos recomendada pela Organização Mundial de Saúde (OMS). A suplementação da dieta com proteínas vegetais é uma alternativa para melhorar o estado nutricional humano, uma vez que o nível de fornecimento adequado de proteínas de origem animal é difícil de alcançar ou muito caro em algumas regiões (Iqbal et al. 2006).

Muitos programas de melhoramento de plantas têm expandido seus objetivos através da combinação do aumento de produção e fator nutricional, a fim de enfrentar o desafio de diminuir a desnutrição humana e as doenças crônicas associadas a ela (Sands et al. 2009). De acordo com Santos e Boiteux (2013), o desenvolvimento de cultivares melhoradas de feijão-caupi, que apresente maiores teores de proteína e minerais, em combinação com um bom desempenho agrônômico, são considerados componentes importantes em programas que estão focados em contribuir para eliminar a desnutrição humana em regiões semiáridas.

Em geral, a adaptabilidade é a capacidade dos genótipos aproveitarem vantajosamente o estímulo do ambiente, enquanto, a estabilidade é a capacidade de os genótipos mostrarem um comportamento altamente previsível em função do estímulo do ambiente (Cruz e Regazzi, 1994). A estimativa da interação genótipo \times ambiente ($G \times E$) é uma importante informação para programas de melhoramento na seleção de cultivares com alto rendimento e melhoradas nutricionalmente. As metodologias estatísticas são muito utilizadas para estimar interação $G \times E$ e identificar cultivares que apresentam níveis de adaptabilidade e estabilidade superiores (Becker e Leon, 1988; Huehn, 1990a; 1990b; Cruz e Regazzi, 1994; Flores et al, 1998).

É importante analisar a interação G×E sempre que eles forem encontrados, bem como utilizar os resultados para avaliar o potencial de adaptação das linhas puras e cultivares (Kang, 1998). Uma grande variedade de métodos biométricos utilizados para estimar a estabilidade fenotípica e analisar interações G×E tem sido proposto (Becker e Leon, 1988; Flores et al. 1998). A adaptabilidade e estabilidade de produção de grãos em feijão-caupi foram investigadas por meio de análises de regressão linear (Mano, 2009; Nunes et al. 2014), descrito por Eberhart e Russell (1966), bem como através de análises não-paramétricas, como os descritos por Lin e Binns (1988). Por outro lado, estudos para estimar os parâmetros de adaptabilidade e estabilidade do feijão-caupi para o teor de proteína não estão disponíveis na literatura. Balesevic Tubic et al. (2011), avaliando variedades de soja em seis ambientes, observaram que o teor de proteína apresentou grande variação da estabilidade entre genótipos e ambientes quando comparado a produtividade de grãos. Arslanoglu et al. (2011) reportaram interação significativa para o teor de proteína em oito cultivares de soja, avaliadas em locais, sem, contudo, avaliarem a adaptabilidade e estabilidade das cultivares.

A seleção de cultivares superiores através da combinação de alto potencial produtivo e alto teor de proteína, e sua forte adaptabilidade e estabilidade em diferentes condições ambientais terá um enorme impacto positivo sobre as cadeias de produção de feijão-caupi no mercado. Assim, o principal objetivo do presente estudo é estimar parâmetros de adaptabilidade e estabilidade para o teor de proteína e produção de grãos em linhagens de feijão-caupi, a fim de lançar novas cultivares através da combinação desses atributos de valor agregado.

RESULTADOS

Avaliações ambientais

Foram observadas diferenças estatísticas significativas para os quadrados médios de tratamentos, tanto para produção quanto para o teor de proteína, em quase todos os ambientes, exceto para produção de grãos nos ambientes de Acauã, Juazeiro e Petrolândia, no experimento PSR (Tabela 1). Os experimentos de Acauã, Dormentes, Limoeiro e Petrolândia foram conduzidos em propriedades de agricultores, que não comprometeram as avaliações,

considerando que os coeficientes de variação foram abaixo de 43% (Tabela 1), além de terem permitido avaliações em ambientes representativos do cultivo da espécie.

O ambiente de Limoeiro foi o que apresentou as maiores médias de produção de grãos, (Tabela 1), indicando o potencial de produção das linhagens avaliadas, que em condições de alta tecnologia, como observada em Limoeiro, algumas delas podem superar 3000 kg/ha. Os ambientes de Juazeiro e Petrolândia apresentaram as menores médias para teor de proteínas, em torno de 25%, em ambos os experimentos (Tabela 1). Esses valores podem estar relacionados com a fertilidade do solo ou mesmo a ausência de bactérias fixadoras de nitrogênio, como apontado por Marinho et al. (2014).

As relações entre os maiores e menores quadrados dos resíduos observados nos experimentos PED e PSR foram inferiores ou próximo a sete para as duas variáveis, indicando homogeneidade das variâncias residuais, condição necessária para a análise conjunta de experimentos (Cruz e Regazzi, 1994).

As médias de produção de grãos nos quatro ambientes irrigados foram 84% e 45% superiores para PSR e PED, respectivamente, em relação a média dos três ambientes de sequeiro (Tabela 1), corroborando resultados reportados por Santos et al. (2008). As médias dos teores de proteínas apresentaram valores próximos, independente do manejo adotado, com ou sem irrigação (Tabela 1).

Parâmetros de adaptabilidade e estabilidade fenotípica de rendimento de grãos e teor de proteína em genótipos de feijão-caupi

As cultivares BRS Acauã, no experimento PSR, e as cultivares BRS Carijó e BRS Tapaihum, no experimento PED, foram as que apresentaram as maiores produções de grãos (Tabelas 2 e 3). Essas cultivares foram avaliadas anteriormente nos mesmos locais que as linhagens dessa pesquisa foram avaliadas (exceto Limoeiro), e foram selecionadas exclusivamente para produção de grãos e precocidade (Santos et al., 2008).

As linhagens C3R e C3B, no experimento PSR, apresentaram produtividade de grãos próxima da cultivar controle BRS Acauã, bem como parâmetros de ampla adaptabilidade e boa estabilidade, tanto pelo método de Eberhart e Russell, como pelo método de Lin e Binns (Tabela 2). A linhagem C2O, no experimento PED, também apresentou produtividade de grãos próximo

das cultivares controle BRS Carijó e BRS Tapaihum, bem como parâmetros de ampla adaptabilidade e boa estabilidade, tanto pelo método de Eberhart e Russell, como pelo método de Lin e Binns (Tabela 3).

As menores médias para os teores de proteína foram observadas em Juazeiro-BA e Petrolina-PE (Tabela 1), possivelmente devido a baixa fertilidade do solo e/ou a ausência de bactérias fixadoras de nitrogênio. As linhagens C2R, C3S e C3F, no experimento PSR, e C2M e C2I, no experimento PED, apresentaram valores médios de proteínas em torno de 30%, que é quase 20% superior aos valores das cultivares controle BRS Acauã, BRS Carijó, BRS Tapaihum e Canapu, uma `landrace` da região. As linhagens que apresentaram os maiores teores de proteínas apresentaram produções de grãos bem abaixo da média geral dos experimentos PSR e PED (Tabelas 2 e 3). As linhagens C2R, C3S, C3F e C2I apresentaram parâmetros de ampla adaptabilidade e boa estabilidade para teor de proteínas, tanto pelo método de Eberhart e Russell, como pelo método de Lin e Binns (Tabelas 2 e 3). No entanto, as linhagens C2M e C2I apresentaram as menores produções. Esses resultados indicam dificuldades em selecionar linhagens que apresentem os maiores teores de proteínas associados com alta produção de grãos.

DISCUSSÃO

A recomendação de cultivares que apresentam boa adaptabilidade e estabilidade é essencial em países que compreendem diversas regiões agroecológicas, sistemas de gestão de culturas distintas e estações climáticas bem definidas. Assim, o conhecimento sobre a interação $G \times E$ é necessária para estimar as diferentes respostas de cultivares/linhagens a uma ampla área de condições ambientais (Becker e Leon, 1988; Simmonds, 1991; Cruz e Regazzi, 1994). Devido ao alto custo da proteína de origem animal, proteínas vegetais, oriundas de leguminosas como o feijão-caupi, tornam-se uma boa opção para compor a dieta de diversas populações (Iqbal et al., 2006), principalmente daquelas que vivem em regiões semiáridas. O feijão-caupi apresenta teores elevados e pode produzir maior quantidade de proteínas do que outras culturas tradicionais de pequenos produtores em regiões semiáridas, como mandioca, batata doce e sorgo (Jager, 2013).

Boukar et al., (2011) reportaram resultados demonstrando a grande variabilidade do feijão-caupi para teor de proteínas, enquanto que Santos et al. (2012) indicaram, que apesar do controle

poligênico, o desenvolvimento de cultivares com teores elevados de proteínas pode ser obtido, de forma relativamente simples, via métodos tradicionais de melhoramento para plantas autógamas. Cultivares de feijão-caupi com teores de 30% de proteínas tem sido recomendado para o continente africano (Singh, 2007), e mais recentemente Santos e Boiteux (2013) reportaram a seleção de linhagens com até 34% de proteínas no semiárido brasileiro, indicando a possibilidade do desenvolvimento de cultivares de feijão-caupi com teor proteico acima da média de 24% da espécie.

Estudos da interação genótipo x ambiente para o teor de proteínas são escassos para ‘commodities’ importantes como a soja, e não foram encontrados para feijão-caupi, sendo esse trabalho pioneiro para essa espécie. Avaliações multi-locais de genótipos de feijão-caupi que associem altos rendimentos de grãos e teores de proteínas são de grande importância, pois podem permitir indicar genótipos que tenham boa performance, em diferentes ambientes de cultivo ou genótipos, que respondam a melhoria no manejo, como uso de irrigação.

Vários métodos estatísticos têm sido desenvolvidos e aplicados para interpretar a interação genótipo x ambiente e identificar genótipos de comportamento estável, em vários ambientes, e que apresentem previsibilidade as respostas ambientais. Os métodos de regressão linear (Eberhart e Russell, 1966) e não paramétrico, (Lin e Binns, 1988), que pode ser usado com violações de pressuposições para modelos estatísticos, têm sido utilizados amplamente em estudos da interação genótipo x ambiente, e tem apresentado baixa correlação entre eles (Silva e Duarte, 2006), indicando que um método não substitui o outro e que devem ser aplicados conjuntamente (Pereira et al., 2009), como utilizado na presente pesquisa.

Os valores máximos para o teor de proteína neste trabalho são próximos dos valores máximos de cultivares selecionadas e recomendadas pelo International Institute of Tropical Agriculture (IITA) (Singh, 2007), para o continente africano. As linhagens C2R, C3S, C3F, C2M e C2S apresentaram valores para o teor de proteínas quase similar em avaliação anterior dessas linhagens, exceto C2R que apresentou média de 34.1% (Santos e Boiteux, 2013).

Os resultados observados, nesse trabalho, indicam dificuldades para seleção de linhagens que combinem altas produções de grãos e proteínas, pois as linhagens que apresentaram os maiores teores de proteínas não foram as mesmas que apresentaram as maiores produções de grãos, e vice-versa. Santos e Boiteux (2013) reportaram correlações fenotípicas não significativas entre essas duas variáveis, indicando ser possível a seleção de linhagens com alta

produção de grãos e elevados teores de proteínas, sendo que essa situação não foi observada no presente trabalho. Melo Filho et al (2004) reportaram correlações negativas entre produção de grãos e proteínas em oito populações de soja, sendo possível usar essa variação para manipulação independente dessas duas características (Wilson, 2004). Uma alternativa para contornar os limites impostos pela associação entre essas duas variáveis é a seleção para valores intermediários ou acima da média dos experimentos para produção de grãos e de proteínas.

As linhagens C3Q, C3M, C2S e CIJ apresentaram produções de grãos igual ou superior as médias dos experimentos, teores de proteínas superior a média, estabilidade ampla e boa previsibilidade na série de ambientes avaliados, tanto pela metodologia de Eberhart e Russell (1966), como Lin e Binns (1988) (Tabelas 2 e 3), tendo grande potencial para serem recomendadas como novas cultivares para a região do semiárido brasileiro. As linhagens que apresentaram maiores teores de proteínas, como C2R, C3S, C2M e C2I, podem ser usadas em retrocruzamentos com as linhagens C3Q e C3M, C2S e CIJ, buscando a elevação simultânea da produção de grãos e proteínas, como descrito por Wilcox e Cavins (1995) para soja.

O feijão-caupi é cultivado largamente em regiões semiáridas devido a sua tolerância ao stress hídrico, sendo capaz de produções de grãos significativas quando comparado com outras leguminosas, tal como feijão comum e grão de bico. Nesse contexto, a seleção de cultivares que associem altos teores de proteínas com produção de grão será uma grande contribuição para as populações de regiões semiáridas, onde parte da população não tem recursos para compra diária de proteínas de origem animal.

As linhagens C3Q, C3M, C2S e CIJ identificadas nas análises dos experimentos em ambientes representativos do semiárido brasileiro, tanto irrigado, como de sequeiro, tem grande potencial para serem recomendadas como novas cultivares para a região, pois apresentaram produções de grãos próximo de cultivares comerciais, bem como valores médios de proteínas de 27%, que é quase 10% superior ao valor de 24% disponíveis nas cultivares comerciais de feijão-caupi. Esforços para minimizar o efeito das correlações negativas entre produção de grãos e proteínas devem ser realizados, para que o patamar de 30% de teor de proteína seja rompido, associando com altos teores de produção de grãos.

MATERIAIS E MÉTODOS

Material vegetal

Foram avaliadas linhagens de feijão-caupi desenvolvidas e selecionadas para altos teores de proteínas e produção de grãos, resultantes de cruzamentos de três acessos introduzidos do International Institute for Tropical Agriculture (IITA), com três cultivares adaptadas ao semiárido brasileiro, conforme procedimentos descritos Santos & Boiteux (2013). As linhagens selecionadas formaram dois experimentos, considerando o tipo do porte da planta: 1) porte semi ramador e crescimento indeterminado (PSR), com 23 tratamentos, sendo 20 linhagens e três cultivares controles, e 2) porte ereto e de crescimento determinado (PED), com 21 tratamentos, sendo 17 linhagens e quatro cultivares controles. Os experimentos foram conduzidos sem aplicação de fertilizantes e sem inoculação com Rizobium, que podem elevar o teor de nitrogênio, e conseqüentemente de proteínas (Marinho et al., 2014).

Os experimentos foram conduzidos em locais nos estados da Bahia, Ceará, Pernambuco e Piauí, Brasil. O delineamento experimental foi de blocos casualizados, com três repetições, sendo quatro ambientes irrigados no segundo semestre do ano e três ambientes de sequeiro, no primeiro semestre do ano. Cada parcela apresentou as dimensões de 3,0 x 2,0 m, com área útil de 3 m². A parcela experimental do experimento PSR foi formada por duas fileiras linhas, no espaçamento de 1,0 m entre as fileiras de 0,1 m entre plantas, resultando na densidade populacional de 100.000 plantas/ha, enquanto a parcela experimental do experimento PED foi formada por quatro fileiras, no espaçamento de 0,5 m entre as fileiras de 0,1 m entre plantas, com densidade populacional de 200.000 plantas/ha.

Quantificação de proteína

A quantificação de proteína total em feijão seco foi realizada pelo método de Kjeldhal, como descrito pelo método 920.87 da Association of Official Analytical Chemists (AOAC, 1995). Foram utilizados grãos livres da presença de insetos, fungos, podridões e danos físicos.

Aproximadamente 10 g de sementes de cada planta foram trituradas no moinho MA 630/1 (Marconi, Brasil). Adicionou-se 5 mL de solução digestora ácida a 0,02 mg de amostra de feijão seco moído. A digestão foi realizada em bloco digestor, com aumento gradativo da temperatura até 370°C para completa fixação do nitrogênio proteico em amônio, na forma de sulfato de

amônio. O nitrogênio foi então destilado, sendo submetido à reação com 15 mL de hidróxido de sódio e, simultaneamente, à destilação por arraste de vapor e recolhido na forma de amônia em 10 mL solução de ácido bórico a 2%, formando íons borato, que foram titulados com ácido clorídrico padronizado para quantificação do nitrogênio proteico e posterior conversão em teor de proteínas totais. A percentagem de nitrogênio foi calculada usando a fórmula: % N = 0.14 * fator de correção da solução de HCl * volume usado para titular HCl. A proteína foi determinada multiplicando a percentagem de nitrogênio pelo fator 6.25. A proteína total foi corrigida para a matéria seca, que foi obtida após a secagem das amostras a 106°C por 12h. Foram analisadas 924 amostras em duplicata para teor total de proteínas, sendo repetidas aquelas que apresentaram valores destoantes. Todas as análises foram realizadas no laboratório de nutrição animal da Embrapa Semiárido.

Análises estatísticas

As análises estatísticas para os delineamentos experimentais foram efetuadas no SAS (SAS, 1989), pelo procedimento GLM e a opção Lsmmeans (SAS, 1989). A produção de grãos foi corrigida pelo método da covariância com o stand de plantas médio das parcelas de cada experimento, como descrito por Vencovsky e Barriga (1992), usando programa SAS (1989). As avaliações de adaptabilidade e estabilidade dos genótipos foram realizadas utilizando os métodos de Eberhart e Russell (1966) e de Lin e Binns (1988), disponíveis no programa Genes (Cruz, 2006).

No método de Eberhart e Russell (1966) o coeficiente de regressão está associado ao componente linear, indicando a adaptabilidade do genótipo: genótipos com índice $\beta_i=1$ tem adaptabilidade ampla, sendo que desvios da regressão igual a zero ($\sigma_{di}^2=0$) indicam boa estabilidade. No método de Lin e Binns (1988) o parâmetro $P_i.gen$ define a estabilidade de um genótipo, sendo definido como o quadrado médio da distância entre a média de um genótipo e a resposta média máxima para todos os locais, de modo que, genótipos com menores valores correspondem aos de melhor desempenho. Adicionalmente, foram estimados os parâmetros $P_i.fav$ e $P_i.unfav$, como proposto por Carneiro (1998), que agregam informações do comportamento em ambientes favoráveis e desfavoráveis, sendo que os menores valores correspondem aos genótipos com melhores desempenhos nesses ambientes.

CONCLUSÃO

As linhagens que apresentaram os maiores teores de proteínas apresentaram produções de grãos abaixo da média geral, nos dois experimentos. As linhagens C3Q, C3M, C2S e CIJ apresentaram produções de grãos igual ou superior a média geral (1050 kg/ha) dos experimentos, média de 27% de proteínas, estabilidade ampla e boa previsibilidade na série de ambientes avaliados, tanto pela metodologia de Eberhart e Russell, como Lin e Binns, tendo grande potencial para serem recomendadas como novas cultivares para a região do semiárido brasileiro.

As linhagens que apresentaram maiores teores de proteínas, como C2R, C3S, C2M e C2I, podem ser usadas em retrocruzamentos com as linhagens C3Q e C3M, C2S e CIJ, buscando a elevação simultânea da produção de grãos e proteínas.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pelo apoio financeiro. Carlos A F Santos é pesquisador de produtividade do CNPq.

REFERÊNCIAS

Arslanoglu FS, Aytac S and, Oner EK (2011) Effect of genotype and environment interaction on oil and protein content of soybean (*Glycine max* (L.) Merrill) seed. *Afr J Biotechnol.* 10:18409-18417.

Association of Official Analytical Chemists (AOAC) 1995 Official method 920.87 - Protein (total) in flour, final action. In: P. Cunniff, editor, Official methods of analysis of the association of official analytical chemists 16th ed. AOAC, Arlington, VA vol 2, chapter 32, p 12-13.

Balešević-Tubic S, Dorđević V, Miladinović J, Dukić V, Miladinović J, Dukić V, Tatić M (2011) Stability of soybean seed composition. *Genetika+*. 43:217-227. Becker HC, Leon J (1988) Stability analysis in plant breeding. *Plant Breeding* 101: 1-23.

Boukar OF, Massawe S, Muranaka J, Franco M, Dixon B, Singh, Fatokun C (2011) Evaluation of cowpea germplasm lines for protein and mineral concentrations in grains. *Acta Hort.* 9:515-522.

Carneiro PCS (1998) Novas metodologias de análise da adaptabilidade e estabilidade de comportamento. Ph.D. diss., Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brazil.

Cruz CD (2006) Software GENES: computational methodologies for genetics and statistics. Imprensa Universitaria, Vicoso, Brazil.

Cruz CD, Regazzi AJ (1994) Biometrical model applied to genetic improvement. Imprensa Universitaria, Vicoso, Brazil.

Eberhart SA, Russell W (1966) Stability parameters for comparing varieties. *Crop Sci.* 6:36-40.

FAO (2014) The State of Food Insecurity in the World 2014. Strengthening the enabling environment for food security and nutrition. FAO, Rome. Flores F, Moreno MT, Cubero JI (1998) A comparison of univariate and multivariate methods to analyze G×E interaction. *Field Crop Res.* 56: 271–286. Huehn M (1990a) Nonparametric measures of phenotypic stability Part 1: Theory. *Euphytica.* 47: 189–194. Huehn M (1990b) Nonparametric measures of phenotypic stability Part 2: Applications. *Euphytica.* 47: 195–201.

Iqbal A, Khalil IA, Ateeq N, Khan MS (2006) Nutritional quality of important food legumes. *Food Chem.* 97:331-335.

Jager I (2013) Nutritional benefits of legume consumption at household level in rural areas of sub-Saharan Africa: A literature study. www.N2Africa.org, number of pages pp. 95. jfca. 2009.05.008

Kang MS (1998) Using genotype-by-environment interaction for crop cultivar development. *Adv Agron.* 62, 200-252.

Lin CS, Binns MRA (1988) A superiority measure of cultivar performance for cultivar x location data. *Can J Plant Sci.* 68:193-198.

Mano ARO (2009). Adaptabilidade e estabilidade fenotípica de cultivares de feijão-de-corda. Ph.D. diss., Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brazil.

Marinho RCN, Nobrega RSA, Zilli JE, Kavier GR, Santos CAF, Aidar S de T, Martins LMV, Fernandes Junior PI (2014) Field performance of new cowpea cultivars inoculated with efficient nitrogen-fixing rhizobial strains in the Brazilian semiarid. *Pesqui Agropecu Bras.* 49:395-402.

Freire Filho FR (2011) Feijão-caupi no Brasil: Produção, melhoramento genético, avanços e desafios. Embrapa Meio- Norte, Teresina.

Mello Filho OD, Sedyama CS, Moreira MA, Reis MS, Massoni GA, Piovesan ND (2004) Grain yield and seed quality of soybean selected for high protein content. *Pesq agropec bras.* Brasília, v.39, n.5, p.445-450.

Nunes HF, Freire Filho FR, Ribeiro VQ, Gomes RLF (2014) Grain yield adaptability and stability of blackeyed cowpea genotypes under rainfed agriculture in Brazil. *Afr J Agric Res.* 9:255-261.

Pereira HS, Melo LC, del Peloso MJ, Faria LC, Costa JGC, Cabrera Díaz JL, Rava CA, Wendland A (2009) Comparison of methods for phenotypic adaptability and stability analysis in common bean. *Pesq Agropec Bras.* 44:374-383.

Sands DC, Morris CE, Dratz EA, Pilgeram AL (2009) Elevating optimal human nutrition to a central goal of plant breeding and production of plant-based foods. *Plant Sci.* 177: 377–389.

Santos CAF, Barros GAA, Santos ICC, Ferraz MGS (2008). Agronomic and cooking quality of cowpea evaluated in the São Francisco valley, Brazil. *Hortic Bras.* 26: 404-408.

Santos CAF, Boiteux LS (2013) Breeding biofortified cowpea lines for semi-arid tropical areas by combining higher seed protein and mineral levels. *Genet Mol Res.* 12:6782-6789.

Santos CAF, Boiteux LS (2015) Genetic control and transgressive segregation of zinc, iron, potassium, phosphorus, calcium, and sodium accumulation in cowpea (*Vigna unguiculata*) seeds *Genet Mol Res.* 14: 259–268.

Santos CAF, Costa DCC, Silva WR, Boiteux LS (2012) Genetic analysis of total seed protein content in two cowpea crosses. *Crop Sci.* 52:2501-2506.

SAS Institute (1989) User's guide: Statistics. SAS Inst., Cary, NC.

Silva WCJ, Duarte JB (2006) Statistical methods to study phenotypic adaptability and stability in soybean. *Pesqui Agropecu Bras.* 41:23-30. Simmonds NW (1991) Selection for local adaptation in a plant breeding programme. *Theor Appl Genet.* 82: 363–367.

Singh BB (2007) Recent progress in cowpea genetics and breeding. *Acta Hort.* 752: 69-75.

Vasconcelos IM, Maia FMM, Farias DF, Campello CC, Carvalho AFO, Moreira RA, Abreu de Oliveira JT (2010) Protein fractions, amino acid composition and antinutritional constituents of high-yielding cowpea cultivars. *J Food Compost. Anal.* 23:54–60.

Vencovsky R, Barriga P (1992) Genética biométrica no fitomelhoramento. Sociedade Brasileira de Genética. Ribeirao Preto, Brazil.

Wilcox JR, Cavins JF (1995) Backcrossing high seed protein to a soybean cultivar. *Crop Sci.* 35:1036– 1041. Wilson RF (2004) Seed composition. In: Boerma H and Specht JE, editors, *Soybeans: Improvement, Production, and Uses*. 3rd Edition, ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI. P. 621-668.

Tabela 1. Quadrado médio total (QMT), quadrado médio do resíduo (QMR), médias e coeficiente de variação (CV) relacionado para produção e teor de proteína em 20 linhagens e três cultivares (Experimento PSR - porte semi ramador) e 17 linhagens e quatro cultivares de feijão-caupi (experimento PED - porte ereto e de crescimento determinado) avaliados em sete ambientes irrigados e de sequeiro.

Local	Manejo	CV (%)	Produção de grãos (kg ha ⁻¹)			Teor de proteína (%)		
			MPg	QMR	QMT	MPr	QMR	QMT
Experimento PSR								
Acauã, PI	Sequeiro/2011	30	684	42345	87189**	26.8	0.87	8.6**
Petrolina, PE	Irrigado/2011	18	1322	57712	306194**	27.9	0.31	6.0**
Petrolina, PE	Sequeiro/2011	24	727	32140	90050**	27.6	1.04	9.6**
Dormentes, PE	Sequeiro/2011	36	689	60272	355248**	27.4	0.76	7.3**
Limoeiro, CE	Irrigado/2010	15	2192	114883	278797**	27.2	0.16	7.3**
Juazeiro, BA	Irrigado/2011	43	729	97575	202060*	24.9	0.86	8.6**
Petrolândia, PE	Irrigado/2011	32	897	81818	259048**	25.1	0.33	9.3**
Irrigado	-		1285	-	-	26.3	-	-
Sequeiro	-		700	-	-	27.3	-	-
Experimento PED								
Acauã, PI	Sequeiro/2011	26	1087	78306	86308 ^{NS}	26.8	1.37	8.0**
Petrolina, PE	Irrigado/2011	15	1697	62900	121491*	26.7	0.43	9.3**
Petrolina, PE	Sequeiro/2011	23	734	28273	52592*	27.4	0.6	7.7**
Dormentes, PE	Sequeiro/2011	31	887	75526	653413**	27.4	1.34	8.2**
Limoeiro, CE	Irrigado/2010	15	2057	102030	398371**	26.7	0.24	7.3**
Juazeiro, BA	Irrigado/2011	36	806	83516	116106 ^{NS}	24.5	1.24	5.9**
Petrolândia, PE	Irrigado/2011	38	692	71214	98114 ^{NS}	24.8	0.28	11.8**
Irrigado	-		1313	-	-	25.7	-	-
Sequeiro	-		903	-	-	27.2	-	-

** , * , ^{NS}: Significativo a 1%, 5% não significativopara o teste F, respectivamente

Tabela 2. Estabilidade e adaptabilidade para produção e teor de proteína em 20 linhagens e três cultivares de feijão-caupi, porte semi ramador (PSR) avaliados em sete ambientes irrigados e de sequeiro utilizando o método Eberhart & Russell, 1966 e Lin & Binns, 1988.

Genótipos	Produção de grãos						Teor de proteína					
	Média	Eberhart&Russell		Lin&Binns			Média	Eberhart&Russell		Lin&Binns		
		β_1	σ^2_{di}	P _{i-gen}	P _{i-fav}	P _{i-desfav}		β_1	σ^2_{di}	P _{i-gen}	P _{i-fav}	P _{i-desfav}
01-C2R	886	1.3*	37767*	344349	341302	260596	30.1	1.2 ^{NS}	0.07 ^{NS}	0.02	.	0.07
02-C3S	904	1.0 ^{NS}	16770 ^{NS}	305069	256547	195908	29.0	0.9 ^{NS}	-0.06 ^{NS}	0.71	0.82	0.41
08-C3F	883	0.8 ^{NS}	1281 ^{NS}	315024	448315	345567	28.7	0.7*	0.59**	1.59	2.00	0.55
06-C6P	1013	0.9 ^{NS}	-2161 ^{NS}	224767	237240	190859	27.6	1.1 ^{NS}	0.27*	3.39	3.49	3.14
18-C1V	1019	1.2 ^{NS}	64770**	243650	363006	284308	27.6	1.0 ^{NS}	0.70**	3.89	3.83	4.04
04-C3Q	1021	1.2 ^{NS}	40905*	219184	115656	116089	27.3	1.2 ^{NS}	-0.00 ^{NS}	4.23	3.98	4.87
10-C2C	968	1.3*	29413 ^{NS}	287946	245638	194252	27.3	0.8 ^{NS}	0.02 ^{NS}	4.43	5.02	2.97
07-C1M	959	1.4**	58313**	301820	345600	268625	27.1	0.8 ^{NS}	0.06 ^{NS}	4.72	5.23	3.44
03-C3M	1150	0.9 ^{NS}	-10959 ^{NS}	152055	178216	145716	27.0	1.3*	0.91**	5.2	4.54	6.88
20-T16-2R	1171	1.0 ^{NS}	69547**	131728	96759	100742	27.0	0.6*	0.88**	5.44	6.32	3.24
09-C3L	950	1.0 ^{NS}	-22570 ^{NS}	249086	270084	199241	27.0	1.3*	0.77**	5.62	4.85	7.55
11-C1T	901	1.1 ^{NS}	50964*	331871	342600	261708	26.8	0.8 ^{NS}	0.44**	6.11	6.65	4.74
05-C3B	1214	0.9 ^{NS}	21638 ^{NS}	144688	201687	186056	26.7	0.9 ^{NS}	0.26*	6.22	6.69	5.0
13-C4G	1023	0.7*	27058 ^{NS}	251814	383246	304870	26.6	0.9 ^{NS}	0.35*	6.62	7.28	4.99
14-C6A	883	0.8 ^{NS}	30778*	310255	414330	327579	26.4	1.2 ^{NS}	-0.07 ^{NS}	6.97	6.54	8.05
15-C2T	934	0.9 ^{NS}	6603 ^{NS}	293622	333083	250318	26.3	1.2 ^{NS}	0.15 ^{NS}	7.73	6.92	9.78
22-BRSPujante	1050	0.8 ^{NS}	185586**	226464	315477	240687	26.1	0.1**	0.95**	9.80	11.86	4.63
19-C4I	1102	1.0 ^{NS}	-4448 ^{NS}	171894	136489	121888	26.0	1.4**	0.61**	10.57	9.38	13.57
16-C3P	1055	0.7*	27301 ^{NS}	239393	352244	277838	25.2	1.7**	0.13 ^{NS}	12.75	10.39	18.65
17-C6D	990	0.9 ^{NS}	43453*	256330	271362	219778	25.0	1.6**	0.94**	14.12	12.13	19.10
21-BRSAcauã	1341	1.0 ^{NS}	112508**	63731	60427	65052	24.6	1.0 ^{NS}	0.56**	15.79	16.08	15.07
23-Canapu	1154	0.5**	175495**	184265	393071	324478	24.3	0.3**	0.49**	18.05	20.28	12.47
12-C3R	1228	0.8 ^{NS}	-6056 ^{NS}	125105	147645	141590	24.1	0.6*	0.57**	18.43	20.56	13.11
Média geral				1034						26.7		
G*E				209439**						2.1**		

** , * , ^{NS} Significativo a 1%, 5% e não significativo para o teste F, respectivamente.

Tabela 3. Estabilidade e adaptabilidade para produção e teor proteína, em 17 linhagens e quatro cultivares de feijão-caupi, porte ereto e de crescimento determinado (PED) avaliados em sete ambientes irrigados e de sequeiro utilizando o método Eberhart & Russell, 1966 e Lin & Binns, 1988.

Genótipos	Produção de grãos						Teor de proteína							
	Média	Eberhart&Russell			Lin&Binns			Média	Eberhart&Russell			Lin&Binns		
		β_1	σ^2_{di}	$P_{i\cdot gen}$	$P_{i\cdot fav}$	$P_{i\cdot desfav}$	β_1		σ^2_{di}	$P_{i\cdot gen}$	$P_{i\cdot fav}$	$P_{i\cdot desfav}$		
17-C2M	893	0.9 ^{NS}	-35771 ^{NS}	479205	460190	486811	30.9	0.2**	-0.12 ^{NS}	0.06	0.08	.		
04-C2I	953	0.9 ^{NS}	-53143 ^{NS}	404583	403348	405077	29.5	1.3 ^{NS}	0.23 ^{NS}	1.91	0.67	5.02		
11-C2S	1196	0.9 ^{NS}	-45261 ^{NS}	276386	212120	302092	27.3	1.1 ^{NS}	0.02 ^{NS}	7.56	5.45	12.85		
08-C1J	1121	1.0 ^{NS}	-38895 ^{NS}	249457	210761	264935	27.1	0.8 ^{NS}	-0.05 ^{NS}	8.50	7.63	10.67		
02-C1R	1044	0.9 ^{NS}	-35616 ^{NS}	372225	284631	407263	26.9	1.1 ^{NS}	-0.21 ^{NS}	9.21	6.57	15.81		
16-C1I	1078	0.8 ^{NS}	-26876 ^{NS}	353772	424630	325429	26.7	1.2 ^{NS}	-0.52 ^{NS}	10.28	7.42	17.43		
06-C1S	1107	0.9 ^{NS}	-28073 ^{NS}	344578	283321	369081	26.5	0.9 ^{NS}	-0.43 ^{NS}	10.53	8.55	15.50		
03-C3O	1203	0.4*	-5183 ^{NS}	235209	479624	137443	26.4	1.4 ^{NS}	0.05 ^{NS}	11.92	7.81	22.19		
01-C1N	1171	1.2 ^{NS}	-55352 ^{NS}	269488	110202	333203	26.0	1.2 ^{NS}	-0.43 ^{NS}	13.44	10.20	21.54		
09-C1F	1111	1.1 ^{NS}	-45872 ^{NS}	322260	169606	383321	26.0	1.1 ^{NS}	1.55**	14.31	11.72	20.78		
12-C2B	1009	0.6 ^{NS}	71955 ^{NS}	496665	706628	412680	26.0	1.6*	0.56 ^{NS}	14.46	8.74	28.76		
10-C2O	1243	1.1 ^{NS}	-46357 ^{NS}	232238	119297	277415	25.9	0.7 ^{NS}	-0.63 ^{NS}	13.71	12.54	16.62		
07-C2J	1129	1.2 ^{NS}	43212 ^{NS}	202587	126085	233188	25.9	0.7 ^{NS}	-0.36 ^{NS}	13.88	12.30	17.85		
14-C2Q	1032	1.0 ^{NS}	-46745 ^{NS}	364971	305326	388829	25.9	1.1 ^{NS}	-0.27 ^{NS}	14.08	11.35	20.91		
13-C2A	1111	1.2 ^{NS}	-25378 ^{NS}	329596	102366	420488	25.9	1.2 ^{NS}	-0.17 ^{NS}	14.21	11.42	21.21		
05-C1G	1129	1.0 ^{NS}	-42325 ^{NS}	304343	199124	346430	25.9	1.4 ^{NS}	-0.14 ^{NS}	14.69	10.95	24.04		
15-C1O	1022	0.8 ^{NS}	-57381 ^{NS}	367170	429704	342156	25.8	0.6 ^{NS}	-0.18 ^{NS}	14.56	13.26	17.82		
21-Canapu	1211	0.5*	493790 ^{NS}	228627	589931	84105	25.4	0.4 ^{NS}	-0.43 ^{NS}	16.17	15.59	17.65		
19-BRS Carijo	1344	0.9 ^{NS}	-893 ^{NS}	135731	129146	138366	25.0	1.1 ^{NS}	0.37 ^{NS}	19.13	15.75	27.56		
20-BRS Tapaihum	1323	1.4 ^{NS}	-15169 ^{NS}	123155	17749	165317	24.5	0.8 ^{NS}	-0.63 ^{NS}	21.77	19.44	27.59		
18-18Marrom	1307	1.4 ^{NS}	6935 ^{NS}	185480	61935	234898	23.8	0.6 ^{NS}	0.03 ^{NS}	26.57	24.9	30.53		
Média geral				1130						26.4				
G*E				200801**						2.01**				

** , * , ^{NS} Significativo a 1%, 5% e não significativo para o teste F, respectivamente.

CAPÍTULO III

PARÂMETROS DE ADAPTABILIDADE E ESTABILIDADE PARA TEORES DE FERRO, ZINCO E PRODUÇÃO DE GRÃOS EM LINHAGENS DE FEIJÃO-CAUPI NA REGIÕES DO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

Artigo - Adaptability and stability parameters of iron and zinc contents and grain yield in cowpea lines in the brazilian semi-arid publicadona Crop Science 57:1-10 (2017). doi: 10.2135/cropsci2016.06.502

PARÂMETROS DE ADAPTABILIDADE E ESTABILIDADE PARA TEORES DE FERRO, ZINCO E PRODUÇÃO DE GRÃOS EM LINHAGENS DE FEIJÃO-CAUPI NA REGIÃO DO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

Danillo Olegario Matos da Silva^{1*}, Carlos Antonio Fernandes Santos²

¹Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS), Programa de Pós-graduação em Recursos Genéticos Vegetais. Avenida Transnordestina, SN, Novo Horizonte, 44.036-900, Feira de Santana-BA, Brazil; E-mail: danilloolegario@hotmail.com *corresponding author.

²Embrapa Semiárido. CP 23, CEP 56302-970, Petrolina-PE, Brasil;

Resumo

A biofortificação do feijão-caupi terá grande impacto no futuro, pois representa uma rica fonte de alimento, principalmente de proteínas, ferro e zinco. O objetivo do presente estudo foi avaliar a adaptabilidade e estabilidade para o teor de Fe, Zn e produção de grãos em linhagens de feijão-caupi para possibilitar a recomendação de novas cultivares. Quarenta e quatro genótipos, distribuídos em dois experimentos de diferentes densidades populacionais, foram avaliados em sete ambientes, em dois delineamentos de blocos casualizados, com três repetições. Os minerais, Fe e Zn, foram avaliados de acordo com procedimento padrão da AOAC. Foram observadas diferenças estatísticas significativas ($p < 0,01$) dos quadrados médios de tratamentos, dos ambientes e das interações ambientes*tratamentos para as três variáveis. As linhagens que apresentaram os maiores teores de Fe e Zn apresentaram produções de grãos abaixo da média geral, nos dois experimentos. Os três métodos apresentaram resultados semelhantes quanto a seleção de materiais superiores. As linhagens C4I e T16_2R apresentaram produções de grãos igual ou superior a média geral de 1030 kg/ha e 1134 kg/ha dos experimentos, com valores médios de Fe e Zn 15% superiores aos valores das cultivares avaliadas, bem como estabilidade ampla e boa previsibilidade na série de ambientes avaliados, tendo grande potencial para serem recomendadas como novas cultivares para a região do semiárido brasileiro.

Palavras-chave: *Vigna unguiculata*. Interação genótipo x ambiente. AMMI. Biofortificação.

ADAPTABILITY AND STABILITY PARAMETERS OF IRON AND ZINC CONTENTS AND GRAIN YIELD IN COWPEA LINES IN THE BRAZILIAN SEMI-ARID REGION

Danillo Olegario Matos da Silva^{1*}, Carlos Antonio Fernandes Santos²

¹Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS), Programa de Pós-graduação em Recursos Genéticos Vegetais. Avenida Transnordestina, SN, Novo Horizonte, 44.036-900, Feira de Santana-BA, Brazil; E-mail: danilloolegario@hotmail.com *corresponding author.

²Embrapa Semiárido. CP 23, CEP 56302-970, Petrolina-PE, Brasil;

Abstract

The biofortification of cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) lines will have great impact in semi-arid regions, since it represents a rich source of food, especially of iron and zinc. The aim of the current study is to assess the adaptability and stability of iron and zinc contents, and grain yield in cowpea lines in order to release new cultivars. Forty-four genotypes were distributed in two experiments, climbing and upright lines, with different population densities. They were assessed in four rainfed and three irrigated environments, in two randomized block designs, with three repetitions. Significant statistical differences were observed ($p < 0.01$) in the treatment, environment and treatment*environment interaction mean squares for all variables. The lines that showed the highest iron and zinc contents also showed grain yields below the overall mean in both experiments. The three applied methods showed similar results in the selection of superior materials. The C4I and T16_2R, in the climbing experiment, and C2J, in the upright experiment, showed grain yield equal to or greater than the overall experiment means of 1034 kg/ha and 1130 kg/ha, respectively, with iron and zinc means contents 15% greater than the control cultivars, as well as wide adaptability and stability in the assessed environment, and could be released as new cultivars.

Keywords: *Vigna unguiculata*. Genotype x environment interaction. AMMI. Biofortification.

INTRODUÇÃO

O feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) é uma leguminosa cultivada em várias partes do mundo, sendo um alimento básico em mais de 65 países, desempenhando um papel importante na nutrição humana, devido à boa qualidade proteica, com níveis elevados de vários minerais (Singh, 2006, Badiane et al. 2012). Apresenta uma expressiva participação na alimentação dos brasileiros, tornando-se uma das principais alternativas sociais e econômicas para as populações rurais nas regiões Norte e Nordeste (Oliveira et al. 2010).

A deficiência de micronutrientes na alimentação afeta mais de dois bilhões de pessoas, principalmente de famílias pobres em países em desenvolvimento (Bouis e Welch 2010). Os microminerais, como ferro e zinco, são necessários em pequenas quantidades diárias pelo organismo para a manutenção da normalidade metabólica e o funcionamento adequado das células (Rios et al. 2011). A introdução de produtos agrícolas biofortificados com elevados teores de proteínas e minerais são considerados componentes importantes em programas de melhoramento que estão focados em eliminar a desnutrição humana (Santos e Boiteux 2013).

O feijão-caupi apresenta uma grande variabilidade da composição química dos grãos, o que possibilita a seleção de genótipos com elevados teores nutricionais. Freire Filho et al. (2011) estudando oito cultivares, encontraram teor de ferro variando de 48.8 a 77.4 mg kg⁻¹ e zinco, de 35.6 a 53.7 mg kg⁻¹. Avaliando linhagens de feijão-caupi com altos teores de proteína e minerais e alta produtividade, Santos e Boiteux (2013), encontraram variação de 36.5 mg kg⁻¹ a 137 mg kg⁻¹ para o teor de ferro, e 36 mg kg⁻¹ a 58 mg kg⁻¹ para o teor de zinco.

Nos programas de melhoramento, na fase de seleção e, principalmente, na fase de recomendação, o conhecimento do componente de interação genótipo x ambiente é de grande importância. A presença dessa interação é decorrente do comportamento diferenciado de materiais genéticos frente à variação do ambiente, sendo este um fator que dificulta a seleção de genótipos mais adaptados (Cruz et al. 2012). Uma alternativa para amenizar a influência dessa interação é

avaliar os genótipos no maior número possível de ambientes e aplicar métodos que os classifiquem conforme sua adaptabilidade e estabilidade.

Destacam-se na literatura diversos métodos de adaptabilidade e estabilidade que estimam a contribuição de cada genótipo para a interação, principalmente de Eberhart e Russell (1966) baseado em regressão linear, o de Lin e Binns (1988) baseado em análise não paramétrica e métodos multiplicativos baseados em componentes principais (AMMI). Esses métodos tem sido muito utilizados na seleção de genótipos de feijão-caupi com alta produtividade (Mano 2009, Nunes 2014, Rocha et al. 2007, Barros et al. 2013). Diferentemente da produção de grãos, estudos de adaptabilidade e estabilidade relacionados ao teor de minerais em feijão-caupi são inexistentes na literatura.

O presente trabalho tem como objetivo estimar parâmetros de adaptabilidade e estabilidade da produção de grãos e minerais nas sementes em linhagens de feijão-caupi, de dois experimentos, avaliados em sete ambientes irrigados ou dependentes de chuvas para possibilitar a recomendação e registro de novas cultivares para região do Vale do São Francisco.

MATERIAL E MÉTODOS

Material vegetal

Foram avaliadas linhagens de feijão-caupi selecionadas para altos teores de minerais e produção de grãos, resultantes de cruzamentos de três acessos introduzidos do International Institute for Tropical Agriculture (IITA), com três cultivares adaptadas ao semiárido brasileiro, conforme procedimentos descritos Santos e Boiteux (2013). As linhagens selecionadas formaram dois experimentos, considerando o tipo do porte da planta: I) porte semi ramador e crescimento indeterminado (PSR), com 23 tratamentos, sendo 20 linhagens e três cultivares controles, e II) porte ereto e de crescimento determinado (PED), com 21 tratamentos, sendo 17 linhagens e quatro cultivares controles.

Os experimentos foram conduzidos nos estados brasileiros da Bahia, Ceará, Pernambuco e Piauí (Tabela 1). O delineamento experimental foi de blocos casualizados, com três repetições, sendo quatro ambientes irrigados no segundo semestre do ano e três ambientes de sequeiro, no primeiro semestre do ano. Cada parcela apresentou as dimensões de 3,0 x 2,0 m. A parcela experimental do experimento PSR foi formada por duas fileiras, no espaçamento de 1,0 m entre as fileiras e 0,1 m entre plantas, resultando na densidade populacional de 100.000 plantas/ha, enquanto a parcela experimental do experimento PED foi formada por quatro fileiras, no espaçamento de 0,5 m entre as fileiras e 0,1 m entre plantas, com densidade populacional de 200.000 plantas/ha. A irrigação utilizada foi a de gotejamento e manejo padrão para região (Santos et al., 2008)

Quantificação de minerais

Aproximadamente, 10 g de sementes de 924 plantas foram trituradas em moinho MA 630/1 (Marconi, Brasil) para obter uma farinha fina de cada amostra. As amostras foram analisadas em duplicatas, de acordo com procedimento padrão da Association of Official Analytical Chemists (AOAC, 1995). Foi preparado um extrato para quantificação dos minerais Fe e Zn. Após o resfriamento dos tubos digestores, acrescentou-se 49 mL de água destilada e deionizada. As amostras para quantificação foram levadas para leitura em espectrofotômetro de absorção atômica de chama, marca Varian. Os resultados foram expressos em mg.kg^{-1} para ferro e zinco de matéria seca dos grãos. Todas as análises foram realizadas no laboratório de solos da Embrapa Semiárido.

Análises estatísticas

As análises estatísticas para os delineamentos experimentais foram efetuadas no SAS (SAS, 1989), pelo procedimento GLM (SAS, 1989). A produção de grãos foi corrigida pelo método da covariância com o stand de plantas médio das parcelas de cada experimento, como descrito por Vencovsky e BARRIGA (1992), usando programa SAS (1989). Aplicou-se o teste de agrupamento de Scott e Knott (1974) com 5% de significância. As avaliações de adaptabilidade e estabilidade dos

genótipos foram realizadas utilizando os métodos de Eberhart e Russell (1966) e de Lin e Binns (1988), disponíveis no programa Genes (Cruz, 2006) e o método multiplicativos baseados em componentes principais (AMMI) utilizando programa SAS (1989) como descrito por Duarte e Vencovsky (1999).

No método de Eberhart e Russell (1966) o coeficiente de regressão está associado ao componente linear, indicando a adaptabilidade do genótipo: genótipos com índice $\beta_i=1$ tem adaptabilidade ampla, sendo que desvios da regressão igual a zero ($\sigma_{di}^2=0$) indicam boa estabilidade. No método de Lin e Binns (1988) o parâmetro P_i define a estabilidade de um genótipo, sendo definido como o quadrado médio da distância entre a média de um genótipo e a resposta média máxima para todos os locais, de modo que, genótipos com menores valores correspondem aos de melhor desempenho.

A metodologia AMMI destaca-se por descrever melhor a interação genótipo x ambiente, mediante o descarte de ruídos adicionais, presentes nas estimativas tradicionais da interação. Utiliza conjuntamente a análise de variância para os efeitos principais de genótipos e ambientes e a Análise dos Componentes Principais (ACP) para a interação. Procura identificar os genótipos mais estáveis e adaptáveis, e realiza o zoneamento agrônômico dos ambientes. (Duarte e Vencovsky, 1999).

Foi aplicado a correlação de Spearman para comparação dos três métodos. A classificação da adaptabilidade e estabilidade dos genótipos foi realizada de acordo com Silva e Duarte (2006): a) Método Lin e Binns (1988) - os genótipos foram ordenados pelo seu valor absoluto de estimativas P_i . O genótipo com a menor estimativa foi considerado o mais estável e adaptado, e assim por diante; b) Método AMMI - foi considerado a pontuação do primeiro componente principal de interação. Genótipo próximo de zero foi o mais estável, e assim por diante; c) Método Eberhart e Russell - tem dois parâmetros β_i e σ_{di} . Média dos dois parâmetros foi calculada para cada genótipo antes de classificá-las do menor para o maior.

RESULTADOS

Avaliação dos ambientes para produção de grãos e para teores de ferro e zinco em linhagens de feijão-caupi.

Foram observadas diferenças estatísticas significativas para os quadrados médios de tratamentos, tanto para produção quanto para os teores de ferro e zinco, em quase todos os ambientes, exceto para produção de grãos nos ambientes de Acauã, Juazeiro e Petrolândia, no experimento PED e para o teor de ferro no ambiente Petrolina A, no experimento PSR. Os experimentos em Acauã, Dormentes, Limoeiro e Petrolândia foram conduzidos em propriedades de agricultores, que não comprometeram as avaliações, considerando que os coeficientes de variação foram abaixo de 43% (Tabela 2), além de terem permitido avaliações em ambientes representativos do cultivo da espécie.

Limoeiro foi o ambiente que apresentou as maiores médias de produção de grãos, para os dois experimentos (Tabela 2), indicando o potencial de produção das linhagens avaliadas em condições de alta tecnologia. Para os minerais, no ambiente Petrolina B foram obtidas as maiores médias de zinco nos dois experimentos e ferro no experimento PED. O ambiente de Dormentes foi o que apresentou a maior média para o teor de ferro no experimento PSR.

Moura et al., (2012), observaram correlação negativa entre rendimento de grãos e os teores de ferro e zinco em feijão-caupi. Resultados semelhantes foram observados no presente estudo, em que o ambiente Petrolina A com a segunda maior média de produção apresentou as menores médias de Ferro e Zinco em ambos os experimentos (Tabela 2). Santos (2013) estimou as correlações entre minerais, proteína e produção de grãos em seis cruzamentos de feijão-caupi e obteve correlação média positiva e significativa entre o teor de ferro e a produção e ausência de correlação entre o teor de ferro e o teor de zinco.

As médias de produção de grãos nos quatro ambientes irrigados foram 84% e 45% superiores para PSR e PED, respectivamente, em relação a média dos três ambientes de sequeiro (Tabela 2), corroborando os resultados reportados por Santos et al. (2008). No entanto, as médias dos minerais avaliados apresentaram valores próximos, independente do manejo adotado, com ou sem irrigação (Tabela 2).

Parâmetros de adaptabilidade e estabilidade para produção de grãos e teores de ferro e zinco em linhagens de feijão-caupi

As cultivares BRS Acauã, no experimento PSR, e as cultivares BRS Carijo, BRS Tapaihum e BRS Marrom no experimento PED, foram as que apresentaram as maiores produções de grãos (Tabelas 3 e 4). Essas cultivares foram avaliadas anteriormente nos mesmos locais que as linhagens dessa pesquisa (exceto Limoeiro), e foram selecionadas exclusivamente para produção de grãos e precocidade (Santos et al., 2008).

As linhagens C3R e C3B, no experimento PSR, apresentaram produtividade de grãos próxima da cultivar controle BRS Acauã, bem como parâmetros de ampla adaptabilidade e boa estabilidade, tanto pelo método de Eberhart e Russell, como pelo método de Lin e Binns (Tabela 3). A linhagem C2O, no experimento PED, também apresentou produtividade de grãos próximo das cultivares controle BRS Carijo e BRS Tapaihum, bem como parâmetros de ampla adaptabilidade e boa estabilidade, tanto pelo método de Eberhart e Russell, como pelo método de Lin e Binns (Tabela 4).

No experimento PSR, a linhagem C4G obteve a maior média para o teor de Fe, 67.5 mg kg^{-1} , com adaptabilidade a ambientes desfavoráveis e baixa estabilidade. Para o teor de Zn, as maiores médias foram das linhagens C1T e C4G, com adaptabilidade a ambientes desfavoráveis e favoráveis, respectivamente, tanto pelo método de Eberhart e Russell, como pelo método de Lin e Binns. Destacam-se as linhagens T16_2R com média elevada para o teor de ferro, e C4I e C6P com alto teor de zinco, todas com ampla estabilidade e adaptabilidade (Tabela 3).

As linhagens C2M e C2I, no experimento PED, apresentaram valores médios superiores em mais de 20% para os teores de ferro e zinco em relação as médias das cultivares controle BRS Tapaihum e Canapu, uma `landrace` da região (Tabelas 4). Os métodos de Eberhart e Russell e Lin e Binns destacaram a linhagem C2M com ampla adaptabilidade e estabilidade para o teor de ferro. Enquanto para o teor de Zinco, essas duas linhagens apresentaram adaptabilidade a ambientes desfavoráveis (Tabela 4).

Utilizando o método multivariado AMMI, a interação genótipo x ambiente foi decomposta em seis componentes principais da interação (CPI). Porém, apenas o primeiro eixo (CPI1) teve seu resíduo significativo pelo teste F_r ($p < 0,01$), adotando-se o modelo AMMI1 para todas as variáveis. Assim, a interpretação gráfica da adaptabilidade e da estabilidade foi realizada apenas com o CPI1, via biplot AMMI1. Resultados semelhantes foram encontrados por Barros et al. (2013), avaliando produtividade de feijão-caupi.

No experimento PSR, para produção de grãos, teor de Fe e Zn, o primeiro componente principal da interação explicou 49.78, 45.21 e 42.57%, respectivamente (Tabela 5). O ambiente Acauã foi o mais estável e Limoeiro foi o ambiente mais produtivo, com alta instabilidade. O genótipo C3R foi o mais estável para produção de grãos (Figura 1A), como destacado pelo método Eberhart e Russell (Tabela 3).

Para o teor de Fe, Bebedouro apresentou a menor média e foi o mais estável. O genótipo T16_2R com alta estabilidade, para teor de ferro, obteve média superior as cultivares avaliadas (Figura 2A), como indicado pelo método Eberhart e Russell (Tabela 3). O ambiente Petrolina B foi o mais favorável para o teor de Zn, no experimento PSR, e o genótipo C1T que apresentou a maior média também foi o mais estável (Figura 3A) como indicado pelo método Lin e Binns (Tabela 3).

O primeiro componente principal da interação, no experimento PED, explicou 54.46% para produção de grãos, 47.13% para teor de Fe e 24.89% para o teor de Zn (Tabela 5). O ambiente Petrolândia foi o mais estável e obteve a menor média de produção. Entre as linhagens, o método

AMMI destacou a C2O com alta estabilidade e média de produção próxima das cultivares (Figura 1B), corroborando com o método Eberhart e Russell (Tabela 4).

Acauã e Petrolândia foram os ambientes mais favoráveis para o teor de Fe (Figura 2B), enquanto a linhagem C2M foi apontada como a melhor opção de acordo com a análise AMMI, como destaca a análise dos dois métodos anteriores (Tabela 4). O ambiente mais estável para o teor de Zn foi Limoeiro, enquanto Petrolina B foi o ambiente com elevado valor de Zn (Figura 3B). O C2I e C2M foram as melhores opções, de acordo com a análise AMMI, com alto teor de Zn e boa estabilidade (Figura 3B), como destacado nas análises dos métodos anteriores (Tabela 4).

Correlação de Spearman entre os métodos utilizados

O método Lin e Binns não se correlacionou com os dois outros métodos para as três variáveis analisadas, enquanto os métodos AMMI x Eberhart e Russell apresentou correlações de Spearman positivas e significativas para a produção de grãos, ferro e zinco no experimento PSR, e positiva e significativa para ferro no experimento PED (Tabela 6). Estas correlações de Spearman indicam que o método de Lin e Binns deve ser aplicado com outro método, e que o método AMMI deve substituir o método Eberhart e Russell, devido a fácil interpretação gráfica desse método.

Estes três métodos utilizados têm sido aplicados em conjunto (Silva et al 2016; Silva e Santos, 2016). Ddamulira et al. (2015), em um estudo para avaliar o efeito da interação genótipo x ambiente em feijão-caupi, aplicou apenas o método AMMI para selecionar e recomendar linhagens a serem cultivadas em Uganda.

DISCUSSÃO

Biofortificação é uma estratégia utilizada na agricultura como uma maneira de melhorar a saúde das populações pobres e é uma ferramenta adicional para combater a deficiência de micronutrientes

(Nutti et al. 2009). Freire Filho et al. (2008) destacou que a estratégia aplicada no feijão-caupi terá grande impacto no futuro, uma vez que representa uma rica fonte de alimento - principalmente proteína, ferro e zinco - para fornecer a dieta das populações com deficiência de nutrientes que têm grande tradição de consumo, como no caso de muitos países da África, Ásia e Nordeste da América do Sul.

Novas cultivares com melhores características nutricionais capazes de melhorar a qualidade nutricional são de grande importância para programas de melhoramento. Estudos de interação Genótipo*ambiente, para teores de minerais em feijão-caupi não foram encontrados, sendo este um estudo pioneiro nesta espécie. Avaliações multi-locais de genótipos de feijão-caupi, que combinam altos rendimentos de grãos e teores de ferro e zinco são de grande importância, porque permitem indicar genótipos que têm bom desempenho em diferentes ambientes de cultivo ou genótipos que respondem a melhores estratégias de manejo, tais como o uso da irrigação.

Vários métodos estatísticos foram desenvolvidos e aplicados para interpretar a interação genótipo*ambiente, a identificação dos genótipos com comportamento estável em vários ambientes, assim como aquelas que mostram previsibilidade a resposta ambiental. Métodos de regressão linear (Eberhart e Russell 1966), não paramétricos (Lin e Binns 1988) e que são baseados em componentes principais (AMMI) têm sido amplamente utilizados e mostram baixa correlação Spearman entre eles (Silva e Duarte 2006).

Polizel et ai. (2012) usou sete métodos para testar 16 genótipos de soja em diferentes ambientes. Eles descobriram que os métodos estudados apresentaram resultados consistentes e complementares. Pereira et al. (2009) salientam que um método não substitui o outro e que eles devem ser aplicados em conjunto, como foi feito no presente estudo. Os métodos de adaptabilidade e estabilidade utilizados apresentaram resultados semelhantes no que diz respeito à identificação de materiais superiores. Cargnelutti Filho et al. (2007) salientam que a avaliação dos dados por vários métodos de adaptabilidade e estabilidade, e a consideração das peculiaridades, são adequados para a melhor tomada de decisão em relação à indicação de cultivares.

Os resultados do presente estudo indicam dificuldades para selecionar as linhas que combinam altos rendimentos de grãos e teores de ferro e zinco, uma vez que as linhas que apresentaram os mais altos níveis de Fe e Zn não foram os mesmos que apresentaram as maiores produções de grãos, e vice-versa. Resultados semelhantes foram encontrados por Moura et al. (2012). A seleção de genótipos com valores intermediário ou acima da média de rendimento de grãos e teores de ferro e zinco é uma alternativa para superar os limites impostos pela falta de associação entre essas variáveis.

As linhagens C4G, C2I e C2M apresentaram os maiores níveis de ferro e zinco e são boas opções a serem utilizadas no retro-cruzamento com a BRS Acauã, BRS Carijó e BRS Tapaihum como uma maneira de aumentar simultaneamente a produção de grãos e a produção desses dois minerais. O método de Lin e Binns foi tendencioso no presente estudo pelos genótipos de maior produção ou conteúdo de minerais, e deve ser usado junto com outro método, para inferir sobre parâmetros de adaptabilidade e estabilidade. O método AMMI foi a melhor opção, devido à disposição gráfica dos genótipos, associando o desempenho de rendimento com o parâmetro estabilidade.

As linhagens C4I, T16_2R e C2J mostraram rendimentos de grãos iguais ou maiores do que as médias dos experimentos, alto teor de ferro e de zinco, com boa adaptabilidade e estabilidade na série de ambientes avaliados, através das metodologias de Eberhart e Russell (1966), Lin e Binns (1988) (Tabelas 3 e 4) e o AMMI (Figuras 1, 2, 3). Estas linhagens apresentaram rendimentos de grãos próximos ao de cultivares comerciais e valores médios de ferro e zinco quase 15% mais elevados do que os valores das cultivares controle de feijão-caupi avaliadas no experimento. Eles mostraram um grande potencial para ser lançadas como novas cultivares para a região semiárida brasileira.

CONCLUSÃO

As linhagens C4I e T16_2R, com o hábito de porte semi ramador e C2J, com porte ereto e de crescimento determinado, mostraram rendimento de grãos igual ou maior do que as médias gerais dos experimentos de 1034 kg há⁻¹ e 1130 kg ha⁻¹, respectivamente, com teores de ferro e zinco 15% maiores do que as cultivares controle, bem como ampla adaptabilidade e estabilidade nos ambientes avaliados.

As linhagens C4G, C2I e C2M apresentaram os maiores níveis de ferro e zinco e são boas opções a serem utilizadas no retro-cruzamento com a BRS Acauã, BRS Carijó e BRS Tapaihum como uma maneira de aumentar simultaneamente a produção de grãos e a produção desses dois minerais.

REFERÊNCIAS

- AOAC. Official Methods of Analysis. Association of Official Analytical Chemists, Arlington, VA., 1995.
- Badiane, F. A., B. S. Gowda, N. Cissé, D. Diouf, O. Sadio, and M. P. Timko 2012: Genetic relationship of cowpea (*Vigna unguiculata*) varieties from Senegal based on SSR markers. *Genetics and Molecular Research* 11: 292-304. doi: 10.4238/2012.
- Barros M. A., M. M. Rocha, R. L. F. Gomes, K. J. D. Silva, and A. C. Neves 2013: Adaptabilidade e estabilidade produtiva de feijão-caupi de porte semiprostrado. *Pesquisa agropecuária brasileira* 48: 403-410. doi: 10.1590/S0100-204X2013000400008
- Bouis H. E., and R. M. Welch 2010: Biofortification - A Sustainable Agricultural Strategy for Reducing Micronutrient Malnutrition in the Global South. *Crop Science* 50: S20-S32. doi:10.2135/cropsci2009.09.0531.

- Cargnelutti Filho A., D. Perecin, E. B. Malheiros and J. P. Guadagnin 2007: Comparison of adaptability and stability methods related to grain yield of maize cultivars. *bragantia*, campinas, v.66, n.4, p.571-578.
- Cruz C. D. 2006 Programa Genes: Estatística experimental e matrizes. Viçosa: Ed. UFV.
- Cruz, C. D., and A. J. Regazzi 1997: Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético. Viçosa: UFV. 390p.
- Cruz C. D., A. J. Regazzi and P. C. S. Carneiro 2012: Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético. Vol. 1. Viçosa: UFV, 514 p.
- Ddamulira, G., C.A.F. Santos, P. Obuo., M. Alanyo and C. K. Lwanga 2015: Grain Yield and Protein Content of Brazilian Cowpea Genotypes under Diverse Ugandan Environments. *American Journal of Plant Sciences* 6, 2074-2084. doi: 10.4236/ajps.2015.613208
- Duarte J. B., and R. Vencovsky 1999: Interação genótipos x ambientes: uma introdução à análise AMMI. Ribeirão Preto: Sociedade Brasileira de Genética. 60p.
- Eberhart, A. S., and W. A. Russell 1966: Stability parameters for comparing varieties. *Crop Science* 6: 36-40. doi:10.2135/cropsci1966.0011183X000600010011x.
- Freire Filho, F. R., M. M. Rocha, V. Q. Ribeiro, and I. M. Sitollin 2008: Avanços e perspectivas para a cultura do feijão-caupi. In: Albuquerque ACS, Silva AG da (Ed.). *Agricultura tropical: quatro décadas de inovações tecnológicas, institucionais e políticas*. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, v. 1, p. 250-285.
- Freire Filho, F. R., V. Q. Ribeiro, M. M. Rocha, K. J. D. Silva, M. S. R. Nogueira, and E. V. Rodrigues 2011: Feijão-caupi: produção, melhoramento genético, avanços e desafios. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 84p.
- Lin C. S., and M. R. Binns 1988: A superiority measure of cultivar performance for cultivar x location data. *Canadian Journal of Plant Science* 68: 193-198. doi: 10.4141/cjps88-018
- Mano A. R. O. 2009: Adaptabilidade e estabilidade fenotípica de cultivares de feijão-de-corda. 152p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

Moura JO, MM Rocha, RLF Gomes, FR Freire Filho and KJD Silva (2012) Path analysis of iron and zinc contents and others traits in cowpea. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*. 245-252. doi: 10.1590/S1984-70332012000400003.

Nunes H. F., F. R. Freire Filho, V. Q. Ribeiro, and R. L. F. Gomes, 2014: Grain yield adaptability and stability of blackeyed cowpea genotypes under rainfed agriculture in Brazil. *African Journal of Agricultural Research* 9: 255-261. doi: 10.5897/AJAR212.2204

Nutti, M. R., M. M. Rocha, E. Watanabe, J. L. V. Carvalho, F. R. Freire Filho, K. J. D Silva, 2009: Biofortificação de feijão-caupi no Brasil. In: congresso nacional de feijão-caupi, 2., 2009, Belém, Pa. Da agricultura de subsistência ao agronegócio: anais. Belém, pa: embrapa amazônia oriental, 2009. P. 26-38. 1 cd-rom.

Oliveira O. M. S., J. F. Silva, J. R. P. Gonçalves, and C. S. Klehm. 2010: Período de convivência das plantas daninhas com cultivares de feijão-caupi em várzea no Amazonas. *Planta daninha* 28: 523-530. doi:10.1590/S0100-83582010000300009.

Pereira, H. S., L. C. Melo, M. J. Del Peloso, L. C. Faria, J. G. C. Costa, J. L. Cabrera Díaz, C. A. Rava, A. Wendland, 2009: Comparison of methods for phenotypic adaptability and stability analysis in common bean. *Pesq Agropec Bras*. 44:374-383. doi: 10.1590/S0100-204X2009000400007.

Polizel, A. C., F. C. Juliatti, O. T. Hamawaki, R. L. Hamawaki, and S. L. Guimarães, 2013: Adaptabilidade e estabilidade fenotípica de genótipos de soja no estado do Mato Grosso. *Bioscience Journal* 29: 910-920.

Rios, A. S., K. R. Alves, N. M. B. Costa, and H. S. D. Martino, 2009: Biofortificação: culturas enriquecidas em micronutrientes pelo melhoramento genético. *Revista Ceres* 56: 713-718.

Rocha, M. M., F. R. Freire Filho, V. Q. Ribeiro, H. W. L. Carvalho, J. Belarmino Filho, J. A. A. Raposo, J. P. Alcântara, S. R. R. Ramos, and C. F. Machado, 2007: Adaptabilidade e estabilidade produtiva de genótipos de feijão-caupi de porte semi-ereto na região Nordeste do Brasil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 42: 1283-1289.

Santos C. A. F., 2013: Melhoramento de linhagens de feijão-caupi com altos teores de proteínas e minerais nas sementes para o Vale do São Francisco. In: Congresso 77 nacional de feijão-caupi, 3. Recife. Anais. Recife: IPA. Disponível em: <http://www.conac2012.org/resumos/pdf/359b.pdf>.

Santos, C. A. F., G. A. A. Barros, I. C. C. N. Santos, and M. G. S. Ferraz, 2008: Comportamento agrônomico e qualidade culinária de feijão-caupi no Vale do São Francisco. *Horticultura Brasileira* 26: 404-408. doi: 10.1590/S0102-05362008000300023.

Santos, C. A. F., and L. S. Boiteux, 2013: Breeding biofortified cowpea lines for semi-arid tropical areas by combining higher seed protein and mineral levels. *Genetics and Molecular Research* 12: 6782-6789. doi: 10.4238/2013.

SAS. SAS/STAT User's Guide, Version 6, Fourth Edition, Volume 1. Cary: SAS Institute Inc., 1989, 890 p.

Scott, A., and M. Knott, 1974: Cluster-analysis method for grouping means in analysis of variance. *Biometrics*, Washington D.C., v.30, n.3, p.507-512. doi: 10.2307/2529204

Silva, D. O. M. and C. A. F. Santos 2016: Adaptability and stability parameters for potassium and calcium contents and grain yield in cowpea lines. *African Journal of Agricultural Research* Vol. 11(36), pp. 3366-3374 doi: 10.5897/AJAR2016.11526

Silva, D. O. M., C. A. F. Santos and L. S. Boiteux 2016: Adaptability and stability parameters of total seed yield and protein content in cowpea (*Vigna unguiculata*) genotypes subjected to semi-arid conditions. *Australian Journal of Crop Science* 10(8):1164-1169 doi: 10.21475/ajcs.2016.10.08.p7828

Silva Filho, J. L., C. L. Morello, F. J. C. Farias, F. M. Lamas, M. B. Pedrosa and J. L. Ribeiro 2008: Comparação de métodos para avaliar a adaptabilidade e estabilidade produtiva em algodoeiro. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.43, p.349-355.

Silva, W. C. J., and J. B. Duarte, 2006: Métodos estatísticos para estudo de adaptabilidade e estabilidade fenotípica em soja. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.41, p.23-30. doi:10.1590/S0100-204X2006000100004

Singh B. B., 2006: Cowpea breeding at IITA: highlights of advances impacts. In: Congresso Nacional de Feijão-Caupi, 1.; Reunião Nacional de Feijão-Caupi, 6. Teresina. Tecnologias para o agronegócio: anais. Teresina: Embrapa Meio-Norte .1 CD-ROM. (Embrapa Meio-Norte. Documentos, 121).

Vencovsky R., and P. Barriga, 1992: Genética biométrica no fitomelhoramento. Ribeirão Preto: Sociedade Brasileira de Genética. 496p.

Tabela 1. Características dos ambientes onde foram avaliados os 44 genótipos de feijão-caupi.

Local	Latitude	Altitude	Solo
		m	
Acauã, Piauí	08°23' S	450	Latossolo Distrófico
Bebedouro, Pernambuco	09°09' S	350	Argissolo Amarelo Eutrófico
Caatinga, Pernambuco	09°04' S	350	Latossolo Amarelo Distrófico
Dormentes, Pernambuco	08°15' S	490	Argissolo Eutrófico
Limoeiro, Ceará	05°10' S	152	Cambissolo
Juazeiro, Bahia	09°51' S	370	Cambissolo
Petrolândia, Pernambuco	08°58' S	316	Areia quartzosa distrófica

Tabela 2. Quadrado médio total (QMT), quadrado médio do resíduo (QMR), médias e coeficiente de variação (CV) relacionado para produção, teores de ferro e zinco em 20 linhagens e três cultivares (Experimento PSR - porte semi ramador) e 17 linhagens e quatro cultivares de feijão-caupi (experimento PED - porte ereto e de crescimento determinado) avaliados em sete ambientes irrigados e de sequeiro.

Local	Produção				Ferro				Zinco			
	QMT	QMR	Média	CV	QMT	QMR	Média	CV	QMT	QMR	Média	CV
Experimento PSR												
Acauã	87189**	42345	684d	30.0	127.8**	51.8	62.6b	11.5	14.6**	5.8	34.7c	6.9
Petrolina A (Bebedouro)	306194**	57712	1322b	18.1	137.1 ^{NS}	82.2	52.4d	17.3	39.6**	9.1	29.5e	10.2
Petrolina B (Caatinga)	90050**	32140	727d	24.6	112.7**	64.1	64.8b	12.3	35.4**	13.2	40.7a	8.9
Dormentes	355248**	60272	689d	35.6	189.9*	96.6	66.8a	14.7	75.3**	13.1	30.9d	11.7
Limoeiro	278796**	114883	2192a	15.4	177.7**	48.7	54.7d	12.7	13.9**	1.5	31.4d	3.9
Juazeiro	202060*	97575	729d	42.8	118.4**	17.4	61.5b	6.8	64.9**	1.9	37.0b	3.8
Petrolândia	259048**	81818	897c	31.8	220.9*	34.2	62.2b	9.4	48.5**	6.0	37.2b	6.6
Experimento PED												
Acauã	86308 ^{NS}	78306	1087c	25.7	49.2**	8.7	60.6b	4.8	23.0**	1.8	34.3c	3.9
Petrolina A (Bebedouro)	121491*	62900	1697b	14.7	57.2*	30.4	57.6c	9.5	26.2**	5.4	28.2e	8.2
Petrolina B (Caatinga)	52592*	28273	734e	22.9	87.4**	13.9	63.4a	5.8	22.9**	2.5	40.2a	3.9
Dormentes	653413**	75526	887d	30.9	53.9**	14.5	60.5b	6.2	18.0**	4.9	27.3f	8.1
Limoeiro	398371**	102030	2057a	15.5	193.9**	57.0	59.5b	12.6	23.7**	0.5	31.8d	2.2
Juazeiro	116106 ^{NS}	83516	806d	35.8	92.3**	21.2	60.5b	7.6	25.6**	4.4	38.0b	5.5
Petrolândia	98114 ^{NS}	71214	692e	38.5	93.8**	10.0	60.5b	5.2	28.6**	4.0	38.1b	5.3

Valores seguidos da mesma letra, na coluna, pertencem ao mesmo grupo, pelo teste de Scott e Knott (1974) a 5% de probabilidade; **,*, ^{NS} significativo a 1%, 5% ou não significativo respectivamente pelo teste F

Tabela 3. Estabilidade e adaptabilidade para produção, ferro e zinco em 20 linhagens e três cultivares de feijão-caupi, porte semi ramador (PSR) avaliados em sete ambientes irrigados e de sequeiro utilizando o método Eberhart e Russell, 1966 e Lin e Binns, 1988.

Genótipo	Produção (kg ha ⁻¹)					Ferro (mg kg ⁻¹)					Zinco (mg kg ⁻¹)				
	Eberhart e Russell			Lin e Binns		Eberhart e Russell			Lin e Binns		Eberhart e Russell			Lin e Binns	
	β _o	β _i	σ _{dii}	Ordem	Pi ^{1/}	β _o	β _i	σ _{dii}	Ordem	Pi ^{1/}	β _o	β _i	σ _{dii}	Ordem	Pi ^{1/}
C2R	886d	1.3*	37767*	20	344349 ²³	60.5c	1.5 ^{NS}	54.9**	16	316.8 ¹⁹	33.8b	0.9 ^{NS}	15.2**	10	36.9 ¹⁷
C3S	904d	1.0 ^{NS}	16770 ^{NS}	3	305069 ¹⁹	64.2b	2.1**	72.7**	22	270.9 ¹³	36.2a	0.2**	15.8**	23	28.2 ¹²
C3M	1150b	0.9 ^{NS}	-10959 ^{NS}	5	152055 ⁵	53.9c	1.3 ^{NS}	91.5**	17	461.1 ²³	31.8c	0.6*	16.3**	21	58.5 ²²
C3Q	1021c	1.2 ^{NS}	40905*	14	219184 ⁸	60.2c	2.6**	40.2*	20	343.9 ²¹	34.9b	0.8 ^{NS}	24.9**	14	37.9 ¹⁸
C3B	1214b	0.9 ^{NS}	21638 ^{NS}	6	144688 ⁴	60.7c	1.6 ^{NS}	69.4**	19	295.7 ¹⁶	34.9b	1.6**	-1.0 ^{NS}	12	31.8 ¹⁴
C6P	1013c	0.9 ^{NS}	-2161 ^{NS}	2	224767 ⁹	65.1b	-0.4**	180.4**	23	66.2 ¹	36.0b	1.0 ^{NS}	1.2 ^{NS}	2	19.1 ⁵
C1M	959d	1.4**	58313**	22	301820 ¹⁸	62.5b	0.2*	16.5 ^{NS}	15	206.5 ⁷	35.1b	1.1 ^{NS}	2.7 ^{NS}	7	17.8 ³
C3F	883d	0.8 ^{NS}	1281 ^{NS}	9	315024 ²¹	63.5b	1.2 ^{NS}	-1.1 ^{NS}	3	185.2 ⁵	36.3b	1.4*	7.9**	18	20.4 ⁶
C3L	950d	1.0 ^{NS}	-22570 ^{NS}	4	249086 ¹³	61.5c	1.4 ^{NS}	42.1*	14	251.1 ¹⁰	31.6d	1.1 ^{NS}	4.5*	4	48.6 ¹⁹
C2C	968d	1.3*	29413 ^{NS}	18	287946 ¹⁶	57.1c	1.1 ^{NS}	-5.1 ^{NS}	2	335.4 ²⁰	34.1c	1.1 ^{NS}	-0.1 ^{NS}	3	26.8 ¹¹
C1T	901d	1.1 ^{NS}	50964*	13	331871 ²²	59.2c	0.8 ^{NS}	-16.3 ^{NS}	11	261.9 ¹²	38.1a	0.6*	7.9**	20	6.9 ¹
C3R	1228b	0.8 ^{NS}	-6056 ^{NS}	8	125105 ²	60.5c	0.1*	41.1*	18	205.9 ⁶	31.9d	0.8 ^{NS}	17.2**	17	55.2 ²¹
C4G	1023c	0.7*	27058 ^{NS}	15	251814 ¹⁴	67.5a	0.1*	75.1**	21	114.2 ²	37.3a	1.3 ^{NS}	20.7**	19	22.5 ⁷
C6A	883d	0.8 ^{NS}	30778*	17	310255 ²⁰	64.1b	0.9 ^{NS}	21.5 ^{NS}	7	148.7 ⁴	36.4b	1.6**	12.9**	22	16.2 ²
C2T	934d	0.9 ^{NS}	6603 ^{NS}	7	293622 ¹⁷	57.3c	0.7 ^{NS}	-11.3 ^{NS}	9	312.0 ¹⁷	33.5c	0.7 ^{NS}	1.1 ^{NS}	6	31.2 ¹³
C3P	1055c	0.7*	27301 ^{NS}	16	239393 ¹¹	60.2c	1.0 ^{NS}	3.2 ^{NS}	1	283.3 ¹⁴	33.1c	0.7 ^{NS}	1.9 ^{NS}	9	35.7 ¹⁶
C6D	990c	0.9 ^{NS}	43453*	12	256330 ¹⁵	55.8c	1.2 ^{NS}	45.8**	12	379.3 ²²	33.4c	1.1 ^{NS}	2.5 ^{NS}	8	32.4 ¹⁵
C1V	1019c	1.2 ^{NS}	64770**	19	243650 ¹²	59.8c	-0.1**	6.2 ^{NS}	13	289.0 ¹⁵	36.5b	1.4*	2.1 ^{NS}	11	17.9 ⁴
C4I	1102b	1.0 ^{NS}	-4448 ^{NS}	1	171894 ⁶	62.7b	1.5 ^{NS}	-4.8 ^{NS}	8	218.7 ⁸	35.5b	1.0 ^{NS}	6.6**	5	22.9 ⁹
T16_2R	1171b	1.0 ^{NS}	69547**	10	131728 ³	65.8b	1.1 ^{NS}	9.3 ^{NS}	4	139.7 ³	35.4b	1.4*	7.9**	15	25.8 ¹⁰
Acauã	1341a	1.0 ^{NS}	112508**	11	63731 ¹	59.4c	0.8 ^{NS}	-15.6 ^{NS}	6	252.9 ¹¹	31.4d	0.7 ^{NS}	5.8**	13	64.5 ²³
Pujante	1050c	0.8 ^{NS}	185586**	21	226464 ¹⁰	59.9c	1.3 ^{NS}	-13.4 ^{NS}	10	233.1 ⁹	35.9b	0.6*	5.8**	16	22.7 ⁸
Canapu	1153b	0.5**	175495**	23	184265 ⁷	56.2c	0.8 ^{NS}	-12.0 ^{NS}	5	314.5 ¹⁸	31.5d	1.1 ^{NS}	0.0 ^{NS}	1	52.8 ²⁰
Média	1034					60.83					34.65				

Valores seguidos da mesma letra, na coluna, pertencem ao mesmo grupo, pelo teste de Scott e Knott (1974) a 5% de probabilidade; **, *, ^{ns} significativo a 1%, 5% ou não significativo respectivamente pelo teste F

Tabela 4. Estabilidade e adaptabilidade para produção, ferro e zinco em 17 linhagens e quatro cultivares de feijão-caupi, porte ereto e de crescimento determinado (PED) avaliados em sete ambientes irrigados e de sequeiro utilizando o método Eberhart e Russell, 1966 e Lin e Binns, 1988.

Genótipo	Produção (kg ha ⁻¹)					Ferro (mg kg ⁻¹)					Zinco (mg kg ⁻¹)				
	Eberhart e Russell			Lin e Binns		Eberhart e Russell			Lin e Binns		Eberhart e Russell			Lin e Binns	
	βo	βi	σdii	Ordem	Pi ^{1/}	βo	βi	σdii	Ordem	Pi ^{1/}	βo	βi	σdii	Ordem	Pi ^{1/}
C1N	1170b	1.2 ^{NS}	-55352 ^{NS}	18	269488 ⁹	59.5b	1.2 ^{NS}	-1.24 ^{NS}	2	123.5 ¹²	34.8b	1.1 ^{NS}	0.50 ^{NS}	6	18.1 ⁷
C1R	1044d	0.9 ^{NS}	-35616 ^{NS}	14	372225 ¹⁸	61.4b	0.6 ^{NS}	5.41 ^{NS}	5	103.1 ⁹	34.7b	0.9 ^{NS}	3.79 ^{**}	15	17.6 ⁵
C3O	1203b	0.4 [*]	-5183 ^{NS}	16	235209 ⁷	62.8b	-0.0 ^{NS}	1.86 ^{NS}	8	88.6 ⁷	33.3c	0.9 ^{NS}	2.41 [*]	14	27.9 ¹⁴
C2I	953d	0.9 ^{NS}	-53143 ^{NS}	15	404583 ¹⁹	66.7a	3.1 ^{**}	7.81 ^{NS}	19	55.3 ²	39.7a	0.8 [*]	2.73 ^{**}	18	0.9 ¹
C1G	1129c	1.0 ^{NS}	-42325 ^{NS}	2	304343 ¹¹	59.3b	0.7 ^{NS}	0.71 ^{NS}	1	122.9 ¹¹	33.8c	1.1 ^{NS}	0.72 ^{NS}	5	24.7 ¹¹
C1S	1107c	0.9 ^{NS}	-28073 ^{NS}	4	344578 ¹⁴	58.7b	-0.3 ^{NS}	4.48 ^{NS}	15	140.1 ¹⁵	35.1b	1.0 ^{NS}	4.90 ^{**}	10	18.8 ⁹
C2J	1129c	1.2 ^{NS}	43212 ^{NS}	17	202587 ⁴	63.4b	2.7 ^{**}	4.61 ^{NS}	17	75.9 ⁴	35.1b	1.0 ^{NS}	1.66 [*]	2	16.5 ³
C1J	1121c	1.0 ^{NS}	-38895 ^{NS}	3	249457 ⁸	61.5b	0.3 ^{NS}	19.65 ^{**}	14	119.3 ¹⁰	34.3b	0.9 ^{NS}	1.75 [*]	11	20.6 ¹⁰
C1F	1111c	1.1 ^{NS}	-45872 ^{NS}	7	322260 ¹²	59.4b	0.5 ^{NS}	22.77 ^{**}	13	147.1 ¹⁶	35.2b	1.2 [*]	5.18 ^{**}	21	18.4 ⁸
C2O	1243b	1.1 ^{NS}	-46357 ^{NS}	9	232238 ⁶	61.7b	0.6 ^{NS}	20.73 ^{**}	10	74.9 ³	32.2d	1.0 ^{NS}	2.93 ^{**}	7	35.5 ¹⁸
C2S	1196b	0.9 ^{NS}	-45261 ^{NS}	10	276386 ¹⁰	62.0b	0.3 ^{NS}	131.72 ^{**}	18	82.9 ⁵	31.0d	0.9 ^{NS}	1.12 ^{NS}	4	46.7 ²⁰
C2B	1009d	0.6 ^{NS}	71955 ^{NS}	20	496665 ²¹	58.1b	1.4 ^{NS}	24.40 ^{**}	12	128.1 ¹³	30.6d	0.8 [*]	2.54 ^{**}	17	51.5 ²¹
C2A	1111c	1.2 ^{NS}	-25378 ^{NS}	8	329596 ¹³	61.3b	-0.0 ^{NS}	87.35 ^{**}	21	86.2 ⁶	33.2c	1.3 ^{**}	2.07 [*]	19	28.6 ¹⁵
C2Q	1032d	1.0 ^{NS}	-46745 ^{NS}	5	364971 ¹⁶	56.4b	1.7 ^{NS}	5.06 ^{NS}	9	172.8 ¹⁸	32.5c	1.1 ^{NS}	0.63 ^{NS}	1	32.4 ¹⁶
C1O	1022d	0.8 ^{NS}	-57381 ^{NS}	19	367170 ¹⁷	55.8b	-0.5 ^{**}	1.96 ^{NS}	11	177.6 ¹⁹	33.3c	1.2 [*]	0.28 ^{NS}	9	27.8 ¹²
C1I	1078c	0.8 ^{NS}	-26876 ^{NS}	13	353772 ¹⁵	58.6b	1.2 ^{NS}	24.12 ^{**}	6	155.9 ¹⁷	35.9b	1.3 ^{**}	-0.64 ^{NS}	13	17.8 ⁶
C2M	893d	0.9 ^{NS}	-35771 ^{NS}	6	479205 ²⁰	69.7a	1.2 ^{NS}	2.02 ^{NS}	3	33.6 ¹	38.6a	0.9 ^{NS}	1.34 ^{NS}	8	2.6 ²
Marrom	1307a	1.4 ^{NS}	6935 ^{NS}	12	185480 ³	56.7b	1.9 ^{NS}	32.52 ^{**}	20	194.6 ²⁰	33.3c	0.9 ^{NS}	6.19 ^{**}	16	27.8 ¹³
Carijó	1344a	0.9 ^{NS}	-893 ^{NS}	1	135731 ²	62.1b	0.4 ^{NS}	2.48 ^{NS}	4	95.2 ⁸	35.2b	1.0 ^{NS}	5.46 ^{**}	12	17.4 ⁴
Tapaihum	1323a	1.4 ^{NS}	-15169 ^{NS}	11	123155 ¹	55.1b	1.8 ^{NS}	20.53 ^{**}	16	213.2 ²¹	31.2d	0.7 ^{**}	1.89 [*]	20	42.8 ¹⁹
Canapu	1211b	0.5 [*]	49379 ^{NS}	21	228627 ⁵	59.6b	1.8 ^{NS}	4.33 ^{NS}	7	131.8 ¹⁴	32.0d	0.9 ^{NS}	0.24 ^{NS}	3	35.2 ¹⁷
Média	1130					60.42				34.07					

Valores seguidos da mesma letra, na coluna, pertencem ao mesmo grupo, pelo teste de Scott e Knott (1974) a 5% de probabilidade; **, *, ^{ns} significativo a 1%, 5% ou não significativo respectivamente pelo teste F

Tabela 5. Análise de variância conjunta relacionado para produção, teores de ferro e zinco em 20 linhagens e três cultivares (Experimento PSR - porte semi ramador) e 17 linhagens e quatro cultivares de feijão-caupi (experimento PED - porte ereto e de crescimento determinado) avaliados em sete ambientes irrigados e de sequeiro.

Fonte de variação	Quadrado Médio							
	Experimento PSR				Experimento PED			
	GL	Produção	Ferro	Zinco	GL	Produção	Ferro	Zinco
Genótipo (G)	22	328825*	239.91**	83.01**	20	366806*	257.23**	105.54**
Ambiente (A)	6	20986713*	1814.57**	1086.80**	6	17240794*	182.32**	1613.31**
G x A	132	209439**	137.76**	39.08**	120	200801**	79.86**	11.40**
CPII	27	517149**	339.82**	69.93**	25	599283**	196.80**	13.41 ^{NS}
Résíduo _{AMMII}	105	134136 ^{NS}	114.90 ^{NS}	24.24 ^{NS}	95	131874 ^{NS}	58.98 ^{NS}	10.41 ^{NS}
CPII %		49.78	45.21	42.57		54.46	47.13	24.89
CV(%)		26.2	13.02	8.22		27.6	7.67	5.60

** , * , ^{NS} significativo a 1%, 5% ou não significativo respectivamente pelo teste F

Tabela 6. Estimativa de correlação de Spearman entre métodos de adaptabilidade e estabilidade para produção de grãos, e teores de ferro e zinco em 20 linhagens e três cultivares (Experimento PSR - porte semi ramador) e 17 linhagens e quatro cultivares de feijão-caupi (experimento PED - porte ereto e de crescimento determinado) avaliados em sete ambientes irrigados e de sequeiro.

Métodos	Produção		Ferro		Zinco	
	Lin e Binns	AMMI	Lin e Binns	AMMI	Lin e Binns	AMMI
Experimento PSR						
Eberhart e Russell	-0.03	0.69**	-0.03	0.67**	-0.15	0.52*
Lin e Binns		0.09		0.01		-0.06
Experimento PED						
Eberhart e Russell	0.09	0.24	0.02	0.41**	-0.15	0.31
Lin e Binns		-0.24		-0.01		0.31

**,* significativo a 1%, 5% respectivamente pelo teste F

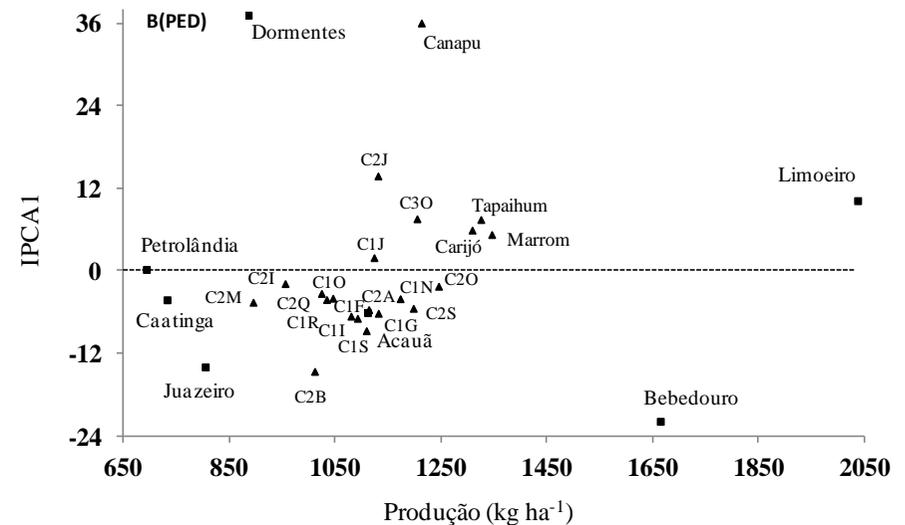
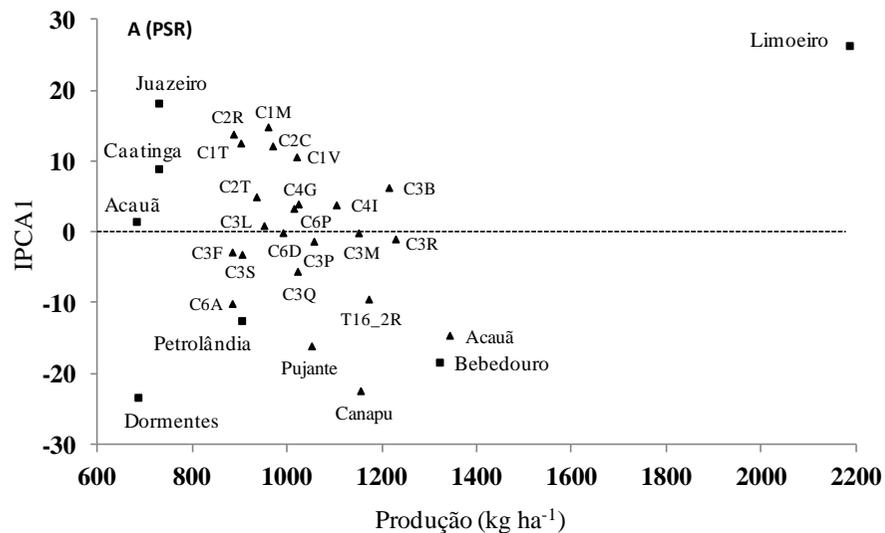


Figura 1. Biplot AMMI para produção de grãos em 20 linhagens e três cultivares (▲) de feijão-caupi (*Vigna unguiculata*) de porte semi ramador (A-PSR) e em 17 linhagens e quatro cultivares de feijão-caupi (*Vigna unguiculata*) de porte ereto e de crescimento determinado (B-PED) avaliados em sete ambientes (■) irrigados e de sequeiro.

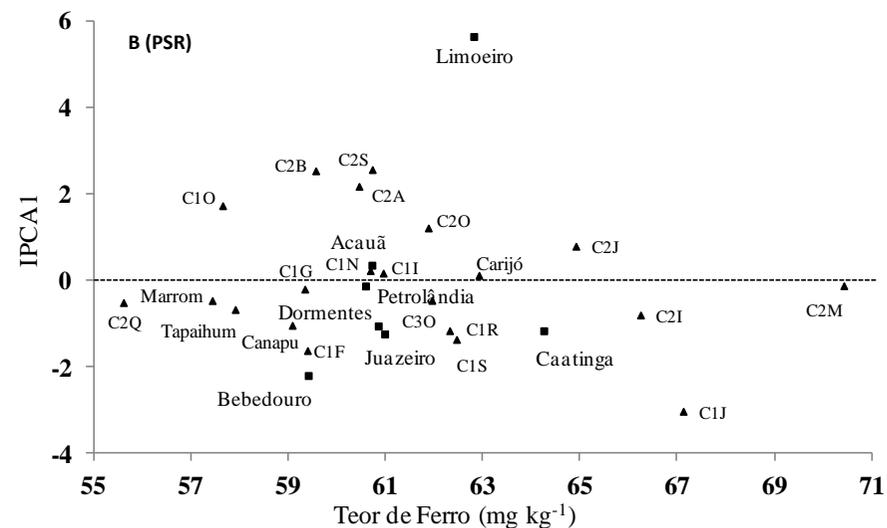
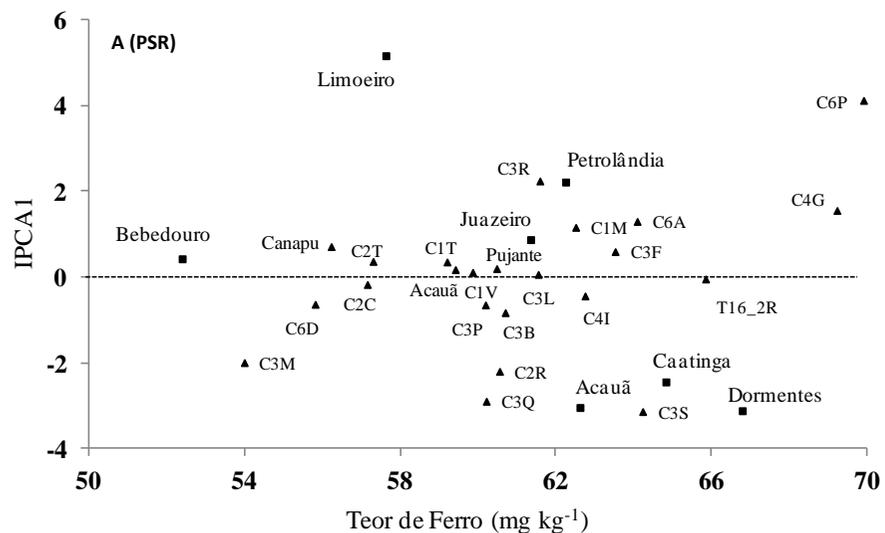


Figura 2. Biplot AMMI para o teor de ferro em 20 linhagens e três cultivares (▲) de feijão-caupi (*Vigna unguiculata*) de porte semi ramador (A-PSR) e em 17 linhagens e quatro cultivares (▲) de feijão-caupi (*Vigna unguiculata*) de porte ereto e de crescimento determinado (B-PED) avaliados em sete ambientes (■) irrigados e de sequeiro.

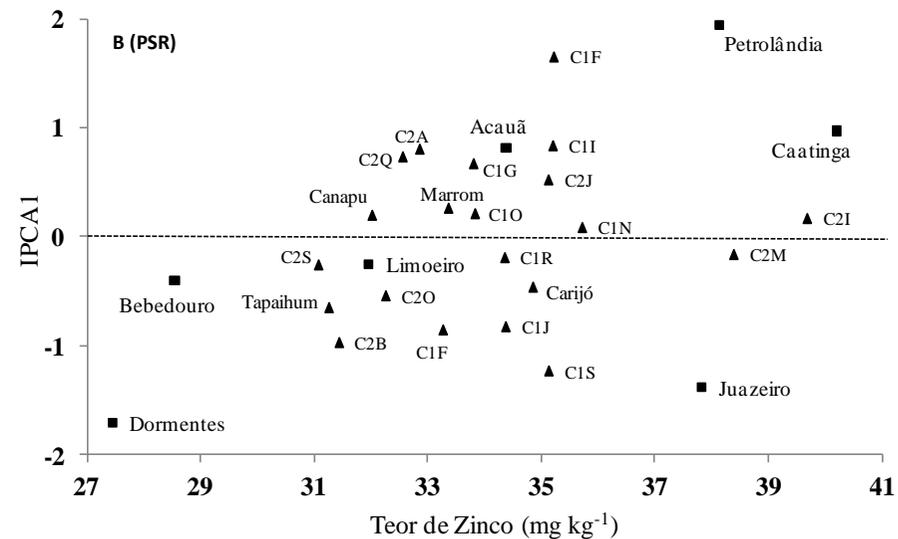
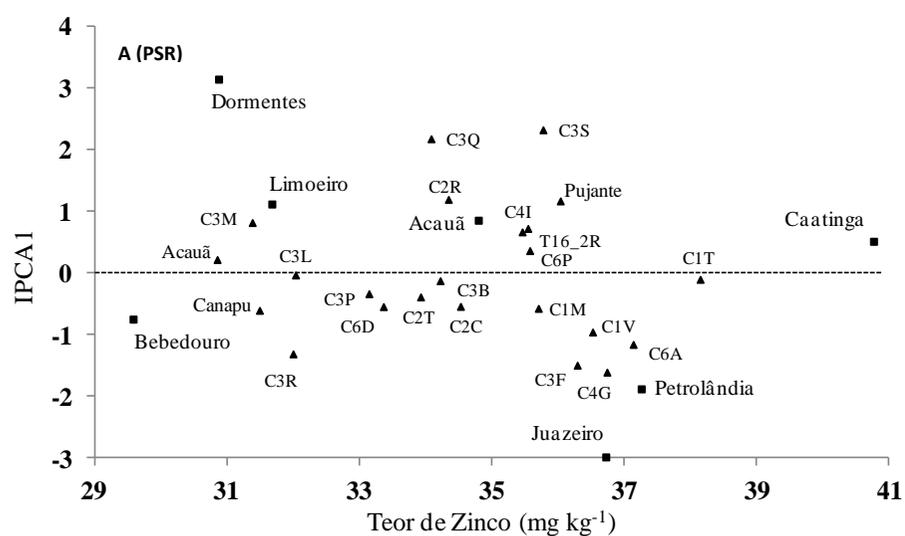


Figura 3. Biplot AMMI para o teor de zinco em 20 linhagens e três cultivares (▲) de feijão-caupi (*Vigna unguiculata*) de porte semi ramador (A-PSR) e em 17 linhagens e quatro cultivares (▲) de feijão-caupi (*Vigna unguiculata*) de porte ereto e de crescimento determinado (B-PED) avaliados em sete ambientes (■) irrigados e de sequeiro.

CAPÍTULO IV

PARÂMETROS DE ADAPTABILIDADE E ESTABILIDADE PARA TEORES DE POTÁSSIO, CÁLCIO E PRODUÇÃO DE GRÃOS EM LINHAGENS DE FEIJÃO-CAUPI

Artigo - Adaptability and stability parameters for potassium and calcium contents and grain yield in cowpea publicado no African Journal of Agricultural Research, disponível em: <http://www.academicjournals.org/journal/AJAR/article-full-text-pdf/7D93EFC60322>

PARÂMETROS DE ADAPTABILIDADE E ESTABILIDADE PARA TEORES DE POTÁSSIO, CÁLCIO E PRODUÇÃO DE GRÃOS EM LINHAGENS DE FEIJÃO-CAUPI

Danillo Olegario Matos da Silva^{1*}, Carlos Antonio Fernandes Santos²

¹Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS), Programa de Pós-graduação em Recursos Genéticos Vegetais. Avenida Transnordestina, SN, Novo Horizonte, 44.036-900, Feira de Santana-BA, Brazil; E-mail: danilloolegario@hotmail.com *corresponding author.

²Embrapa Semiárido. CP 23, CEP 56302-970, Petrolina-PE, Brasil;

Resumo

O objetivo do presente estudo foi estimar a adaptabilidade e estabilidade de teores de K e Ca, e rendimento de grãos em linhagens de feijão-caupi para a recomendação de novos cultivares. Quarenta e quatro linhagens e cultivares foram avaliadas em sete locais na região do semiárido brasileiro. Foram observadas diferenças estatísticas significativas para quadrados médios do tratamento, ambientes e interação tratamento x ambiente, para todas as variáveis. Os métodos de Eberhart e Russell (1966), Lin e Binns (1988), e interação multiplicativa dos efeitos principais aditivos (AMMI) apresentaram resultados semelhantes na seleção de genótipos superiores. As linhagens C4I e C3O mostraram rendimento de grãos igual ou maior do que a média geral de 1050 kg ha⁻¹ nos experimentos, com média de K e Ca mais elevados do que os valores das cultivares avaliadas, bem como ampla estabilidade e boa previsibilidade na série de ambientes avaliados. As linhagens mostraram grande potencial para serem lançadas como novas cultivares na região semiárida brasileira.

Palavras-chave: *Vigna unguiculata*, interação multiplicativa dos efeitos principais aditivos (AMMI), biofortificação, interação genótipo×ambiente.

ADAPTABILITY AND STABILITY PARAMETERS FOR POTASSIUM AND CALCIUM CONTENTS AND GRAIN YIELD IN COWPEA LINES

Danillo Olegario Matos da Silva^{1*} and Carlos Antonio Fernandes Santos²

¹Programa de Pós-graduação em Recursos Genéticos Vegetais, Universidade Estadual de Feira de Santana, Avenida Transnordestina, SN, Novo Horizonte, 44.036-900, Feira de Santana-BA, Brazil.

²Embrapa Semiárido. CP 23, CEP 56302-970, Petrolina-PE, Brazil.

Abstract

The aim of the present study is to estimate the adaptability and stability of K and Ca contents, and grain yield in cowpea lines for release as new cultivars. Forty-four inbred lines and cultivars were assessed in seven sites of the Brazilian semi-arid region. Significant statistical differences were observed in the treatment, environments and environment treatment interaction mean squares for all variables. The methods by Eberhart and Russell (1966), Lin and Binns (1988), and the additive main effects and multiplicative interaction (AMMI) showed similar results in the selection of superior materials. The C4I and C3O lines showed grain yield equal to or greater than the overall mean of 1050 kg ha⁻¹ in the experiments, with mean of K and Ca higher than the values of the assessed cultivars, as well as wide stability and good predictability in the assessed environment series. The lines showed great potential to be released as new cultivars in the Brazilian semiarid region.

Keywords: *Vigna unguiculata*, additive main effects and multiplicative interaction (AMMI), biofortification, genotype×environment interaction.

INTRODUÇÃO

No Brasil, o cultivo do feijão-caupi tornou-se uma das principais alternativas sociais e econômicas, para as populações rurais nas regiões Norte e Nordeste, tendo se expandido para outras regiões, alcançando novos mercados no país e no exterior (Oliveira et al., 2010). Além disso, os benefícios nutricionais e funcionais do feijão-caupi vêm ganhando importância industrial para ser usado como um ingrediente potencial para formulações alimentares (Hamid et al., 2014). Atualmente, a introdução de produtos agrícolas com elevados teores de proteínas e minerais são consideradas componentes importantes, em programas de melhoramento, focados em eliminar a desnutrição humana (Santos e Boiteux, 2013).

A deficiência nutricional na alimentação tem afetado muitas famílias pobres, principalmente nos países em desenvolvimento (Bouis e Welch, 2010). Dados da FAO (2014) indicam que 805 milhões de pessoas ainda sofrem de fome crônica e não têm acesso à quantidade de alimento recomendada pela Organização Mundial de Saúde para ingestão diária de carboidratos, proteínas e gorduras. Para Nutti et al. (2009), a biofortificação é uma estratégia aplicada na agricultura que pode melhorar a saúde da população carente, pois representa uma ferramenta adicional para combater a deficiência de nutrientes, utilizando os alimentos como mecanismo para promover a saúde.

O feijão-caupi apresenta uma grande variabilidade da composição química dos grãos, o que possibilita a seleção de genótipos com elevados teores nutricionais. Singh (2007) avaliou cinquenta linhagens de feijão-caupi e observou que o teor potássio variou de 12,7 a 16,2 g kg⁻¹ e cálcio de 0,54 a 1,33 g kg⁻¹. Santos e Boiteux (2015), estudando oitenta e sete linhagens de feijão-caupi, encontraram teor de K variando de 21 a 27 g kg⁻¹, e teor de Ca de 0,41 a 6,26 g kg⁻¹. Esses minerais são de grande importância para saúde humana. Ca é essencial para a contração muscular, funcionamento do sistema nervoso, expansão e contração dos vasos sanguíneos, e a secreção de

hormônios e enzimas (McDowell, 1992). O potássio é o terceiro mineral mais abundante no corpo humano e é essencial para a vida humana (COMA, 1991).

A seleção e recomendação de cultivares de feijão-caupi é de relevante importância em programas de melhoramento que visam grãos com maior conteúdo nutricional. Na fase de seleção, uma mesma cultivar pode apresentar comportamento diferenciado de acordo com o ano e o local de cultivo. Cruz et al. (2012) ressaltam que essa diferença quase sempre é influenciada por diferentes condições ambientais tratadas como interação genótipo x ambiente (GxE). Uma alternativa para amenizar a influência dessa interação é avaliar os genótipos, no maior número possível de ambientes, e aplicar métodos que os classifiquem conforme sua adaptabilidade e estabilidade.

As análises de adaptabilidade e estabilidade são procedimentos estatísticos que permitem, de algum modo, identificar genótipos de comportamento mais estável e que respondem previsivelmente às variações ambientais (Silva e Duarte, 2006). Na literatura, são citados diversos métodos que estimam a contribuição de cada genótipo para a interação. Os métodos baseado em regressão linear (Eberhart e Russell, 1966), em análise não paramétrica (Lin e Bins, 1988) e multiplicativos baseados em componentes principais (AMMI) tem sido os mais utilizados na seleção de genótipos de feijão-caupi com alta produtividade (Barros et al., 2013; Mano, 2009; Nunes, 2014). Diferentemente da produção de grãos, estudos de adaptabilidade e estabilidade relacionada ao teor de minerais em feijão-caupi não foram encontrados na literatura.

O presente trabalho tem como objetivo estimar parâmetros de adaptabilidade e estabilidade da produção de grãos e teor de minerais, em linhagens de feijão-caupi de dois diferentes portes de planta, em dois diferentes experimentos, avaliados em sete ambientes irrigados ou dependentes de chuvas para possibilitar a recomendação e registro de novas cultivares para região do Vale do São Francisco.

MATERIAL E MÉTODOS

Material vegetal

Foram avaliadas linhagens de feijão-caupi selecionadas para altos teores de minerais e produção de grãos, resultantes de cruzamentos de três acessos introduzidos do International Institute for Tropical Agriculture (IITA), com três cultivares adaptadas ao semiárido brasileiro, conforme procedimentos descritos Santos e Boiteux (2013). As linhagens selecionadas formaram dois experimentos, considerando o tipo do porte da planta: I) porte semi ramador e crescimento indeterminado (PSR), com 23 tratamentos, sendo 20 linhagens (C2R, C3S, C3M, C3Q, C3B, C6P, C1M, C3F, C3L, C2C, C1T, C3R, C4G, C6A, C2T, C3P, C6D, C1V, C4I e T16_2R) e três cultivares controles (BRS Acauã, BRS Pujante and Canapu), e II) porte ereto e de crescimento determinado (PED), com 21 tratamentos, sendo 17 linhagens (C1N, C1R, C3O, C2I, C1G, C1S, C2J, C1J, C1F, C2O, C2S, C2B, C2A, C2Q, C1O, C1I e C2M) e quatro cultivares controles (BRS Carijó, BRS Tapaihum, Canapu e Marrom).

Os experimentos foram conduzidos nos estados brasileiros da Bahia, Ceará, Pernambuco e Piauí. O delineamento experimental foi em blocos casualizados, com três repetições, sendo quatro ambientes irrigados no segundo semestre do ano e três ambientes de sequeiro, no primeiro semestre do ano. Cada parcela apresentou as dimensões de 3,0 x 2,0 m. A parcela experimental do experimento PSR foi formado por duas fileiras, no espaçamento de 1,0 m entre as fileiras e 0,1 m entre plantas, resultando na densidade populacional e 100.000 plantas/ha, enquanto a parcela experimental do experimento PED foi formada por quatro fileiras, no espaçamento de 0,5 m entre as fileiras e 0,1 m entre plantas, com densidade populacional de 200.000 plantas/ha.

Quantificação de minerais

Aproximadamente, 10 g de sementes de 924 plantas foram trituradas em moinho MA 630/1 (Marconi, Brasil) para obter uma farinha fina de cada amostra. As amostras foram analisadas em duplicatas, de acordo com procedimento padrão da Association of Official Analytical Chemists

(AOAC, 1995). Foram adicionados cinco mililitros de ácido nítrico e 1 ml de ácido perclórico a cada 500 mg de amostra de caupi para digestão ácida, que foi realizada em bloco digestor. Um mililitro de extrato foi transferido para um copo de 50 ml, identificado pelo número do protocolo da amostra, e foram adicionados 49 ml de óxido de lantânio. Para quantificação dos teores de potássio e cálcio, as amostras foram submetidas à leitura em espectrofotômetro de absorção atômica de chama (Varian). Os resultados foram expressos em g kg^{-1} para potássio ou cálcio de matéria seca de grãos. Todas as análises foram realizadas no Laboratório de Solos da Embrapa Semiárido.

Análises estatísticas

As análises estatísticas para os delineamentos experimentais foram efetuadas no SAS (SAS, 1989), pelo procedimento GLM e a opção Lsmeans (SAS, 1989). A produção de grãos foi corrigida pelo método da covariância com o stand de plantas médio das parcelas de cada experimento, como descrito por Vencovsky e Barriga (1992), usando programa SAS (1989). Aplicou-se o teste de agrupamento de Scott e Knott (1974) com 5% de significância. As avaliações de adaptabilidade e estabilidade dos genótipos foram realizadas utilizando os métodos de Eberhart e Russell (1966) e de Lin e Binns (1988), disponíveis no programa Genes (Cruz, 2006) e o método multiplicativo baseados em componentes principais (AMMI) utilizando programa SAS (1989) como descrito por Duarte e Vencovsky (1999).

No método de Eberhart e Russell (1966), o coeficiente de regressão está associado ao componente linear, indicando a adaptabilidade do genótipo: genótipos com índice $\beta_i=1$ tem adaptabilidade ampla, sendo que desvios da regressão igual a zero ($\sigma_{di}^2=0$) indicam boa estabilidade. No método de Lin e Binns (1988) o parâmetro P_i define a estabilidade de um genótipo, sendo definido como o quadrado médio da distância entre a média de um genótipo e a resposta média máxima para todos os locais, de modo que genótipos com menores valores correspondem aos de melhor desempenho.

A metodologia AMMI destaca-se por descrever melhor a interação genótipo x ambiente, mediante o descarte de ruídos adicionais, presentes nas estimativas tradicionais da interação. Utiliza conjuntamente a análise de variância para os efeitos principais de genótipos e ambientes e a Análise dos Componentes Principais (ACP) para a interação. Procura identificar os genótipos mais estáveis e adaptáveis, e realiza o zoneamento agrônômico dos ambientes (Duarte e Vencovsky, 1999).

RESULTADO E DISCUSSÃO

Linhagens de feijão-caupi de porte semi ramador e crescimento indeterminado (PSR)

Foram observadas diferenças estatísticas significativas para os quadrados médios de tratamentos na maioria dos ambientes. Apenas o ambiente Bebedouro, para os teores de potássio e cálcio, e Acauã para teor de cálcio não foram significativos (Tabela 1). Os experimentos em Acauã, Dormentes, Limoeiro e Petrolândia foram conduzidos em propriedades de agricultores, que não comprometeram as avaliações, considerando que os coeficientes de variação foram abaixo de 43% (Tabela 1), além de terem permitido avaliações em ambientes representativos do cultivo da espécie.

As relações entre os maiores e menores quadrados dos resíduos observados foram inferiores ou próximo a sete para todas as variáveis. Limoeiro foi ambiente o que apresentou a maior média de produção de grãos (Tabela 1). Para os minerais, destacou-se o ambiente Petrolândia com as maiores médias de K e Ca, sendo que Acauã e Juazeiro também apresentaram médias altas, não diferindo estatisticamente de Petrolândia, para o teor de cálcio. As cultivares BRS Acauã foi a que apresentou a maior produção de grãos (Tabelas 2). Essa cultivar foi avaliada anteriormente nos mesmos locais que as linhagens dessa pesquisa (exceto Limoeiro), e foi selecionada exclusivamente para produção de grãos e precocidade (Santos et al., 2008). As linhagens C3R e C3B apresentaram produtividade de grãos próxima da cultivar controle BRS Acauã, bem como parâmetros de ampla

adaptabilidade e boa estabilidade, tanto pelo método de Eberhart e Russell, como pelo método de Lin e Binns (Tabela 2).

As linhagens C2C, C3P, C6D, C1V, C4I e T16_2R apresentaram as maiores médias para o teor de K. O método Eberhart e Russell (1966), destacou as linhagens C6D e C1V com ampla adaptabilidade e estabilidade. O método Lin e Binns (1988) destacou as linhas C4I, C6D e C1V com os valores Pi mais baixos. As linhagens C1T, C6A, C2T e C4I, juntamente com a cultivar Acauã, apresentaram os maiores teores médios de Ca. Entretanto, as quatro linhagens apresentaram estabilidade imprevisível, com exceção da linhagem C1T de ampla adaptabilidade pelo método Eberhart e Russell (1966). O método Lin e Binns (1988) destacou com média alta, ampla adaptabilidade e estabilidade a linhagem C4I para os teores de K e Ca (Tabela 2).

Utilizando o método multivariado AMMI, a interação genótipo x ambiente foi decomposta em seis componentes principais da interação (CPI). Porém, apenas o primeiro eixo (CPI1) teve seu resíduo significativo pelo teste F_r ($p < 0,01$), adotando-se o modelo AMMI1 para todas as variáveis. Assim, a interpretação gráfica da adaptabilidade e da estabilidade foi realizada apenas com o CPI1, via biplot AMMI1. Resultados semelhantes foram encontrados por Barros et al., (2013), avaliando produtividade de feijão-caupi.

Para produção de grãos, teor de K e Ca, o primeiro componente principal da interação explicou 49,78, 36,12 e 45,50%, respectivamente (Tabela 4). O ambiente Acauã foi o mais estável e Limoeiro foi o ambiente mais produtivo, com alta instabilidade. Os genótipos C3M e C3R foram os mais estáveis para produção de grãos. Para o teor de K, Petrolândia apresentou a maior média e foi o ambiente mais estável. Os genótipos C3B, C4I e C3R com alta estabilidade obteve média superior as cultivares avaliadas. O ambiente Acauã foi o mais favorável para o teor de Ca e as linhagens C4I, C2T e C6A apresentaram as maiores médias e boa estabilidade (Figura 1).

Linhas de feijão-caupi de porte ereto e de crescimento determinado (PED)

Foram observadas diferenças estatísticas significativas para os quadrados médios de tratamentos, tanto para produção quanto para os teores de potássio e cálcio. Três ambientes para cada variável não apresentaram diferenças estatísticas dos quadrados médios dos tratamentos (Tabela 1). Os experimentos em Acauã, Dormentes, Limoeiro e Petrolândia foram conduzidos em propriedades de agricultores, que não comprometeram as avaliações, considerando que os coeficientes de variação foram abaixo de 39% (Tabela 1), além de terem permitido avaliações em ambientes representativos do cultivo da espécie. O ambiente de Limoeiro também foi o que apresentou as maiores médias de produção de grãos (Tabela 1).

Assim como no experimento anterior, as relações entre os maiores e menores quadrados dos resíduos observados foram inferiores ou próximo a sete para todas as variáveis. As médias de produção de grãos, nos três quatro ambientes irrigados, foi 45% superior em relação a média dos ou três ambientes de sequeiro (Tabela 1), corroborando com resultados reportados por Santos et al. (2008). No entanto, as médias dos minerais avaliados apresentaram valores próximos, independente do manejo adotado, com ou sem irrigação (Tabela 1).

As cultivares BRS Carijo e BRS Tapaihum foram as que apresentaram as maiores produções de grãos (Tabelas 3). Essas cultivares foram avaliadas anteriormente nos mesmos locais que as linhas dessa pesquisa (exceto Limoeiro), e foram selecionadas exclusivamente para produção de grãos e precocidade (Santos et al., 2008). A linha C20 apresentou produtividade de grãos próximo das cultivares controle BRS Carijo e BRS Tapaihum, bem como parâmetros de ampla adaptabilidade e boa estabilidade, tanto pelo método de Eberhart e Russell (1966), como pelo método de Lin e Binns (1988) (Tabela 3).

A linha C30 apresentou maior teor de K, com ampla adaptabilidade de acordo Eberhart e Russell (1966). Lin e Binns destacou a linha C30 com média alta e baixo valor Pi para teor de K. Para o teor de Ca, a linha C20 apresentou média alta, bem como parâmetros de ampla

adaptabilidade e boa estabilidade, pelo método de Eberhart e Russell. Para o método de Lin e Binns (1988) Pi de menores valores foram para os genótipos C3O e C2I (Tabela 3).

Utilizando o método multivariado AMMI, a interação genótipo x ambiente foi decomposta em seis componentes principais da interação (CPI). Porém, apenas o primeiro eixo (CPI1) teve seu resíduo significativo pelo teste F_r ($p < 0,01$), adotando-se o modelo AMMI1 para todas as variáveis. Assim, a interpretação gráfica da adaptabilidade e da estabilidade foi realizada apenas com o CPI1, via biplot AMMI1.

O primeiro componente principal da interação explicou 54,46% para produção de grãos, 39,80% para teor de K e 46,96% para o teor de Ca (Tabela 4). O ambiente Petrolândia foi o mais estável e obteve a menor média de produção. Entre as linhagens o método AMMI destacou a C2O com alta estabilidade e média de produção próxima das cultivares. A linhagem C3O apresentou alta estabilidade para o teor de K e, Petrolândia e Bebedouro foram os ambientes mais favoráveis. As linhagens C2I, C2A e C3O foram as que apresentaram as maiores médias e boa estabilidade para o teor de Ca (Figura 2).

Em ambos os experimentos, os métodos de adaptabilidade e estabilidade utilizados no presente estudo mostraram resultados semelhantes no que concerne a identificação dos materiais superiores, com exceção do Ca. Polizel et al. (2012), testando 16 genótipos de soja em diferentes ambientes, utilizaram sete métodos de adaptabilidade e estabilidade e observaram que as metodologias estudadas foram concordantes e complementares quanto aos resultados. Nunes et al. (2014), utilizando métodos paramétricos e não paramétricos em 20 genótipos de feijão-caupi constataram que algumas metodologias não devem ser utilizadas simultaneamente, e que outras devem ser complementares.

O feijão-caupi é cultivado largamente em regiões semiáridas devido a sua tolerância ao estresse hídrico, sendo capaz de produções de grãos significativas quando comparado com outras leguminosas, tal como feijão comum e grão de bico. Nesse contexto, a seleção de cultivares que associem altos teores de minerais com produção de grão será uma grande contribuição para as

populações de regiões semiáridas, onde parte da população tem recursos limitados para aquisições diversas.

A seleção de cultivares com o objetivo da biofortificação alimentar com minerais na dieta humana são essenciais (White e Broadly, 2009). No entanto, os esforços atuais para selecionar e liberar cultivares de feijão-caupi com elevado conteúdo mineral, associado a um bom desempenho agrônômico, com base em parâmetros de adaptabilidade e estabilidade são ainda muito restrito, mesmo para commodities importantes, como a soja. O presente estudo é o primeiro realizado para estimar os parâmetros de adaptabilidade e estabilidade para os teores de K e Ca em linhagens de feijão-caupi.

As linhagens C4I e C3O apresentaram produções de grãos igual ou superior as médias dos experimentos, média alta para teor de potássio e cálcio, estabilidade ampla e boa previsibilidade na série de ambientes avaliados, tanto pela metodologia de Eberhart e Russell (1966), e Lin e Binns (1988) quanto pelo método AMMI. As cultivares BRS Acauã, BRS Tapaihum e BRS Carijó, com o maior rendimento de grãos, devem ser utilizados para cruzamento com C4I, C3O, C2I e C2T para seleção de linhagens com rendimento superior de grãos e altos teores de potássio e cálcio.

CONCLUSÃO

As linhagens C4I de porte semi ramador e crescimento indeterminado, e C3O de porte ereto e de crescimento determinado, identificadas em ambientes representativos do semiárido brasileiro, tanto irrigado, como de sequeiro, tem grande potencial para serem recomendadas como novas cultivares para a região, pois apresentaram produções de grãos próximo de cultivares comerciais, bem como valores médios de potássio e cálcio superior aos valores das cultivares de feijão-caupi avaliadas no experimento.

REFERÊNCIAS

- AOAC (1995). Official Methods of Analysis. Association of Official Analytical Chemists, Arlington, VA.
- Barros MA, Rocha MM, Gomes RLF, Silva KJD, Neves AC (2013). Adaptabilidade e estabilidade produtiva de feijão-caupi de porte semiprostrado. *Pesqui. Agropecu. Bras.* 48:403-410.
- Bouis HE, Welch RM (2010). Biofortification - A Sustainable Agricultural Strategy for Reducing Micronutrient Malnutrition in the Global South. *Crop Sci.* 50:20-32.
- COMA - Committee on Medical Aspects of Food Policy (1991). Dietary Reference Values for Food Energy and Nutrients for the United Kingdom, N. 41. Department of Health. HMSO, London.
- Cruz CD (2006). Programa Genes: Estatística experimental e matrizes. Viçosa: Ed. UFV.
- Cruz CD, Regazzi AJ (1997). Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético. Viçosa: UFV 390 p.
- Cruz CD, Regazzi AJ, Carneiro PCS (2012). Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético. Vol. 1. Viçosa: UFV 514 p.
- Duarte JB, Vencovsky R (1999). Interação genótipos x ambientes: uma introdução à análise AMMI. Ribeirão Preto: Sociedade Bras. Genética. 60 p.
- Eberhart AS, Russell WA (1966). Stability parameters for comparing varieties. *Crop Sci.* 6:36-40.
- FAO (2014). The State of Food Insecurity in the World 2014. Strengthening the enabling environment for food security and nutrition. Rome, FAO.
- Hamid S, Muzaffar S, Wani IA, Masoodi FA, Bhat MM (2014). Physical and cooking characteristics of two cowpea cultivars grown in temperate Indian climate. *J. Soc. Agric. Sci.* 15 (2):127-135.
- Lin CS, Binns MR (1988). A superiority measure of cultivar performance for cultivar×location data. *Can. J. Plant Sci.* 68:193-198.
- Mano ARO (2009). Adaptabilidade e estabilidade fenotípica de cultivares de feijão-de-corda. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 152 p.

McDowell LR (1992). *Minerals in Animal and Human Nutrition*. Academic Press Inc., CA, USA.

Nunes HF, Freire Filho FR, Ribeiro VQ, Gomes RLF (2014). Grain yield adaptability and stability of blackeyed cowpea genotypes under rainfed agriculture in Brazil. *Afr. J. Agric. Res.* 9:255-261.

Nutti MR, Rocha MM, Watanabe E, Carvalho JLV, Freire Filho FR, Silva KJD (2009). Biofortificação de feijão-caupi no Brasil. In: Congresso nacional de feijão-caupi, Belém, PA. Da agricultura de subsistência ao agronegócio. Belém, PA pp. 26-38. Oliveira OMS, Silva JF, Gonçalves JRP, Klehm CS (2010). Período de convivência das plantas daninhas com cultivares de feijão-caupi em várzea no Amazonas. *Planta daninha* 28:523-530.

Polizel AC, Juliatti FC, Hamawaki OT, Hamawaki RL, Guimarães SL (2013). Adaptabilidade e estabilidade fenotípica de genótipos de soja no estado do Mato Grosso. *Biosci. J.* 29:910-920.

Santos CAF, Barros GAA, Santos ICCN, Ferraz MGS (2008). Comportamento agrônômico e qualidade culinária de feijão-caupi no Vale do São Francisco. *Hortic. Bras.* 26:404-408.

Santos CAF, Boiteux LS (2013). Breeding biofortified cowpea lines for semi-arid tropical areas by combining higher seed protein and mineral levels. *Genet. Mol. Res.* 12:6782-6789.

SAS (1989). *SAS/STAT User's Guide, Version 6, Fourth Edition, Volume 1*. Cary: SAS Institute Inc. 890 p.

Scott A, Knott M (1974). Cluster-analysis method for grouping means in analysis of variance. *Biometrics* 30:507-512.

Silva WCJ, Duarte JB (2006). Métodos estatísticos para estudo de adaptabilidade e estabilidade fenotípica em soja. *Pesqui. Agropec. Bras.* 41:23-30.

Singh BB (2007). Recent progress in cowpea genetics and breeding. *Acta Hortic.* 752:69-75.

Vencovsky R, Barriga P (1992). *Genética biométrica no fitomelhoramento*. Ribeirão Preto: Sociedade Bras. Genética 496 p.

White PJ, Broadley MR (2009). Biofortification of crops with seven mineral elements often lacking in human diets iron, zinc, copper, calcium, magnesium, selenium and iodine. *New Phytol.* 182:49-84.

Tabela 1. Quadrado médio total (QMT), quadrado médio do resíduo (QMR), médias e coeficiente de variação (CV) relacionado para produção, teores de potássio e cálcio em 20 linhagens e três cultivares no eExperimento PSR (porte semi ramador) e 17 linhagens e quatro cultivares de feijão-caupi no experimento PED (porte ereto e de crescimento determinado) avaliados em sete ambientes irrigados e de sequeiro.

Local	Produção				Potássio				Cálcio			
	QMT	QMR	Média	CV	QMT	QMR	Média	CV	QMT	QMR	Média	CV
Experimento PSR												
Acauã	87189**	42345	684	30.0	3.5**	1.4	15.1 ^b	7.8	0.2	0.11	1.3 ^a	25.9
Petrolina A	306194**	57712	1322	18.1	7.9**	3.1	14.8 ^b	11.9	0.0*	0.02	0.8 ^c	17.2
Petrolina B	90050**	32140	727	24.6	3.2	3.7	14.9 ^b	12.9	0.1	0.06	1.1 ^b	22.1
Dormentes	355248**	60272	689	35.6	19.6**	5.4	14.7 ^b	15.8	0.1**	0.04	0.9 ^c	21.3
Limoeiro	278796**	114883	2192	15.4	15.0**	3.1	14.9 ^b	11.8	0.4*	0.15	1.1 ^b	33.6
Juazeiro	202060*	97575	729	42.8	5.5*	2.7	14.9 ^b	11.0	0.7**	0.07	1.3 ^a	20.7
Petrolândia	259048**	81818	897	31.8	5.9**	1.5	15.7 ^a	7.9	0.1**	0.03	1.2 ^a	14.9
Experimento PED												
Acauã	86308	78306	1087	25.7	1.6*	0.7	14.5 ^b	6.0	0.03	0.02	0.9 ^b	18.8
Petrolina A	121491*	62900	1697	14.7	5.3*	2.3	16.2 ^a	9.4	0.04*	0.02	0.8 ^b	16.8
Petrolina B	52592*	28273	734	22.9	3.4	3.4	14.1 ^c	13.1	2.20*	0.01	0.8 ^b	16.1
Dormentes	653413**	75526	887	30.9	2.5	1.8	14.0 ^c	9.6	0.05	0.03	0.9 ^b	21.5
Limoeiro	398371**	102030	2057	15.5	11.4**	4.3	14.8 ^b	14.0	0.24	0.04	0.8 ^b	24.5
Juazeiro	116106	83516	806	35.8	3.7*	1.9	14.6 ^b	9.5	0.75**	0.08	1.1 ^b	26.3
Petrolândia	98114	71214	692	38.5	5.2	3.9	16.4 ^a	12.1	0.16**	0.05	1.2 ^a	19.2

Valores seguidos da mesma letra, na coluna, pertencem ao mesmo grupo, pelo teste de Scott e Knott (1974) a 5% de probabilidade; **, *, ^{ns} significativo a 1%, 5% ou não significativo respectivamente pelo teste F

Tabela 2. Estabilidade e adaptabilidade para produção, potássio e cálcio em 20 linhagens e três cultivares de feijão-caupi, porte semi ramador (PSR) avaliados em sete ambientes irrigados e de sequeiro utilizando o método Eberhart & Russell, 1966 e Lin & Binns, 1988.

Genótipo	Produção				Potássio				Cálcio			
	E&R		L&B		E&R		L&B		E&R		L&B	
	Bo	β_i	σ_{dii}	Pi	β_o	β_i	σ_{dii}	Pi	β_o	β_i	σ_{dii}	Pi
C2R	886	1.3*	37767*	344349 ⁽²³⁾	13.4 ^c	-2.1*	0.90	18.4 ⁽²³⁾	0.9 ^c	0.6	-0.01	0.7 ⁽²³⁾
C3S	904	1.0	16770	305069 ⁽¹⁹⁾	13.9 ^c	-2.5**	5.35**	17.0 ⁽²²⁾	1.2 ^b	0.4	0.14**	0.5 ⁽¹³⁾
C3M	1150	0.9	-10959	152055 ⁽⁵⁾	14.7 ^b	0.0	0.32	12.1 ⁽¹⁶⁾	1.0 ^c	0.9	0.01	0.5 ⁽¹⁵⁾
C3Q	1021	1.2	40905*	219184 ⁽⁸⁾	13.5 ^c	1.4	-0.07	16.0 ⁽²¹⁾	1.2 ^b	0.5	-0.01	0.5 ⁽¹²⁾
C3B	1214	0.9	21638	144688 ⁽⁴⁾	15.2 ^b	3.8*	2.22**	13.4 ⁽¹⁹⁾	1.1 ^b	0.8	-0.00	0.5 ⁽¹⁴⁾
C6P	1011	0.9	-2161	224767 ⁽⁹⁾	14.6 ^b	2.6	2.90**	11.7 ⁽¹⁵⁾	1.1 ^b	0.4	-0.00	0.6 ⁽²⁰⁾
C1M	959	1.4**	58313**	301820 ⁽¹⁸⁾	15.3 ^b	2.0	0.93	8.3 ⁽⁶⁾	1.2 ^b	1.5	0.00	0.4 ⁽⁴⁾
C3F	883	0.8	1281	315024 ⁽²¹⁾	15.1 ^b	1.9	0.24	10.1 ⁽¹⁰⁾	1.2 ^b	0.8	0.01	0.5 ⁽⁸⁾
C3L	950	1.0	-22570	249086 ⁽¹³⁾	15.0 ^b	2.4	-0.12	10.8 ⁽¹²⁾	1.1 ^b	0.5	-0.01	0.5 ⁽¹⁶⁾
C2C	968	1.3*	29413	287946 ⁽¹⁶⁾	16.0 ^a	1.6	0.21	6.4 ⁽³⁾	1.1 ^b	1.0	-0.01	0.5 ⁽⁹⁾
C1T	901	1.1	50964*	331871 ⁽²²⁾	14.4 ^b	2.1	0.69	14.0 ⁽²⁰⁾	1.3 ^a	0.9	0.06**	0.4 ⁽⁵⁾
C3R	1228	0.8	-6056	125105 ⁽²⁾	14.8 ^b	2.9	1.31*	11.2 ⁽¹³⁾	1.1 ^b	1.1	0.01	0.5 ⁽¹¹⁾
C4G	1023	0.7*	27058	251814 ⁽¹⁴⁾	14.6 ^b	2.4	2.21**	12.6 ⁽¹⁸⁾	1.0 ^c	0.8	0.01	0.7 ⁽²¹⁾
C6A	883	0.8	30778*	310255 ⁽¹³⁾	14.9 ^b	1.8	0.12	9.0 ⁽⁹⁾	1.4 ^a	1.9**	0.09**	0.2 ⁽³⁾
C2T	934	0.9	6603	293622 ⁽¹⁷⁾	15.2 ^b	1.4	0.07	8.6 ⁽⁷⁾	1.5 ^a	1.5	0.11**	0.2 ⁽²⁾
C3P	1055	0.7*	27301	239393 ⁽¹¹⁾	16.0 ^a	-0.7	-0.75	6.7 ⁽⁴⁾	1.1 ^b	1.3	0.02	0.5 ⁽⁷⁾
C6D	990	0.9	43453*	256330 ⁽¹⁵⁾	15.9 ^a	1.0	-0.51	6.0 ⁽²⁾	1.2 ^b	1.0	0.04*	0.5 ⁽¹⁷⁾
C1V	1019	1.2	64770**	243650 ⁽¹²⁾	15.8 ^a	-0.3	-0.67	7.0 ⁽⁵⁾	1.1 ^b	1.7*	0.01	0.4 ⁽⁶⁾
C4I	1102	1.0	-4448	171894 ⁽⁶⁾	17.1 ^a	-4.3**	11.77**	1.1 ⁽¹⁾	1.7 ^a	3.5**	0.20**	0.1 ⁽¹⁾
T16_2R	1171	1.0	69547**	131728 ⁽³⁾	15.8 ^a	1.2	1.94*	10.2 ⁽¹¹⁾	1.0 ^c	-0.8**	0.06**	0.6 ⁽²⁰⁾
Acauã	1341	1.0	112508**	63731 ⁽¹⁾	15.5 ^b	1.7	1.24	11.4 ⁽¹⁴⁾	1.3 ^a	0.6	0.03	0.5 ⁽¹⁰⁾
Pujante	1050	0.8	185586**	226464 ⁽¹¹⁾	15.4 ^b	1.0	-0.81	8.8 ⁽⁸⁾	1.1 ^b	0.6	-0.01	0.5 ⁽¹⁸⁾
Canapu	1153	0.5**	175495**	184265 ⁽⁷⁾	14.8 ^b	1.7	1.17	12.4 ⁽¹⁷⁾	0.9 ^c	0.5	-0.00	0.7 ⁽²²⁾
Média				1034			15.08					1.15

Valores seguidos da mesma letra, na coluna, pertencem ao mesmo grupo, pelo teste de Scott e Knott (1974) a 5% de probabilidade; **, *, ^{ns} significativo a 1%, 5% ou não significativo respectivamente pelo teste F

Tabela 3. Estabilidade e adaptabilidade para produção, potássio e cálcio, em 17 linhagens e quatro cultivares de feijão-caupi, porte ereto e de crescimento determinado (PED) avaliados em sete ambientes irrigados e de sequeiro utilizando o método Eberhart & Russell, 1966 e Lin & Binns, 1988.

Genótipo	Produção				Potássio				Cálcio			
	E&R		L&B		E&R		L&B		E&R		L&B	
	β_o	β_i	σ_{dii}	Pi	β_o	β_i	σ_{dii}	Pi	β_o	β_i	σ_{dii}	Pi
C1N	1170	1.2	-55352	269488 ⁽⁹⁾	14.7 ^b	0.9	-0.55	4.7 ⁽¹¹⁾	0.9 ^b	0.4	0.00	0.4 ⁽¹⁴⁾
C1R	1044	0.9	-35616	372225 ⁽¹⁸⁾	14.6 ^b	0.6	-0.08	5.4 ⁽¹⁷⁾	1.0 ^b	1.2	0.02*	0.2 ⁽⁴⁾
C3O	1203	0.4*	-5183	235209 ⁽⁷⁾	16.6 ^a	1.7	0.33	0.7 ⁽¹⁾	1.1 ^a	2.4**	0.09**	0.1 ⁽²⁾
C2I	953	0.9	-53143	404583 ⁽¹⁹⁾	14.4 ^b	0.9	0.42	5.7 ⁽¹⁹⁾	1.3 ^a	2.7**	0.33**	0.1 ⁽¹⁾
C1G	1129	1.0	-42325	304343 ⁽¹¹⁾	14.8 ^b	1.1	1.54*	5.0 ⁽¹⁵⁾	0.9 ^b	0.8	-0.01	0.3 ⁽¹¹⁾
C1S	1107	0.9	-28073	344578 ⁽¹⁴⁾	14.2 ^b	0.6	0.21	6.6 ⁽²⁰⁾	0.8 ^c	0.7	-0.01	0.4 ⁽²⁰⁾
C2J	1129	1.2	43212	202587 ⁽⁴⁾	14.3 ^b	0.7	-0.31	5.5 ⁽¹⁸⁾	0.9 ^b	0.9	-0.00	0.3 ⁽¹²⁾
C1J	1121	1.0	-38895	249457 ⁽⁸⁾	14.7 ^b	0.9	-0.27	4.7 ⁽¹²⁾	1.0 ^b	0.7	0.01	0.2 ⁽⁵⁾
C1F	1111	1.1	-45872	322260 ⁽¹²⁾	14.8 ^b	1.6	0.79	5.1 ⁽¹⁶⁾	0.8 ^c	0.4	0.01	0.4 ⁽¹⁹⁾
C2O	1243	1.1	-46357	232238 ⁽⁶⁾	14.5 ^b	1.2	-0.57	4.7 ⁽¹⁰⁾	1.1 ^a	1.2	0.01	0.2 ⁽³⁾
C2S	1196	0.9	-45261	276386 ⁽¹⁰⁾	15.4 ^a	1.1	2.48**	3.7 ⁽⁸⁾	1.0 ^b	1.5	0.00	0.3 ⁽⁷⁾
C2B	1009	0.6	71955	496665 ⁽²¹⁾	14.0 ^b	1.1	1.80*	8.1 ⁽²¹⁾	1.0 ^b	-0.4**	0.11**	0.3 ⁽⁸⁾
C2A	1111	1.2	-25378	329596 ⁽¹³⁾	15.4 ^a	1.4	0.03	2.7 ⁽⁴⁾	1.0 ^b	2.3**	0.09**	0.4 ⁽¹³⁾
C2Q	1032	1.0	-46745	364971 ⁽¹⁶⁾	15.6 ^a	1.5	0.42	2.4 ⁽²⁾	0.9 ^b	1.2	0.02*	0.4 ⁽¹⁵⁾
C1O	1022	0.8	-57381	367170 ⁽¹⁷⁾	15.2 ^a	0.4	0.04	3.8 ⁽⁹⁾	0.9 ^b	0.6	0.02*	0.4 ⁽¹⁸⁾
C1I	1078	0.8	-26876	353772 ⁽¹⁵⁾	15.1 ^a	1.1	1.32*	3.6 ⁽⁷⁾	0.8 ^c	1.0	0.02*	0.3 ⁽⁹⁾
C2M	893	0.9	-35771	479205 ⁽²⁰⁾	15.4 ^a	1.2	-0.14	2.7 ⁽³⁾	1.0 ^b	-0.0**	0.09**	0.3 ⁽⁶⁾
Marrom	1307	1.4	6935	185480 ⁽³⁾	15.1 ^a	0.5	-0.27	3.6 ⁽⁶⁾	0.8 ^c	0.4	0.00	0.5 ⁽²¹⁾
Carijó	1344	0.9	-893	135731 ⁽²⁾	14.5 ^b	0.8	-0.18	4.9 ⁽¹⁴⁾	0.8 ^c	0.8	-0.01	0.4 ⁽¹⁶⁾
Tapaihum	1323	1.4	-15169	123155 ⁽¹⁾	15.2 ^a	0.1*	3.17**	4.8 ⁽¹³⁾	0.9 ^b	0.7	0.00	0.4 ⁽¹⁷⁾
Canapu	1211	0.5*	493790	228627 ⁽⁵⁾	15.4 ^a	1.1	0.92**	3.3 ⁽⁵⁾	0.9 ^b	1.2	0.02*	0.3 ⁽¹⁰⁾
Média			1130				14.96				0.95	

Valores seguidos da mesma letra, na coluna, pertencem ao mesmo grupo, pelo teste de Scott e Knott (1974) a 5% de probabilidade; **,*, ^{ns} significativo a 1%, 5% ou não significativo respectivamente pelo teste F

Tabela 4. Análise de variância conjunta relacionado para produção, teores de potássio e cálcio em 20 linhagens e três cultivares (Experimento PSR - porte semi ramador) e 17 linhagens e quatro cultivares de feijão-caupi (experimento PED - porte ereto e de crescimento determinado) avaliados em sete ambientes irrigados e de sequeiro.

Fonte de variação	Quadrado médio							
	Experimento PSR				Experimento PED			
	GL	Produção	Potássio	Cálcio	GL	Produção	Potássio	Cálcio
Genótipo (G)	22	328825*	15.14**	0.64**	20	366806*	7.11**	0.29**
Ambiente (A)	6	20986713*	7.47*	2.07**	6	17240794*	58.08**	1.26**
G x A	132	209439**	7.54**	0.19**	120	200801**	4.38**	0.17**
ACPI	27	517149**	12.92*	0.45**	25	599283**	8.37*	0.61**
Resíduo _{AMMII}	105	134136	5.87	0.14	95	131874	3.33	0.18
ACPI%		49.78	36.12	45.50		54.46	39.80	46.96
CV(%)		26.2	11.59	23.44		27.6	11.08	22.00

** , * , ^{ns} significativo a 1%, 5% e não significativo, respectivamente, de acordo com teste F, respectivamente.

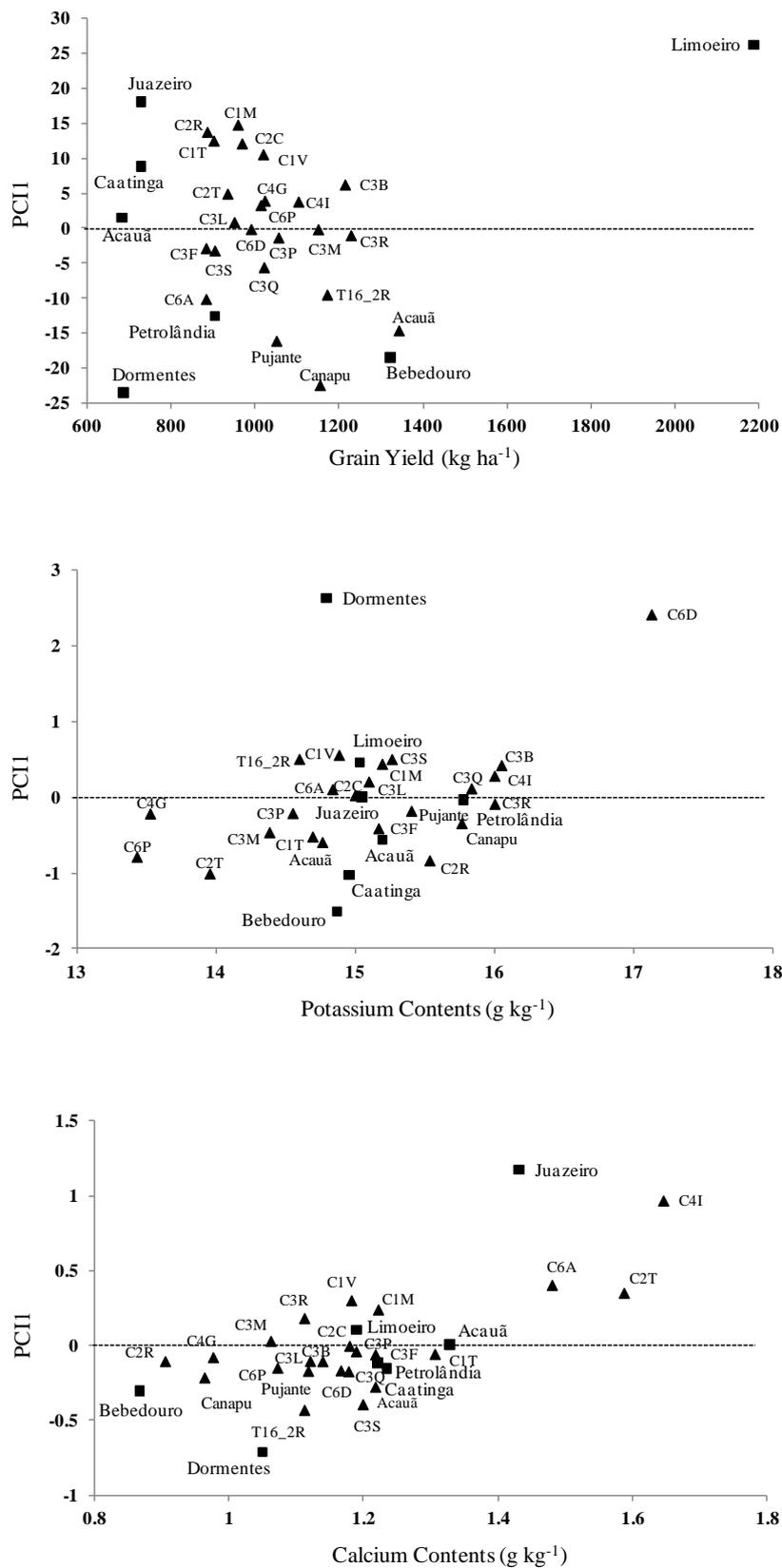


Figura 1. Biplot AMMI para produção de grãos, teores de potássio e cálcio de 20 linhagens 3 cultivares (▲) de feijão-caupi (*Vigna unguiculata*) de porte semi ramador em sete ambientes (■) irrigado e de sequeiro.

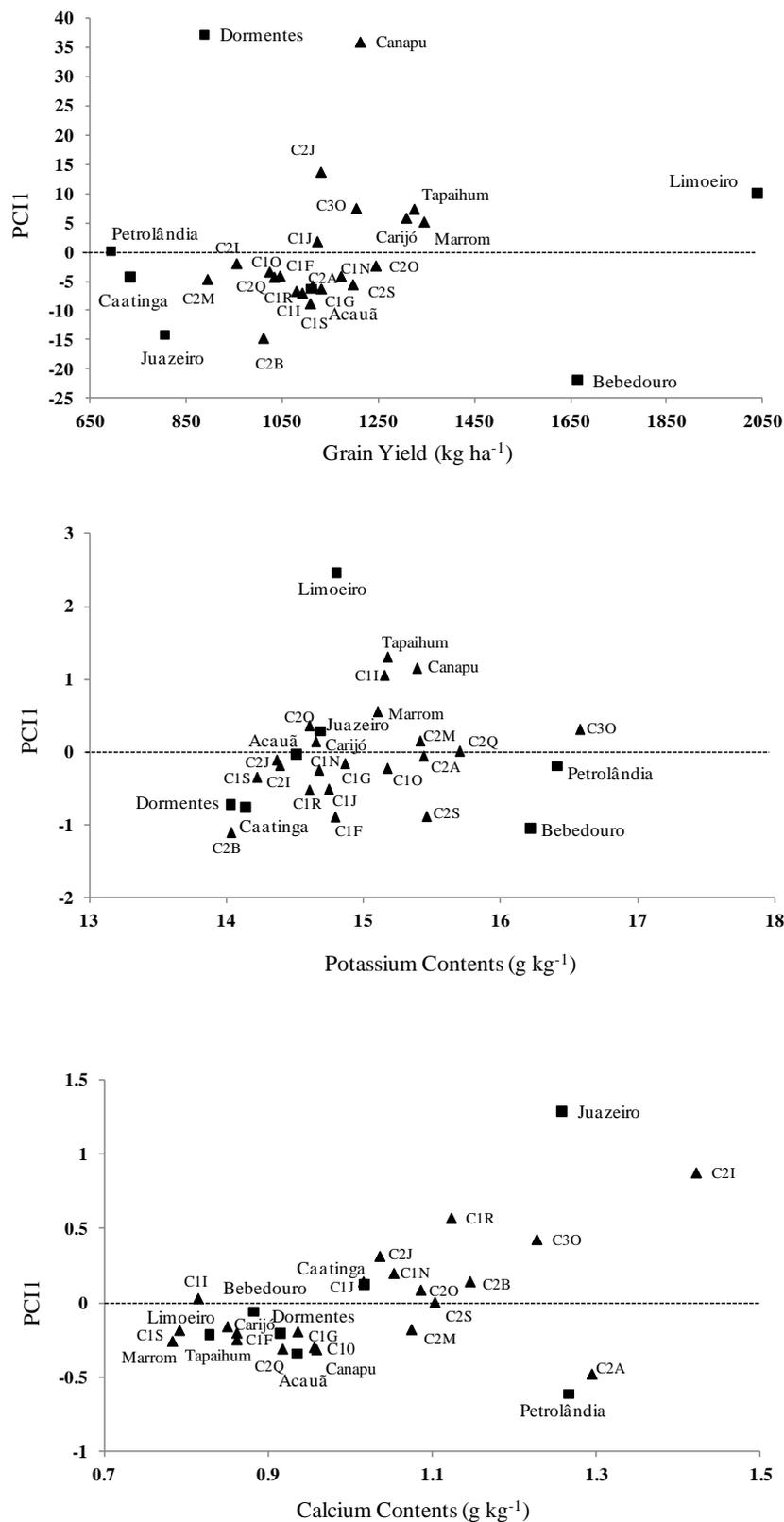


Figura 2. Biplot AMMI para produção de grãos, teores de potássio e cálcio de 17 linhagens e 4 cultivares (▲) de feijão-caupi (*Vigna unguiculata*) de porte ereto e de crescimento determinado em sete ambientes (■) irrigados e de sequeiro.

CAPÍTULO V

RETENÇÃO DE PROTEÍNAS E MINERAIS APÓS A COCÇÃO EM GENÓTIPOS DE FEIJÃO-CAUPI

Artigo - Protein and mineral retention after cooking in cowpea genotypes publicado na Pesquisa Agropecuária Tropical, disponível em: <https://www.revistas.ufg.br/pat/article/view/47261/24410>

RETENÇÃO DE PROTEÍNAS E MINERAIS APÓS A COCÇÃO EM GENÓTIPOS DE FEIJÃO-CAUPI

Danillo Olegario Matos da Silva¹; Carlos Antonio Fernandes Santos²; Sirando Lima Seido³; Washington Carvalho Pacheco Coelho¹; Deisy Aiane Lima de Aquino¹

⁽¹⁾Universidade Estadual de Feira de Santana, Pós-graduação em Recursos Genéticos Vegetais, Feira de Santana, Bahia, Brasil. danilloolegario@hotmail.com, washington_cpc@hotmail.com, deisylima_17@hotmail.com; ⁽²⁾Embrapa Semiárido, Petrolina, Pernambuco, Brasil. carlos-fernandes.santos@embrapa.br; ⁽³⁾Universidade Federal Rural de Pernambuco, Pós-graduação em Melhoramento Genético de Plantas. Recife, Pernambuco, Brasil. siroseido@hotmail.com

RESUMO

O feijão-caupi é uma cultura tolerante ao déficit hídrico, com teores moderados de proteínas e minerais e rápida cocção, requisitos importantes para regiões semiáridas. Objetivou-se avaliar a retenção de proteínas totais e minerais após a cocção, em genótipos de feijão-caupi, a fim de selecionar os que melhor preservem os teores desses nutrientes. Foram avaliados 24 genótipos, sendo dez linhagens, cinco cultivares comerciais e nove variedades mantidas por agricultores. A cocção teve efeito reduzido nos teores de proteína, potássio, cálcio, ferro e zinco, nos grãos de feijão-caupi, com efeitos significativos em poucos genótipos. Foi observada correlação significativa e positiva apenas para produção de grãos x teor de zinco e proteínas x tempo de cocção. A linhagem CPCR3F6L17 obteve alta produtividade de grãos e elevados teores de proteína, potássio, ferro e zinco, após a cocção, mostrando-se promissora para a região estudada.

Palavras-chave: *Vigna unguiculata*; Teor de nutrientes; Processamento térmico.

PROTEIN AND MINERAL RETENTION AFTER COOKING IN COWPEA GENOTYPES

ABSTRACT

Cowpea is a tolerant crop to water deficit, with moderate protein and mineral contents, as well as fast cooking, which are important requirements for semi-arid regions. This study aimed to evaluate the retention of total proteins and minerals after cooking in cowpea genotypes, in order to select those that best preserve these nutrients contents. Twenty-four genotypes were evaluated, being ten lines, five commercial cultivars and nine landraces maintained by farmers. Cooking had a reduced effect on the contents of protein, potassium, calcium, iron and zinc in cowpea grains, with significant effects only in a few genotypes. A significant and positive correlation was observed only for grain yield x zinc content and protein content x cooking time. The line CPCR3F6L17 presented a high grain yield and high levels of protein, potassium, iron and zinc after cooking, showing to be a promising option for the studied region.

Key words: *Vigna unguiculata*; nutrient content; thermal processing.

INTRODUÇÃO

O feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) é cultivado largamente em regiões semiáridas devido a sua tolerância ao estresse hídrico e a baixa fertilidade do solo, sendo capaz de produções de grãos significativas quando comparado com outras leguminosas (Silva et al. 2016). Em muitos países africanos, asiáticos e América do Sul, o feijão-caupi é o principal suprimento da dieta de populações que vivem em regiões semiáridas, tendo grande tradição de consumo (Freire Filho 2011). No semiárido brasileiro, o feijão-caupi tornou-se uma das principais alternativas sociais e econômicas para as populações rurais, e seu cultivo tem se expandido para outras regiões, alcançando novos mercados no país e no exterior (Oliveira et al. 2010).

Por apresentar alta produção de grãos e teores nutricionais mais elevados do que outras culturas tradicionais de pequenos produtores em regiões semiáridas, o feijão-caupi tem sido uma boa opção para compor a dieta de diversas populações. Alguns trabalhos tem demonstrado que o feijão-caupi apresenta uma grande variabilidade na composição química dos grãos o que possibilita a seleção de genótipos com elevado conteúdo nutricional (Santos & Boiteux 2013, Silva et al. 2016, Silva & Santos 2016).

O acúmulo e retenção de alguns minerais são influenciados pela interação de diferentes fatores, tais como: variedades, condições ambientais de cultivo, porção do grão onde se concentra o mineral e sua solubilidade durante a imersão e cocção (Bassinello 2011). Avaliando cinco cultivares de feijão-caupi, quanto a retenção de nutrientes em panelas normais e de pressão, com e sem imersão dos grãos, Pereira et al. (2014) observaram respostas diferentes dos cultivares quanto aos teores de ferro e zinco após a cocção. Em outro estudo, Pereira et al. (2016) avaliaram a bioacessibilidade desses nutrientes e ressaltaram a importância de descobrir a porcentagem real de absorção e estratégias eficientes para que populações de baixa renda tenham acesso a alimentos com altos níveis nutricionais.

Outro fator importante no acúmulo e retenção de alguns minerais são as elevadas concentrações de taninos e fitatos presentes nos grãos. Carvalho et al. (2012) ressaltam que a presença de fitatos e taninos em fibras vegetais pode influenciar negativamente a disponibilidade de ferro e zinco, bem como na cocção do grão. Lazarte et al. (2015) observaram que teores de fitatos promoveram uma diminuição significativa na disponibilidade de cálcio, ferro e zinco, e ressaltam que a imersão e fermentação dos grãos são aconselhados para melhorar a disponibilidade de nutrientes. Hemalatha et al. (2007) observaram que os taninos apresentaram influência não significativa nos teores de ferro e zinco em cereais e leguminosas.

A ausência de proteína e minerais na alimentação tem contribuído negativamente para a saúde pública, afetando quase metade da população mundial, especialmente crianças, adolescentes e mulheres grávidas (Kraemer & Zimmermann 2007). O feijão-caupi apresenta uma grande variabilidade na composição química dos grãos, o que permite a seleção de genótipos com alta concentração nutricional de ferro, zinco, cálcio e potássio. O ferro é requerido em todos os tecidos do corpo para funções celulares básicas (Rios et al. 2011). O zinco é cofator de mais de 300 enzimas, necessárias para o crescimento e desenvolvimento (Shankar & Prasad 1998). O cálcio é essencial para a contração muscular e tem função no sistema nervoso (McDowell 1992). Já o potássio é o terceiro mineral mais abundante no corpo humano e é essencial para a vida humana (COMA 1991).

A Organização Mundial da Agricultura e Alimentação considera o feijão-caupi como uma das melhores opções para o aumento de oferta de proteínas, em razão do baixo custo de produção (Grangeiro et al. 2005). A seleção de novos cultivares de feijão-caupi, com elevados teores de proteína e minerais disponíveis nos grãos, é de grande importância para saúde humana, principalmente na dieta da população de baixo poder aquisitivo, nas regiões semiáridas. Os grãos dessa leguminosa também podem ser cozidos rapidamente, um requisito importante para os que sofrem com escassez de combustível e recursos (Ehlers & Hall 1997). No entanto, a maneira que os nutrientes são aproveitados pelo corpo humano pode ser comprometida devido a diversos fatores. De acordo com Ramírez-Cárdenas et al. (2008) os principais são o alto teor de fatores antinutricionais e o tipo de processamento como o descascamento, imersão e cozimento.

O tempo de cozimento se constitui em um fator importante na escolha de um cultivar, pelos consumidores, devido à economia no tempo de preparo das refeições. Além disso, períodos prolongados de cozimento devem ser evitados, pois podem provocar mudanças estruturais em nível celular, diminuindo a disponibilidade de nutrientes (Pujola et al. 2007).

Mota et al. (2016) avaliaram métodos de cozimento de amaranto, trigo e quinoa, e concluíram que a estimativa da ingestão de minerais deve basear-se em dados obtidos de alimentos cozidos. Estudos do efeito da cocção no teores de proteínas e minerais são limitados para feijão-caupi, com pioneiros trabalhos como de Pereira et al. (2014).

O presente estudo teve como objetivo avaliar a retenção de proteínas totais e minerais após a cocção em genótipos de feijão-caupi a fim de selecionar aqueles que melhor preservem o teor desses nutrientes.

MATERIAL E MÉTODOS

Foram avaliados 24 genótipos de feijão-caupi, sendo dez linhagens da Embrapa Semiárido, cinco cultivares comerciais e nove variedades locais coletadas de agricultores nos municípios de Juazeiro-BA e Petrolina-PE (Tabela 2). Os experimentos foram conduzidos no segundo semestre de 2014-2, no campo experimental de Mandacaru, pertencente a Embrapa Semiárido, em Juazeiro-BA. O delineamento experimental adotado foi o de blocos completos casualizados, com três repetições. As parcelas experimentais apresentaram tamanho de 2,0 m x 3,0 m, com espaçamento entre linhas de 1,0 m e entre plantas de 0,1 m.

A cocção foi realizada com os grãos verdes utilizando o equipamento cozedor de *Mattson*, considerado uma ferramenta rápida e prática, empregada para avaliar o tempo de cozimento de grãos de feijão (Yeung et al. 2009). Foram avaliados grupos de 25 grãos tomados ao acaso de cada tratamento, e três repetições, totalizando 75 grãos. O tempo de cocção, em minutos, foi considerado, quando 23 pinos do cozedor de *Mattson* perfuravam os grãos. O pino do aparelho exerce uma pressão que corresponde a que é exercida pela dona de casa, entre os dedos, para verificar se os grãos estão cozidos. Segundo Proctor & Watts (1987), o tempo de queda de 23 dos 25 pinos, que representa 92% dos grãos cozidos, deve ser usado como valor do tempo de cozimento, pois permite uma aceitável textura para cocção e o

grau de maciez preferido nas análises sensoriais, além de fornecer melhor discriminação entre as amostras.

Sementes cruas e cozidas foram trituradas no moinho MA 630/1 (Marconi, Brasil) para obter uma farinha fina de cada amostra para quantificação de proteínas totais e minerais. A quantificação de proteínas totais em feijão seco foi realizada pelo método químico de Kjeldhal. As farinhas foram analisadas em duplicadas, para cada amostra, de acordo com procedimento padrão da Association of Official Analytical Chemists (AOAC 1995). A percentagem de nitrogênio foi calculada usando a formula: $\% N = 0.14 * \text{fator de correção da solução de HCl} * \text{volume usado para titular HCl}$. A proteína foi determinada multiplicando a percentagem de nitrogênio pelo fator 6.25.

Foram preparados dois extratos de sementes cruas e cozidas para quantificação dos minerais: 1) Extrato A para ferro e zinco. Após o resfriamento dos tubos digestores, acrescentou-se 49 mL de água destilada e deionizada. As amostras para quantificação de Fe e Zn foram levadas para leitura em espectrofotômetro de absorção atômica de chama, marca Varian; e 2) Extrato B para potássio e cálcio. Foi transferido 1mL do extrato A para Becker de 50 mL, devidamente identificado de acordo com o número do protocolo das amostras. Completou-se com 49 mL de óxido lantânio 0,1% e as amostras do extrato B para quantificação do potássio foram levadas para leitura em fotômetro de chama, marca MicroNal, enquanto o cálcio foi determinado em espectrofotômetro de absorção atômica de chama, marca Varian. Os resultados foram expressos em g kg^{-1} para potássio e cálcio, e em mg kg^{-1} para ferro e zinco de matéria seca dos grãos. Todas as análises foram realizadas no laboratório de solos da Embrapa Semiárido.

Análises de variância simples e fatorial foram realizadas utilizando o procedimento GLM do programa computacional SAS (1989), para produção de grãos, tempo de cocção, proteínas totais e minerais. A produção de grãos foi corrigida pelo método da covariância com o stand

de plantas médio das parcelas, como descrito por Vencovsky & Barriga (1992), utilizando o programa SAS (1989). Aplicou-se o teste de agrupamento de Scott & Knott (1974) com 5% de probabilidade para as médias antes e depois da cocção e o teste t-Student para as diferenças entre médias. Os coeficientes de correlação de Pearson foram estimados entre todas as variáveis.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram observadas diferenças entre os genótipos para teores de proteínas totais, potássio, ferro e zinco ($p < 0,01$), indicando que há variabilidade entre os genótipos e que a seleção pode ser praticada possibilitando ganho com a seleção (Tabela 1). Após a cocção, observou-se diferenças para os teores de cálcio, ferro e zinco ($p < 0,05$), sem influência nos teores de proteínas e potássio (Tabela 1). Observou-se interação entre genótipos e efeito da cocção apenas para teores de proteínas totais e zinco ($p < 0,05$), indicando que os genótipos responderam de forma diferenciada a cocção apenas para essas duas variáveis. Segundo Ramírez-Cárdenas et al. (2008), a disponibilidade pode ser comprometida devido ao alto conteúdo de fatores antinutricionais, destacando-se os fitatos, taninos e fibras que influenciam de forma negativa, além do processamento, como o próprio cozimento do grão.

Tabela 1. Quadrado médio para produção, cocção e teores de proteína, potássio, cálcio, ferro e zinco em genótipos de feijão-caupi

Fonte de Variação	GL	Quadrado Médio						
		Produção	Cocção	Proteína	Potássio	Cálcio	Ferro	Zinco
Genótipo (G)	23	356235 ^{ns}	13.7*	8.34**	7.06**	0.04 ^{ns}	102.30**	21.97**
Cocção (C)	1	-	-	0.28 ^{ns}	2.65 ^{ns}	0.52**	90.00*	24.40*
G x C	23	-	-	4.34**	2.40 ^{ns}	0.03 ^{ns}	32.96 ^{ns}	10.00*
Erro	64	212156	6.7	1.79	1.51	0.03	22.33	4.87
CV (%)		26.7	21.3	5.09	10.33	13.34	8.36	6.54
Média				%	g kg ⁻¹		mg kg ⁻¹	
Antes da cocção				26.3	12.1	1.4	57.4	34.5
Depois da cocção				26.2	11.9	1.2	55.7	33.6

** , * , ^{ns} significativo a 1 %, 5 %, e não significativo pelo teste F, respectivamente

Apesar da pouca diferença entre as médias gerais de proteínas totais e minerais, antes e depois da cocção, é possível observar uma pequena redução do conteúdo nutricional dos grãos

de feijão-caupi, sendo mínima para proteínas (0,4%) e mais acentuada para ferro (3,0%) (Tabela 1). Resultados semelhantes foram reportados por ElMaki et al. (2007) avaliando os efeitos da cocção, com e sem imersão, nos teores de minerais e fatores antinutricionais.

Os genótipos diferiram para a produção de grãos ($p < 0.01$), variando de 922,5 kg ha⁻¹ a 2480,8 kg ha⁻¹ entre os genótipos PD8 e PC950409D02E, respectivamente (Tabela 2). Os genótipos diferiram para o tempo de cocção, sendo o menor tempo de 9,6 min observado na linhagem PC950409D02E, e o maior tempo na linhagem C3Q, 16,6 min. (Tabela 2). Possivelmente, o curto tempo de cozimento dos grãos do feijão-caupi proporcionou uma menor redução nos teores nutricionais entre os grãos crus e cozidos.

Tabela 2. Médias de produção, tempo de cocção, diferença entre as médias (DM), proteína, potássio, cálcio, ferro e zinco de 24 genótipos de feijão-caupi avaliados antes (AC) e depois (DC) da cocção.

Tratamento	Produção	Cocção	Proteína (%)			Potássio	Ferro	Zinco (mg kg ⁻¹)		
	kg ha ⁻¹	min	AC	DC	DM	(g kg ⁻¹)	(mg kg ⁻¹)	AC	DC	DM
PD1_Petrolina-PE	2079.6a	13.2b	27.8a	27.7a	NS	11.8b	53.9b	32.5b	34.2a	NS
PD2_Juazeiro-BA	1548.4b	10.7a	23.8b	21.8c	NS	10.6b	55.1b	37.2b	36.1a	NS
PD3_Juazeiro-BA	1676.1b	11.5a	24.7b	25.8b	NS	11.4b	49.8b	32.4b	32.5b	NS
PD4_Juazeiro-BA	1515.1b	11.3a	26.2b	26.9a	NS	15.4 ^a	57.4a	40.2a	35.1a	NS
PD5_Juazeiro-BA	1259.8b	10.9a	24.9b	25.5b	NS	11.1b	54.4b	32.4b	34.6a	*
PD6_Petrolina-PE	2053.5a	10.7a	24.5b	28.4a	*	10.4b	54.2b	30.5b	36.6a	NS
PD7_Petrolina-PE	1640.0b	11.6a	26.5b	26.3b	NS	12.0b	53.9b	35.2b	31.6b	**
PD8_Petrolina-PE	922.5b	14.9b	27.5a	25.6b	NS	11.7b	54.4b	37.1b	36.2a	NS
PD9_Petrolina-PE	1340.3b	10.8a	24.4b	25.2b	NS	11.2b	48.0b	30.3b	30.3c	NS
P209	2316.6a	13.4b	24.8b	26.4b	NS	12.5b	59.4a	41.8a	36.0a	NS
PC951015D01E	2358.7a	11.7a	27.0a	25.7b	**	11.7b	63.0a	34.8b	34.6a	NS
PC950409D02E	2480.8a	9.6a	28.6a	24.5b	NS	13.4a	52.2b	31.7b	32.8b	NS
PC951016D01E	1984.1a	15.0b	24.6b	25.8b	NS	13.9a	53.1b	31.2b	32.8b	NS
CPCR3F6L15	1940.4b	12.1a	26.1b	25.0b	NS	14.0a	69.0a	35.4b	33.9a	NS
CPCR3F6L17	2374.3a	13.9b	30.7a	28.1a	NS	12.5b	60.2a	36.9b	35.0a	NS
C2M	1108.9b	10.9a	28.6a	27.4a	NS	11.0b	52.0b	29.9b	28.7c	NS
C2S	1325.3b	11.9a	23.7b	26.9a	*	10.5b	56.4b	35.8b	31.4b	NS
C1J	1343.1b	11.3a	25.4b	25.5b	NS	12.3b	52.7b	37.7b	29.7c	NS
C3Q	1409.7b	16.6b	26.0b	28.1a	NS	10.5b	60.4a	32.6b	33.0b	NS
BRS Acauã	1440.2b	15.4b	28.3a	28.9a	NS	12.3b	55.8b	34.4b	34.3a	NS
BRS Guariba	1716.6b	14.7b	27.0a	26.1b	NS	11.0b	58.9a	33.1b	34.0a	NS
BRS Marataoã	1764.9b	14.3b	25.0b	26.8a	NS	13.0a	61.3a	35.5b	35.2a	NS
BRS Pujante	1540.1b	11.8a	26.5b	24.2b	NS	11.5b	62.1a	32.9b	32.9b	NS
BRS Rouxinol	1723.3b	13.5b	28.0a	26.0b	NS	11.3b	59.4a	35.3b	33.7a	NS
CV (%)	18.6	21.3	5.4	4.9		10.3	8.36	7.3	5.5	

Valores seguidos da mesma letra, na coluna, pertencem ao mesmo grupo, pelo teste de Scott e Knott (1974) a 5% de probabilidade; **, *, ^{NS} significativo a 1%, 5% ou não significativo respectivamente pelo teste 't'

Os genótipos apresentaram variabilidade para os teores de proteínas ($p < 0,01$), antes e depois da cocção, com média em torno de 26%, sendo os maiores valores observados nos genótipos PD6, CPCR3F6L17, C2M, C2S, C3Q, BRS Acauã e BRS Marataoã (Tabela 2). Os genótipos também apresentaram variabilidade para os teores de potássio ($p < 0,01$), com média em torno de 12 g kg^{-1} , sendo que o genótipo PD4 se destacou com a maior média. Para os teores de cálcio, a variabilidade entre os genótipos, foi não significativa antes da cocção e significativo ($p < 0,05$) após a cocção. Já para os teores de ferro e zinco a variabilidade entre as médias de genótipos antes e após a cocção foram significativas ($p < 0,01$), com médias em torno de $56,5$ e 34 mg kg^{-1} , respectivamente. Destacou-se, com elevado teor de ferro, a linhagem CPCR3F6L15 com média após a cocção de $69,0 \text{ mg kg}^{-1}$, não diferindo das cinco cultivares e dos genótipos PD4, P209, PC951015D01E, CPCR3F6L17 e C3Q (Tabela 2).

Os genótipos não apresentaram diferenças entre as médias antes e após a cocção para o teor de proteínas pelo teste 't', exceto os genótipos PD6, PC951015D01E, PC950409D02E, PD2, PD4, PD8, C3Q e C2S, que apresentaram decréscimo ou acréscimos (Tabela 2). Para o potássio, não se observou efeito da cocção apenas para os genótipos PD4, PC950409D02E, PC951016D01E e CPCR3F6L15 (Tabela 2). Observou-se efeito da cocção apenas o genótipo PD6 e nos genótipos PD7 e PD5, respectivamente, para cálcio e zinco, não tendo sido observado efeito da cocção para ferro em todos os genótipos avaliados (Tabela 2). Diferenças significativas foram reportadas por Mota et al. (2016), avaliando minerais em amaranto, trigo e quinoa, depois da cocção, bem como por Pereira et al. (2016), que avaliaram o efeito de métodos de cozimento nos teores de ferro e zinco em cultivares de feijão-caupi.

Os genótipos que se destacaram, após a cocção, com maior teor de proteína foram os genótipos BRS Acauã, BRS Guariba, BRS Rouxinol, PD1, PD4, PD6, C2M, C2S, C3Q e CPCR3F6L17, com teores variando de 26,8% a 28,1% (Tabela 2). Os maiores teores de potássio foram observados nos genótipos PD4 e na cultivar BRS Marataoã, não diferindo dos

genótipos PC950409D02E, PC951016D01E e CPCR3F6L15, enquanto para ferro e zinco os maiores teores após a cocção foram observados para as linhagens PC951015D01E, CPCR3F6L15 e PD6, respectivamente (Tabela 2). Para cálcio o maior teor após a cocção foi observado na BRS Acauã (Tabela 2).

Entre os nove genótipos de produtores avaliados, somente os genótipos PD1 e PD6, ambos de Petrolina-PE, apresentaram produção de grãos superiores à média geral, além dos teores de proteína, cálcio e zinco, após a cocção, superior a média geral (Tabela 2). As linhagens que se destacaram com produção de grãos elevadas foram a P209, PC951015D01E, PC950409D02E e CPCR3F6L17 apresentando superioridade de 31% em relação ao cultivar mais produtiva, BRS Marataoã, e 36% em relação a média geral do experimento (Tabela 2). A linhagem PC951015D01E apresentou produção de grãos elevada, tendo contudo apresentado redução significativa para teor de proteínas após a cocção (Tabela 2). A linhagem CPCR3F6L17, com a maior produção de grãos entre todos os genótipos avaliados, também apresentou teores nutricionais acima das médias gerais para proteína, potássio, ferro e zinco após a cocção (Tabela 2).

Observou-se correlação significativa e positiva apenas entre produção de grãos e o teor de zinco e entre o teor de proteínas e o tempo de cocção, indicando nessa última correlação aumento do teor de proteínas com o aumento do tempo de cocção (Tabela 3). Santos e Boiteux encontraram correlações entre produção e teor de ferro, avaliando os teores de proteína e minerais em 87 genótipos de feijão-caupi, e não observaram correlação significativa entre o teor de proteína e as outras variáveis avaliadas.

Com exceção da linhagem CPCR3F6L17, que apresentou as maiores médias para produção de grão e teor de proteína, observou-se que as linhagens com os maiores teores nutricionais não foram as mesmas que apresentaram as maiores produções de grãos. Os resultados observados, nesse trabalho, indicam dificuldades para seleção de linhagens que

combinem altas produções de grãos e elevados teores de proteína e minerais. Resultados semelhantes foram reportados por Silva et al. (2016), avaliando teores de proteína total em 44 genótipos de feijão-caupi. Uma alternativa para contornar os limites impostos pela associação entre essas duas variáveis é a seleção de valores intermediários ou acima da média.

Tabela 3. Estimativa de correlação de Pearson entre produção de grãos, cocção e teores de proteína, potássio, cálcio, ferro e zinco de 24 genótipos de feijão-caupi avaliadas após a cocção

	Cocção	Proteína	Potássio	Cálcio	Ferro	Zinco
Produção	0.17 ^{ns}	0.10 ^{ns}	0.17 ^{ns}	0.08 ^{ns}	0.25 ^{ns}	0.52**
Cocção		0.45*	0.09 ^{ns}	0.16 ^{ns}	0.24 ^{ns}	0.26 ^{ns}
Proteína			-0.08 ^{ns}	0.14 ^{ns}	-0.15 ^{ns}	-0.01 ^{ns}
Potássio				-0.14 ^{ns}	0.19 ^{ns}	0.14 ^{ns}
Cálcio					-0.07 ^{ns}	0.19 ^{ns}
Ferro						0.21 ^{ns}

** , * , ^{ns} Significativo a 1%, 5% e não significativo para o teste t.

No Nordeste brasileiro, a produção de feijão-caupi apresentou uma média anual de 426.367 t, com grande superioridade em relação a outras regiões produtoras, mas com a menor média de produtividade, 330 kg ha⁻¹ (Freire Filho 2011). No entanto, essa produtividade não reflete o potencial genético dos cultivares melhorados. No presente estudo foi possível observar que as linhagens CPCR3F6L17, PC951015D01E, PC950409D02E e P209 apresentaram produtividades de grãos acima de 2.300 kg ha⁻¹ (Tabela 2). Na literatura existem relatos de produtividade de grãos de feijão-caupi acima de 3.000 kg ha⁻¹, em condições irrigadas (Bezerra 1997).

A baixa produção, nessa região, é devido, principalmente, a forma de cultivo realizada, predominantemente, por pequenos agricultores, sem adoção de tecnologia, como controle de pragas, doenças e sistema de irrigação apropriado. Observou-se, ainda, que a média da produção de grãos de feijão-caupi dos genótipos dos produtores foi aproximadamente 15% menor que a média das cultivares e linhagens melhoradas (Tabela 2).

A obtenção de cultivares de feijão-caupi produtivas, com baixo tempo de cocção, biofortificadas, com altos teores de proteína e minerais disponíveis, adaptadas aos vários

ambientes de cultivo e que sejam disponibilizadas aos agricultores e consumidores, é cada vez mais necessária. A linhagem CPCR3F6L15 apresentou produtividade de grãos e teores de potássio, cálcio, ferro e zinco acima da média geral. Já a linhagem CPCR3F6L17 apresentou o tempo de cocção um pouco mais alto, porém obteve a alta produtividade de grãos e depois da cocção obteve elevados teores de proteína, potássio, ferro e zinco, destacando-se como a mais promissora para cultivo comercial e que melhor preservou o percentual de disponibilidade desses nutrientes estudados.

CONCLUSÃO

1. A cocção teve efeito reduzido nos teores de proteína, potássio, cálcio, ferro e zinco, nos grãos de feijão-caupi, com efeitos significativos em poucos genótipos.
2. Observou correlação significativa e positiva apenas para produção de grãos x teor de zinco e proteínas x tempo de cocção.
3. A linhagem CPCR3F6L17 obteve alta produtividade de grãos e elevados teores de proteína, potássio, ferro e zinco, após a cocção, mostrando-se promissora para região de Petrolina-PE e Juazeiro-BA.

REFERÊNCIAS

ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS (AOAC). *Official methods of analysis*. Arlington: AOAC, 1995.

BASSINELLO, P. Z. Qualidade nutricional, funcional e tecnológica do feijão. In: KLUTHCOUSKI, J.; STONE, L. F.; AIDAR, H. (Eds.). *Fundamentos para uma agricultura sustentável, com ênfase na cultura do feijoeiro*. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2009.

- BEZERRA, A. A. C. *Variabilidade e diversidade genética em caupi (Vigna unguiculata (L.) Walp.) precoce, de crescimento determinado e porte ereto e semiereto*. 1997. 105 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 1997.
- CARVALHO, L. M. J. et al. Iron and zinc retention in common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) after home cooking. *Food & Nutrition Research*, v. 56, n. 1, p. 1-6, 2012.
- EHLERS, J. D.; HALL, A. E. Cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp.). *Field Crops Research*, v. 53, n. 1-3, p. 187-204, 1997.
- ELMAKI, H. B. et al. Content of antinutritional factors and HCl-extractability of minerals from white bean (*Phaseolus vulgaris*) cultivars: influence of soaking and/or cooking. *Food Chemistry*, v. 100, n. 1, p. 362-368, 2007.
- FREIRE FILHO, F. R. *Feijão-caupi: produção, melhoramento genético, avanços e desafios*. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2011.
- GRANGEIRO, T. B. et al. Composição bioquímica da semente. In: FREIRE FILHO, F. R.; LIMA, J. A. A.; RIBEIRO, V. Q. (Eds.). *Feijão-caupi: avanços tecnológicos*. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2005. p. 338-365.
- HEMALATHA, S.; PLATEL, K.; KRISHNAPURA, S. Influence of heat processing on the bioaccessibility of zinc and iron from cereals and pulses consumed in India. *Trace Elements in Medicine and Biology*, v. 21, n. 1, p. 1-7, 2007.
- KRAEMER, K.; ZIMMERMANN, M. B. *Nutritional anemia*. Basel: Sight and Life Press, 2007.
- LAZARTE, C. E. et al. Phytate, zinc, iron and calcium content of common Bolivian food, and implications for mineral bioavailability. *Journal of Food Composition and Analysis*, v. 39, n. 1, p. 111-119, 2015.

- MCDOWELL, L. R. *Minerals in animal and human nutrition*. San Diego: Academic Press, 1992.
- MOTA, C. et al. The effect of cooking methods on the mineral content of quinoa (*Chenopodium quinoa*), amaranth (*Amaranthus* sp.) and buckwheat (*Fagopyrum esculentum*). *Journal of Food Composition and Analysis*, v. 49, n. 1, p. 57-64, 2016.
- OLIVEIRA, O. M. S. et al. Período de convivência das plantas daninhas com cultivares de feijão-caupi em várzea no Amazonas. *Planta daninha*, v. 28, n. 3, p. 523-530, 2010.
- PEREIRA, E. J. et al. Effects of cooking methods on the iron and zinc contents in cowpea (*Vigna unguiculata*) to combat nutritional deficiencies in Brazil. *Food & Nutrition Research*, v. 58, n. 1, p. 1-7, 2014.
- PEREIRA, E. J. et al. Effect of different home-cooking methods on the bioaccessibility of zinc and iron in conventionally bred cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp) consumed in Brazil. *Food & Nutrition Research*, v. 60, n. 1, p. 1-6, 2016.
- PROCTOR, J. R.; WATTS, B. M. Development of a modified Mattson bean cooker procedure based on sensory panel cookability evaluation. *Canadian Institute of Food Science and Technology*, v. 20, n. 1, p. 9-14, 1987.
- PUJOLA, M.; FARRERAS, A.; CASAÑAS, F. Protein and starch content of raw, soaked and cooked beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Food Chemistry*, v. 102, n. 4, p. 1034-1041, 2007.
- RAMÍREZ-CÁRDENAS L.; LEONEL, A. J.; COSTA, N. M. B. Efeito do processamento doméstico sobre o teor de nutrientes e de fatores antinutricionais de diferentes cultivares de feijão comum. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, v. 28, n. 1, p. 200-213, 2008.
- RIOS, S. A. et al. Deficiências nutricionais e a biofortificação de alimentos. In: BORÉM, A.; RIOS, S. A. (Eds.). *Milho biofortificado*. Visconde do Rio Branco: Suprema, 2011.
- SANTOS, C. A. F.; BOITEUX, L. S. Breeding biofortified cowpea lines for semi-arid tropical areas by combining higher seed protein and mineral levels, v. 12, n. 4, p. 6782-

6789, 2013.

SAS INSTITUTE INC. *SAS/STAT user's guide*. Version 6. Cary: SAS Institute Inc., 1989.

SHANKAR, A. H.; PRASAD, A. S. Zinc and immune function: the biological basis of altered resistance to infection. *American Journal of Clinical Nutrition*, v. 68, n. 2, p. 475-635, 1998.

SILVA, D. O. M.; SANTOS, C. A. F. Adaptability and stability parameters for potassium and calcium contents and grain yield in cowpea lines. *African Journal of Agricultural Research*, v. 11, n. 36, p. 3366-3374, 2016.

SILVA, D. O. M.; SANTOS, C. A. F. Adaptability and stability parameters of iron and zinc concentrations and grain yield in cowpea lines in the Brazilian semiarid region. *Crop Science*, v. 57, n. 1, p. 1-10, 2017.

SILVA, D. O. M.; SANTOS, C. A. F.; BOITEUX, L. S. Adaptability and stability parameters of total seed yield and protein content in cowpea (*Vigna unguiculata*) genotypes subjected to semi-arid conditions. *Australian Journal of Crop Science*, v. 10, n. 8, p. 1164-1169, 2016.

UNITED KINGDOM. Department of Health. Committee on Medical Aspects of Food Policy. *Dietary reference values for food energy and nutrients for the United Kingdom*. London: HMSO, 1991.

VENCOVSKY, R.; BARRIGA, P. *Genética biométrica no fitomelhoramento*. Ribeirão Preto: Sociedade Brasileira de Genética, 1992.

YEUNG, H. et al. Rapid screening methods to evaluate cowpea cooking characteristics. *Field Crops Research*, v. 112, n. 2-3, p. 245-252, 2009.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A seleção de cultivares superiores de feijão-caupi, combinando alto potencial produtivo, altos teores de proteína, minerais e boa adaptabilidade e estabilidade, em diferentes condições ambientais, terá um enorme impacto positivo para as populações de regiões semiáridas, onde parte da população não tem recursos financeiros para aquisição de alimentos.

O programa de melhoramento genético de feijão-caupi da Embrapa Semiárido tem realizado pesquisas em diferentes áreas, desde 1996. Durante esse período foram publicados diversos relatórios técnicos, dissertações, monografias e trabalhos científicos em revistas nacionais e estrangeiras. Além disso, cultivares foram lançados para a região semiárida e os resultados obtidos nessa Tese contribuíram para a recomendação de duas novas cultivares, associando alta produção com elevados teores de proteína e minerais.

Foram realizados ensaios de distinguibilidade, homogeneidade e estabilidade (DHE) para as linhagens C1J e C2S e atualmente os dados desses genótipos estão disponíveis no Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) em Registro Nacional de Cultivares (RNC) com os nomes de BRS Abiru e BRS Batarra, respectivamente. Os outros genótipos avaliados, no presente estudo, estão armazenados no banco de germoplasma da Embrapa Semiárido onde poderão ser utilizados em trabalhos futuros, buscando sempre melhorar a qualidade nutricional dos grãos de feijão-caupi.

Foi observado nos resultados do trabalho dificuldades para seleção de linhagens que combinem altas produções de grãos e elevados teores de proteínas e minerais, pois as linhagens que apresentaram os maiores teores nutricionais não foram as mesmas que apresentaram as maiores produções de grãos. A seleção para valores intermediários ou acima da média dos experimentos para produção de grãos e teores nutricionais foi a alternativa utilizada para contornar os limites impostos pela associação entre essas variáveis.

Outra alternativa, é a realização de novos cruzamentos entre acessos que se destacaram individualmente para um ou mais nutrientes bem como para produção de grãos. As linhagens C2M e C2I apresentaram teores de proteínas em torno de 30%, teores de ferro e zinco próximo de 70 e 40 mg kg⁻¹, respectivamente, boa adaptabilidade e estabilidade para os ambientes avaliados, porém com baixa produção de grãos. Essas linhagens podem ser usadas em retrocruzamentos com as novas cultivares BRS Abiru e BRS Batarra, buscando a elevação simultânea da produção de grãos, proteínas e minerais.

A Ingestão Diária Recomendada (IDR) é a quantidade de proteína, vitaminas e minerais que deve ser consumida diariamente para atender às necessidades nutricionais da maior parte dos indivíduos. Considerando a necessidade diária de ingestão de ferro e zinco para uma criança, adulto ou gestante, o consumo de 50g de grãos dos genótipos destacados no presente estudo seria suficiente para suprir essa necessidade. Porém, para o teor de proteína, a necessidade diária de uma criança, adulto e gestante é de 34, 50 e 71%, respectivamente (FAO, 2001). Para suprir a Ingestão Diária Recomendada de uma gestante seria necessária um consumo superior a 250g do genótipo que apresentou o maior teor de proteína no presente estudo. Portanto, novas pesquisas devem ser realizadas objetivando a elevação dos teores de proteínas totais nos grãos de feijão-caupi.

Uma linha de pesquisa que poderá ser realizada no programa de melhoramento genético é a avaliação de fatores antinutricionais. A maneira que os nutrientes são aproveitados pelo corpo humano pode ser comprometida devido aos fatores antinutricionais presentes nos grãos. A presença dessas substâncias inibem a utilização dos nutrientes pelo organismo. Estes compostos podem atuar direta ou indiretamente na formação de substâncias inibidoras, tóxicas ou contaminantes que provocam efeito contrário em relação à função de certos nutrientes quando incorporados à dieta alimentar

Entre os principais fatores antinutricionais nos grãos do feijão-caupi, destacam-se os fitatos, taninos, estaquiase e rafinose. Os fitatos e taninos são antinutrientes que apresentam efeito negativo na biodisponibilidade de minerais devido sua capacidade de formar complexos insolúveis reduzindo a biodisponibilidade das proteínas e minerais. Já a rafinose e estaquiase presente nos grãos são os principais causadores das flatulências, náuseas, desconforto e diarreia após o consumo do feijão-caupi.

Na literatura não existem relatos sobre a avaliação de parâmetros de adaptabilidade e estabilidade relacionados aos fatores antinutricionais em feijão-caupi. Devido a importância que o feijão representa na dieta da população brasileira, pela qualidade nutricional apresentada e a necessidade de que grupos de baixa renda tenham acesso a alimentos com elevados teores de proteínas e minerais associados aos baixos teores de fatores antinutricionais, tornam o consumo de feijão-caupi um importante aliado no combate às deficiências nutricionais.

O mapeamento de regiões cromossômicas associados com teores de proteínas e minerais é outra linha de pesquisa que poderia ser implementada, de forma a aplicar a seleção assistida por marcadores, acelerando o desenvolvimento de novos cultivares de feijão-caupi. Diferente de outras culturas, a identificação de marcadores de DNA associados com características de

herança complexa, como teor de proteínas e minerais, o desenvolvimento de mapas de ligações genéticas e estudos de quantitative trait loci (QTL) no feijão-caupi são bastante limitados. Os poucos estudos que existem são reportados por pesquisadores estrangeiros considerando aspectos de genética e melhoramento diferentes dos demandados para a região semiárida.

A aplicação de algumas ferramentas da biologia molecular poderá acelerar bastante os estudos de genética e melhoramento do feijão-caupi e investigações bioquímicas em novas cultivares devem ser incentivadas, assim como a busca de grãos que apresentem melhores características nutricionais, visando melhorar a qualidade e o aproveitamento nutricional, além das características agronômicas.

As principais conclusões obtidas nessa Tese estão relacionadas com:

- O método AMMI é o mais indicado para estimativas de parâmetros de adaptabilidade e estabilidade, devido à disposição gráfica tanto dos genótipos quanto dos ambientes.
- A utilização de métodos para estimativas de parâmetros de adaptabilidade e estabilidade que apresentam elevada correlação, como nos casos de Plaisted e Peterson e Wricke e os métodos de Annicchiarico e Lin e Binns que mostram forte associação e produzem classificações genotípicas similares, não é recomendado. O uso de um deles em combinação com o de Eberhart e Russell ou AMMI pode agregar informação à análise de estabilidade.
- As linhagens que apresentaram os maiores teores de proteína e minerais apresentaram produções de grãos abaixo da média geral.
- As linhagens C3Q, C3M, C2S e C1J apresentaram produções de grãos igual ou superior a média geral dos experimentos e média de 27% de proteína.
- A linhagem C4I e T16_2R apresentou produção de grãos igual ou superior a média geral dos experimentos, com valores médios de ferro e zinco 15% superiores aos valores dos cultivares avaliados.
- As linhagens C4I e C3O mostraram rendimento de grãos igual ou maior do que a média geral, com teores de potássio e cálcio mais elevados do que os valores dos cultivares avaliados.
- Todas as linhagens citadas anteriormente apresentaram ampla adaptabilidade e boa estabilidade na série de ambientes avaliados mostrando grande potencial para

serem lançadas como novos cultivares para o semiárido brasileiro.

- A cocção teve efeito reduzido nos teores de proteína, potássio, cálcio, ferro e zinco, nos grãos de feijão-caupi, com efeitos significativos em poucos genótipos.
- Observou correlação significativa e positiva apenas para produção de grãos x teor de zinco e proteínas x tempo de cocção.
- A linhagem CPCR3F6L17 obteve alta produtividade de grãos e elevados teores de proteína, potássio, ferro e zinco, após a cocção, mostrando-se promissora para região de Petrolina-PE e Juazeiro-BA.

Adaptability and stability parameters of total seed yield and protein content in cowpea (*Vigna unguiculata*) genotypes subjected to semi-arid conditionsDanillo Olegario Matos da Silva^{1*}, Carlos Antonio Fernandes Santos², Leonardo Silva Boiteux³¹Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS), Programa de Pós-graduação em Recursos Genéticos Vegetais, Avenida Transnordestina, SN, Novo Horizonte, 44.036-900, Feira de Santana-BA, Brazil²Embrapa Semiárido, CP 23, CEP 56302-970, Petrolina-PE, Brasil³Embrapa Hortaliças, CP 218, CEP 70351-970, Brasília-DF, Brasil

*Corresponding author: danilloolegario@hotmail.com

Abstract

The selection of superior cultivars through the combination of high yield and protein content cowpea seeds in semi-arid tropical regions have a huge positive impact on the production-market chains in places where there is short availability of protein sources for human consumption. The main aim of the present study is to estimate the adaptability and stability parameters of total seed yield and protein content in cowpea genotypes in order to release new cultivars by combining these value-added traits. Forty-four inbred lines and cultivars were assessed under seven different environmental conditions, either rain-fed or irrigated crop management, in seven sites the Brazilian semi-arid region. The seed protein content was quantified through the Kjeldahl method. Grain yield was adjusted in mean of plant per plot by the covariance method. Statistically significant differences in the genotype as well as in the genotype×environment interaction were observed in all the assays. The inbred lines presenting the highest protein contents showed the lowest grain yields, and it indicated the prominent “phenotypic cost” of protein in overall cowpea seed production. However, the breakage between the herein assessed association was observed in inbred lines subgroups such as ‘C3Q’, ‘C3M’, ‘C2S’, and ‘CIJ’. These lines showed yield close to or above 1050 kg/ha and mean protein content of 27%, as well as good adaptability and stability in different environments, as it was simultaneously indicated through two methodologies. Therefore, these inbred lines may represent a potential elite germplasm in cowpea breeding programs and/or in the releasing of new cultivars adapted to the semi-arid region.

Keywords: Genotype-environment interaction; human nutrition; nutritional value; Semi-arid tropics; *Vigna unguiculata*.**Abbreviations:** DSUG_Genotypes with determinate and semi upright growth; ISCG_Genotypes with indeterminate and semi-climbing growth; G×E_Genotype ×environment interaction; WHO_World health organization.**Introduction**

Cowpea [*Vigna unguiculata* (L.) Walp.] is a strategic pulse crop in semi-arid tropical regions, mainly in geographic sites where there is lack of alternative protein sources to local human populations, due to its natural ability to withstand water stress and to the protein content in its seeds (Vasconcelos et al., 2010). In addition, cowpea seeds are also a rich source of calories as well as of essential minerals and vitamins (Iqbal et al., 2006; Santos and Boiteux, 2015). The total seed protein content range in unimproved cowpea germplasm is of approximately 22 to 25% (Boukar et al., 2011). Breeding activities focused on incrementing total seed protein content allow developing cowpea cultivars that reach total seed protein content of up to 30% (Singh, 2007). More recently, transgressive segregating cowpea lines showing mean protein value of 34% were identified in progenies derived from a series of contrasting crosses (Santos et al., 2012). The total soybean seed protein value (which is the major agricultural dietary protein source) is of approximately 40% (Iqbal et al., 2006).

According to FAO (2014), it is estimated that approximately 805 million people were chronically undernourished between 2012 and 2014 and that they did not have access to the daily protein and carbohydrate intake recommended by the Health World Organization (WHO).

Supplementing the diet with plant proteins is an alternative to improve the human nutritional status, since the adequate provision level of animal origin proteins is either difficult to achieve or very expensive to afford in some vulnerable geographic regions (Iqbal et al., 2006). Many plant breeding programs have expanded their goals through the combination of yield increase and crop nutritional factor improvement in order to address the challenge of diminishing human malnutrition and the chronic diseases associated to it (Sands et al., 2009). According to Santos and Boiteux (2013), the development of cowpea cultivars to achieve higher seed protein and mineral contents, as well as superior agronomic performance, may represent an important contribution to poor human nutrition diminishing in semi-arid regions.

Overall, adaptability is the capacity a given genotype has to take advantage of a given set of environmental conditions, whereas stability is the ability it has to show highly predictable performance even under quite distinct environmental conditions (Cruz and Regazzi, 1994). The genotype × environment interaction (G×E) estimates are very important information pieces to breeding programs throughout the selection of high-yield and nutritionally improved cultivars. The significant G×E interaction may due to inconsistent genotype performance if such interaction is

assessed under different environmental conditions. It impairs the releasing of new stable cultivars. The sound statistical methodologies are the most recommended approaches to estimate G×E interaction and to identify cultivars that present higher adaptability and stability levels (Becker and Leon, 1988; Huehn, 1990a; 1990b; Cruz and Regazzi, 1994; Flores et al., 1998). It is worth analyzing G×E interactions whenever they are found, as well as using the results to assess the potential strong adaptability of the studied inbred lines and cultivars (Kang, 1998). A wide range of biometrical methods used to estimate the phenotypic stability and to analyze G×E interactions has been proposed (Becker and Leon, 1988; Flores et al., 1998). The yield stability and adaptability of cowpea have been investigated through linear regression analyses (Mano, 2009; Nunes, 2014), as it was described by Eberhart and Russel (1966), as well as through nonparametric analyses such as those described by Lin and Binns (1988). On the other hand, studies estimating the adaptability and stability parameters of cowpea protein content are not available in the literature. Balesevic-Tubic et al. (2011) reported greater protein content variation in soybeans than grain yield in a set of genotypes assessed in six different environments. Arslanoglu et al. (2011) also reported significant G×E interaction in the protein content of eight soybean cultivars, but they did not estimate the adaptability and stability parameters.

The selection of superior cultivars through the combination of high seed yield potential and protein content, and its strong adaptability and stability under different environmental conditions will have a huge positive impact on the cowpea production-market chains in the semi-arid tropics. Accordingly, the main aim of the present study is to estimate the adaptability and stability parameters of total seed yield and protein content in cowpea genotypes in order to release new cultivars through the combination of these value-added attributes.

Results

Environment assessments

Significant differences between mean square grain yield and protein content treatments were observed in all the experiments, except for the grain yield in Acauá (Piauí State), Juazeiro (Bahia State) and Petrolândia (Pernambuco State) in the DSGU trials (Table 1). The trial assessments under in-farm conditions in Acauá-PI, Dormentes-PE, Limoeiro-CE, and Petrolândia-PE did not interfere in the assessment, since the variation coefficient of these trials was lower than 40% (Table 1). These in-farm assays also made it possible analyzing the genotypes under contrasting crop management conditions. The highest yields were observed under the environmental conditions found in Limoeiro-CE (Table 1) and it indicated that some lines have the potential to achieve yield greater than 3,000 Kg/ha when more technological crop management systems are adopted. The range between the greatest and the lowest mean square errors in the ISCG and DSUG experiments was lower than seven, thus indicating error variance homogeneity and matching conditions to pool data from all the assays and to analyze them in a factorial experimental design (Cruz and Regazzi, 1994).

The mean yield in irrigated trials were 84% and 45% greater than that estimated in the ISCG and DSUG rain-fed trials, respectively (Table 1). The present results meet those from previous studies reported by Santos et al. (2008). The mean protein seed values were very similar either under irrigated or rain-fed conditions (Table 1).

Adaptability and phenotypic stability parameters of grain yield and protein content in cowpea genotypes

The 'BRS Acauá' cultivars, which belong to the ISCG subgroup, as well as the 'BRS Canjô' and 'BRS Tapaihum' cultivars, in the DSUG subgroup, showed the highest grain yield (Tables 2 and 3). These cultivars were previously assessed in the same set of locations, in the present study (except for Limoeiro), and exclusively selected through grain yield and earliness (Santos et al., 2008). The 'C3R' and 'C3B' lines in the ISCG experiment showed grain yield similar to that of the control 'BRS Acauá' cultivar, and good adaptability and stability parameters, according to the methodologies by Eberhart and Russell (1966) and Lin and Binns (1988) (Table 2). The 'C2O' line, which belongs to the DSUG subgroup, also showed grain yield close to that of the control 'BRS Canjô' and 'BRS Tapaihum' cultivars, as well as good adaptability and stability parameters, according to both analytical methodologies herein employed (Table 3).

The lowest protein content mean values (approximately 25%) were observed in Juazeiro-BA and Petrolândia-PE, and they suggested poor soil fertility and/or the absence of native *Rhizobium* strains. Such strains could increase nitrogen availability and, consequently, increase the overall seed protein content (Marinho et al., 2014). The inbred 'C2R', 'C3S', and 'C3F' (in the ISCG subgroup) and the 'C2M' and 'C2I' (in the DSUG subgroup) lines presented approximate mean protein value of 30% (Tables 2 and 3), which was greater than those of the control 'BRS Acauá', 'BRS Canjô', 'BRS Tapaihum', and 'Canapu' cultivars (a landrace widespread cultivation in the Brazilian semi-arid region). The inbred lines presenting the highest protein contents showed the lowest grain yields in the ISCG and DSUG experiments, as general rule (Tables 2 and 3). For example, the 'C2M' and 'C2I' lines showed the lowest yields. Such results suggest the prominent "phenotypic cost" of protein trait in overall cowpea seed production, thus indicating that the selection of cultivars through the combination of high yield and protein contents will not be a straightforward task. However, the breakage of the herein assessed association was observed in a subgroup of genotypes. The 'C2R', 'C3S', 'C3F' and 'C2I' lines showed good adaptability and stability parameters of protein content, according to the methodologies by Eberhart and Russell (1966) and Lin and Binns (1988).

Discussion

The recommendation for crop cultivars presenting good adaptability and stability is essential in countries comprising diverse agro-ecological regions, distinct crop management systems and well-defined climatic seasons. Accordingly, knowledge about the G×E interaction is necessary to estimate the different responses of cultivars/lines to a wide range of conditions (Becker and Leon, 1988; Simmonds, 1991; Cruz and Regazzi, 1994). Legume crops (such as cowpea) provide a daily protein intake alternative to many populations in semi-arid regions given the high cost and/or the low availability of animal protein (Iqbal et al., 2006). Cowpea seeds are featured by protein levels higher than those of other drought-adapted crops such as cassava, sweet potato, and sorghum, which are traditionally grown by subsistence farmers in semi-arid regions worldwide (Jager, 2013). Boukar et al. (2011) reported greater amino acid/protein content variability in cowpea, and Santos et al. (2012) indicated that, the seed protein content in cowpea could be improved through the standard breeding methods, which are largely

Table 1. Site of evaluation, crop management conditions, coefficient of variation (CV), grain yield/production mean (MP) (kg ha⁻¹), protein mean content (MPr) (%), error mean square (EMS) and treatment mean square (TMS) of seven trials involving 21 cowpea genotypes of indeterminate and semi-climbing growth (ISCG) habit at a plant population density of 100,000 plants/ha and 23 genotypes of determinate and semi upright growth (DSUG) habit at a plant population density of 200,000 plants/ha. These assays were carried out in seven environmental conditions across four States (Piauí-PI; Pernambuco-PE; Bahia-BA, and Ceará-CE) of the Brazilian semi-arid region.

Location	Crop management conditions/Year	CV (%)	Grain yield average (kg ha ⁻¹)			Protein content average (%)		
			MP	EMS	TMS	MPr	EMS	TMS
ISCG genotypes								
Acauá-PI	Rain-fed/2011	30	684	42345	87189**	26.8	0.87	8.6**
Petrolina-PE	Irrigate d/2011	18	1322	57712	306194**	27.9	0.31	6.0**
Petrolina-PE	Rain-fed/2011	24	727	32140	90050**	27.6	1.04	9.6**
Dormentes-PE	Rain-fed/2011	36	689	60272	355248**	27.4	0.76	7.3**
Limoeiro-CE	Irrigated/2010	15	2192	114883	278797**	27.2	0.16	7.3**
Juazeiro-BA	Irrigate d/2011	43	729	97575	202060*	24.9	0.86	8.6**
Petrolândia-PE	Irrigate d/2011	32	897	81818	259048**	25.1	0.33	9.3**
Irrigated Mean	-	-	1285	-	-	26.3	-	-
Rain-fed Mean	-	-	700	-	-	27.3	-	-
DSUG genotypes								
Acauá-PI	Rain-fed/2011	26	1087	78306	86308 ^{NS}	26.8	1.37	8.0**
Petrolina-PE	Irrigate d/2011	15	1697	62900	121491*	26.7	0.43	9.3**
Petrolina-PE	Rain-fed/2011	23	734	28273	52592*	27.4	0.6	7.7**
Dormentes-PE	Rain-fed/2011	31	887	75526	653413**	27.4	1.34	8.2**
Limoeiro-CE	Irrigated/2010	15	2057	102030	398371**	26.7	0.24	7.3**
Juazeiro-BA	Irrigate d/2011	36	806	83516	116106 ^{NS}	24.5	1.24	5.9**
Petrolândia-PE	Irrigate d/2011	38	692	71214	98114 ^{NS}	24.8	0.28	11.8**
Irrigated Mean	-	-	1313	-	-	25.7	-	-
Rain-fed Mean	-	-	903	-	-	27.2	-	-

** , * , ^{NS} Significant at 1%, 5% and non-significant by F test.

Table 2. Estimates of adaptability and phenotypic stability parameters for grain yield and protein content of 23 cowpea genotypes with indeterminate and semi-climbing growth habit employing the Eberhart and Russell (1966) and Lin and Binns (1988) methodologies. These assays were carried out in seven environmental conditions across four States (Piauí-PI; Pernambuco-PE; Bahia-BA, and Ceará-CE) of the Brazilian semi-arid region with a plant population density of 100,000 plants/ha.

Genotypes	Grain Yield						Protein content					
	Mean (kg/ha)	Eberhart and Russell		Lin and Binns			Mean (%)	Eberhart and Russell		Lin and Binns		
		β_1	σ^2_{di}	$P_{i,gen}$	$P_{i,env}$	$P_{i,unfenv}$		β_1	σ^2_{di}	$P_{i,gen}$	$P_{i,env}$	$P_{i,unfenv}$
01-C2R	886	1.3*	37767*	344349	341302	260596	30.1	1.2 ^{NS}	0.07 ^{NS}	0.02	.	0.07
02-C3S	904	1.0 ^{NS}	16770 ^{NS}	305069	256547	195908	29.0	0.9 ^{NS}	-0.06 ^{NS}	0.71	0.82	0.41
08-C3F	883	0.8 ^{NS}	1281 ^{NS}	315024	448315	345567	28.7	0.7*	0.59**	1.59	2.00	0.55
06-C6P	1013	0.9 ^{NS}	-2161 ^{NS}	224767	237240	190859	27.6	1.1 ^{NS}	0.27*	3.39	3.49	3.14
18-C1V	1019	1.2 ^{NS}	64770**	243650	363006	284308	27.6	1.0 ^{NS}	0.70**	3.89	3.83	4.04
04-C3Q	1021	1.2 ^{NS}	40905*	219184	115656	116089	27.3	1.2 ^{NS}	-0.00 ^{NS}	4.23	3.98	4.87
10-C2C	968	1.3*	29413 ^{NS}	287946	245638	194252	27.3	0.8 ^{NS}	0.02 ^{NS}	4.43	5.02	2.97
07-C1M	959	1.4**	58313**	301820	345600	268625	27.1	0.8 ^{NS}	0.06 ^{NS}	4.72	5.23	3.44
03-C3M	1150	0.9 ^{NS}	-10959 ^{NS}	152055	178216	145716	27.0	1.3*	0.91**	5.2	4.54	6.88
20-T16-2R	1171	1.0 ^{NS}	69547**	131728	96759	100742	27.0	0.6*	0.88**	5.44	6.32	3.24
09-C3L	950	1.0 ^{NS}	-22570 ^{NS}	249086	270084	199241	27.0	1.3*	0.77**	5.62	4.85	7.55
11-C1T	901	1.1 ^{NS}	50964*	331871	342600	261708	26.8	0.8 ^{NS}	0.44**	6.11	6.65	4.74
05-C3B	1214	0.9 ^{NS}	21638 ^{NS}	144688	201687	186056	26.7	0.9 ^{NS}	0.26*	6.22	6.69	5.0
13-C4G	1023	0.7*	27058 ^{NS}	251814	383246	304870	26.6	0.9 ^{NS}	0.35*	6.62	7.28	4.99
14-C6A	883	0.8 ^{NS}	30778*	310255	414330	327579	26.4	1.2 ^{NS}	-0.07 ^{NS}	6.97	6.54	8.05
15-C2T	934	0.9 ^{NS}	6603 ^{NS}	293622	333083	250318	26.3	1.2 ^{NS}	0.15 ^{NS}	7.73	6.92	9.78
22-BRSPujante	1050	0.8 ^{NS}	185586**	226464	315477	240687	26.1	0.1**	0.95**	9.80	11.86	4.63
19-C4I	1102	1.0 ^{NS}	-4448 ^{NS}	171894	136489	121888	26.0	1.4**	0.61**	10.57	9.38	13.57
16-C3P	1055	0.7*	27301 ^{NS}	239393	352244	277838	25.2	1.7**	0.13 ^{NS}	12.75	10.39	18.65
17-C6D	990	0.9 ^{NS}	43453*	256330	271362	219778	25.0	1.6**	0.94**	14.12	12.13	19.10
21-BRSAcauá	1341	1.0 ^{NS}	112508**	63731	60427	65052	24.6	1.0 ^{NS}	0.56**	15.79	16.08	15.07
23-Canapu	1154	0.5**	175495**	184265	393071	324478	24.3	0.3**	0.49**	18.05	20.28	12.47
12-C3R	1228	0.8 ^{NS}	-6056 ^{NS}	125105	147645	141590	24.1	0.6*	0.57**	18.43	20.56	13.11
Overall Mean			1034						26.7			
MS G*E			209439**						2.1**			

** , * , ^{NS} Significant at 1%, 5% and non-significant by 't' tests.

Table 3. Estimations of adaptability and phenotypic stability parameters for grain yield and protein content of 21 cowpea genotypes of determinate and semi upright growth using the Eberhart and Russell (1966) and Lin and Binns (1988) methodologies. These assays were carried out in seven environmental conditions across four States (Piauí-PI; Pernambuco-PE; Bahia-BA, and Ceará-CE) of the Brazilian semi-arid region with a plant population density of 200,000 plants/ha.

Genotypes	Grain yield						Protein content					
	Mean (kg/ha)	Eberhart and Russell		Lin and Binns			Mean (%)	Eberhart and Russell		Lin and Binns		
		β_1	σ^2_{di}	P_{i-gen}	P_{i-env}	$P_{i-runenv}$		β_1	σ^2_{di}	P_{i-gen}	P_{i-env}	$P_{i-runenv}$
17-C2M	893	0.9 ^{NS}	-35771 ^{NS}	479205	460190	486811	30.9	0.2**	-0.12 ^{NS}	0.06	0.08	.
04-C2I	953	0.9 ^{NS}	-53143 ^{NS}	404583	403348	405077	29.5	1.3 ^{NS}	0.23 ^{NS}	1.91	0.67	5.02
11-C2S	1196	0.9 ^{NS}	-45261 ^{NS}	276386	212120	302092	27.3	1.1 ^{NS}	0.02 ^{NS}	7.56	5.45	12.85
08-C1J	1121	1.0 ^{NS}	-38895 ^{NS}	249457	210761	264935	27.1	0.8 ^{NS}	-0.05 ^{NS}	8.50	7.63	10.67
02-C1R	1044	0.9 ^{NS}	-35616 ^{NS}	372225	284631	407263	26.9	1.1 ^{NS}	-0.21 ^{NS}	9.21	6.57	15.81
16-C1I	1078	0.8 ^{NS}	-26876 ^{NS}	353772	424630	325429	26.7	1.2 ^{NS}	-0.52 ^{NS}	10.28	7.42	17.43
06-C1S	1107	0.9 ^{NS}	-28073 ^{NS}	344578	283321	369081	26.5	0.9 ^{NS}	-0.43 ^{NS}	10.53	8.55	15.50
03-C3O	1203	0.4*	-5183 ^{NS}	235209	479624	137443	26.4	1.4 ^{NS}	0.05 ^{NS}	11.92	7.81	22.19
01-C1N	1171	1.2 ^{NS}	-55352 ^{NS}	269488	110202	333203	26.0	1.2 ^{NS}	-0.43 ^{NS}	13.44	10.20	21.54
09-C1F	1111	1.1 ^{NS}	-45872 ^{NS}	322260	169606	383321	26.0	1.1 ^{NS}	1.55**	14.31	11.72	20.78
12-C2B	1009	0.6 ^{NS}	71955 ^{NS}	496665	706628	412680	26.0	1.6*	0.56 ^{NS}	14.46	8.74	28.76
10-C2O	1243	1.1 ^{NS}	-46357 ^{NS}	232238	119297	277415	25.9	0.7 ^{NS}	-0.63 ^{NS}	13.71	12.54	16.62
07-C2J	1129	1.2 ^{NS}	43212 ^{NS}	202587	126085	233188	25.9	0.7 ^{NS}	-0.36 ^{NS}	13.88	12.30	17.85
14-C2Q	1032	1.0 ^{NS}	-46745 ^{NS}	364971	305326	388829	25.9	1.1 ^{NS}	-0.27 ^{NS}	14.08	11.35	20.91
13-C2A	1111	1.2 ^{NS}	-25378 ^{NS}	329596	102366	420488	25.9	1.2 ^{NS}	-0.17 ^{NS}	14.21	11.42	21.21
05-C1G	1129	1.0 ^{NS}	-42325 ^{NS}	304343	199124	346430	25.9	1.4 ^{NS}	-0.14 ^{NS}	14.69	10.95	24.04
15-C1O	1022	0.8 ^{NS}	-57381 ^{NS}	367170	429704	342156	25.8	0.6 ^{NS}	-0.18 ^{NS}	14.56	13.26	17.82
21-Canapu	1211	0.5*	493790 ^{NS}	228627	589931	84105	25.4	0.4 ^{NS}	-0.43 ^{NS}	16.17	15.59	17.65
19-BRS Carijo	1344	0.9 ^{NS}	-893 ^{NS}	135731	129146	138366	25.0	1.1 ^{NS}	0.37 ^{NS}	19.13	15.75	27.56
20-BRS Tapaihum	1323	1.4 ^{NS}	-15169 ^{NS}	123155	17749	165317	24.5	0.8 ^{NS}	-0.63 ^{NS}	21.77	19.44	27.59
18-18Marrom	1307	1.4 ^{NS}	6935 ^{NS}	185480	61935	234898	23.8	0.6 ^{NS}	0.03 ^{NS}	26.57	24.9	30.53
Overall Mean				1130						26.4		
MS G*E				200801**						2.01**		

** , * , ^{NS} Significant at 1%, 5% and non-significant by 't' tests.

used in self-pollinated crops, even under polygenic control. Cowpea cultivars with 30% protein content have been released in the African continent (Singh, 2007). More recently, Santos and Boiteux (2013) reported the development of lines presenting seed protein content of up to 34%, and it suggested the real opportunity to increase the protein content in this strategic plant species through traditional breeding.

Genotype×environment (G×E) interaction studies focused protein content are very scarce, even when it comes to important commodities such as soybean. So far, there are no such studies using cowpea. Therefore, our study is the first report in this crop species.

Multi-local trials play a major role in the identification of genotypes that combine high grain yield and protein content, and good agronomic performance in a wide range of contrasting environments, such as those under irrigated and rain-fed conditions. Many statistical approaches have been proposed in order to interpret significant G×E interactions and to identify genotypes presenting good adaptability and stability in different environments. The linear regression methodology proposed by Eberhart and Russell (1966) and the non-parametric one proposed by Lin and Binns (1988) have been largely applied to G×E studies. The low correlation levels have been observed between these methodologies (Silva and Duarte, 2006), and it suggests that one methodology cannot replace the other and that they should be applied together, as it was done by Pereira et al. (2009). The non-parametric methodology assumes some assumption violations, such as normality.

The greater protein contents reported in the current study are close to the value of cultivars released by IITA (Singh, 2007), in the African continent. The 'C2R', 'C3S', 'C3F', 'C2M' and 'C2S' lines showed protein content close to that of

previous assessments done with them; except for 'C2R', which showed mean protein content of 34.1% (Santos and Boiteux, 2013). The results reported in our study indicated that the selection and releasing of lines that combine high protein content and grain yield will not be a straightforward task, because the lines presenting the highest protein contents also showed the lowest yields in our assays. Santos and Boiteux (2013) reported non-significant phenotypic correlation between these two variables, and it did not meet the present findings. Mello Filho et al. (2004) reported similar negative correlation between grain yield and protein content in eight soybean populations. Wilson (2004) suggested the independent manipulation of these two variables, and it could be achieved through the selection of individual lines that present either intermediate grain yield and protein content values or mean values above that of the experimental means. The 'C3Q', 'C3M', 'C2S', and 'CIJ' lines showed yield equal to or above the experimental means, as well as protein content above that of the experimental means and good adaptability and stability through the methodologies by Eberhart and Russell (1966) and by Lin and Binns (1988) (Tables 2 and 3). These lines could be strong candidates to be released as new cultivars in the semi-arid regions. High protein content lines such as 'C2R', 'C3S', 'C2M' and 'C2I' could be employed in backcross breeding programs; 'C3Q', 'C3M', 'C2S' and 'CIJ' can be used as recurrent parents in order to simultaneously increase yield and protein content, as it was suggested by Wilcox and Cavins (1995) in their study on soybeans.

Cowpea is broadly grown in semi-arid regions due to its tolerance to water stress and substantial grain yield in comparison to other legumes such as common beans, lentils, and chickpeas. Accordingly, the selection of superior cultivars through the combination of high yield and seed

protein content, and good adaptability and stability under different environmental conditions will have a huge positive impact on cowpea production-market chains, mainly in semi-arid tropical regions where there is lack of protein sources available for human consumption. The 'C3Q', 'C3M', 'C2S' and 'CIJ' lines identified in the present study, after their assessment under irrigated and rain-fed conditions, showed mean protein value of 27%, which is higher than that observed in most of the current commercial cowpea cultivars (approximately 24%). These inbred lines may represent a potential elite germplasm in breeding programs focused on improving the protein levels to 30% or more, depending on the line and/or on the direct release of new nutritionally improved cultivars adapted to the Brazilian semi-arid region.

Materials and Methods

Plant materials

The cowpea lines assessed in the present study were developed and selected through high protein content and grain yield of crosses involving inbred lines introduced by the International Institute for Tropical Agriculture (IITA) to Brazilian-adapted cultivars, as it was previously described (Santos and Boiteux, 2013). The cowpea genotypes were subdivided in two different agronomic groups. Experiment #1 was composed of a set of genotypes presenting indeterminate and semi-climbing growth (ISCG) habits, with 23 treatments (20 inbred lines) and three commercial cultivars were used as control. Experiment #2 was composed of a set of genotypes presenting determinate and semi upright growth (DSUG) habits, with 21 treatments (17 inbred lines), and four cultivars were used as control. The experiments were carried out with no nitrogen fertilization and *Rhizobium* inoculation. It was intentionally done, since the *Rhizobium* inoculation may increase protein content due to its effects on nitrogen availability (Marinho et al., 2014). The experiments were carried out in different locations in the States of Bahia, Ceará, Pernambuco, and Piauí, which are located in the Northeastern region of Brazil (Table 1). The experimental design was a completely randomized block with three repetitions. Three field assays were carried out under irrigated management conditions (in the second semester of the year) and four assays were conducted under rain-fed conditions (in the first semester of the year). Each experimental net unit measured 3 m², and the plots measured 3.0 × 2.0 m. The plant spacing was 1.0 m × 0.1 m and 0.5 m × 0.1 m; plant density per hectare was 100,000 and 200,000 in the assays involving the ISCG and DSUG genotypes, respectively.

Protein quantification

The flour samples were obtained from the mature seeds (10 g sample) of each plant. They were ground in a MA 630/1 mill (Marconi, Brazil) for 1 min, using a 35-mesh screen. The flour samples were analyzed (in duplicate) according to the method No. 920.87 of the Association of Official Analytical Chemists (AOAC, 1995). The finely ground and dried sample (0.2 g) was weighed in a micro-Kjeldahl flask containing the catalyst solution plus 5 mL H₂SO₄ (concentrated). The flasks were placed in a bank of heaters to be digested (temperature equal to 350°C) in fume hood for four hours until a clear solution was observed in the tube. The digested solution was placed in the Kjeldahl apparatus and 15 mL of 50% (w/v) NaOH was added to each tube. The mixture was then steam distilled and the ammonia released from the process was collected in a 100 mL conical flask containing 10 mL 2%

boric acid plus a mixed indicator solution. The green reaction solution was titrated in 0.01 M HCl solution. At the end point, the green color turned pink, and it indicated that all the nitrogen trapped as ammonium borate was removed as ammonium chloride. The nitrogen percentage was calculated through the formula: % N = [0.14 * correction factor for HCl solution * total volume of titrated HCl]. The crude protein amount was determined through the multiplication of the nitrogen percentage using the constant factor 6.25. The total protein was corrected to dry matter, which was obtained after all the samples were dried at 106°C for 12 h. All the analyses were performed at the Animal Nutrition Laboratory in Embrapa Tropical Semi-arid.

Statistical analyses

Experimental data about the location and those pooled in the seven environments were analyzed through the GLM procedure and through the Ls mean options of the SAS (SAS, 1989). The grain yield by location was adjusted to the mean number of plants in the experimental units by the covariance method using a SAS code, as it was described by Vencovsky and Barriga (1992). The adaptability and stability parameters were estimated according to the methodologies by Eberhart and Russell (1966) and Lin and Binns (1988), which are available in the Genes software (Cruz, 2006). According to the methodology described by Eberhart and Russell (1966), the regression coefficient is associated with a linear component, thus suggesting genotype adaptability; $\beta_i=1$ indicates broad adaptability, whereas the regression deviation equal to zero ($\sigma^2_{di}=0$) indicates good stability. The P_i gen parameter describes the genotype stability, which was defined as the mean square of the distance between genotype i and the genotype presenting the strongest response in the methodology by Lin and Binns (1988). The best genotypes are those showing the lowest P_i gen parameter values. In addition, the P_i fav and P_i unfav stability parameters were estimated according to Carneiro (1998). These parameters provide information about favorable and unfavorable environments. Genotypes presenting low values are those with the best performance in such contrasting environments.

Conclusion

The inbred lines showing the highest protein contents presented the lowest grain yields, thus indicating the prominent "phenotypic cost" of protein trait in overall cowpea seed production. However, the breakage of the herein studied association was observed in a subgroup of inbred lines such as 'C3Q', 'C3M', 'C2S', and 'CIJ'. These lines showed yield approximate to or above 1050 kg/ha, mean protein content of 27%, good adaptability and stability in different environments, as it was simultaneously indicated by the two methodologies. Therefore, these inbred lines may represent a potential elite germplasm in cowpea breeding programs and/or in the releasing of new cultivars adapted to the semi-arid region.

Aknowlegments

The authors thank *Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico* (CNPq) for financial support. Danilo O.M. da Silva has a CAPES scholarship. Carlos A.F. Santos is a CNPq productivity researcher.

References

- Arslanoglu FS, Aytac S and, Oner EK (2011) Effect of genotype and environment interaction on oil and protein content of soybean (*Glycine max* (L.) Merrill) seed. *Afr J Biotechnol.* 10:18409-18417.
- Association of Official Analytical Chemists (AOAC) 1995 Official method 920.87 - Protein (total) in flour, final action. In: P. Cunniff, editor, Official methods of analysis of the association of official analytical chemists 16th ed. AOAC, Arlington, VA vol 2, chapter 32, p 12-13.
- Balešević-Tubić S, Dorđević V, Miladinović J, Dukić V, Miladinović J, Dukić V, Tatić M (2011) Stability of soybean seed composition. *Genetika+*. 43:217-227.
- Becker HC, Leon J (1988) Stability analysis in plant breeding. *Plant Breeding* 101: 1-23.
- Boukar OF, Massawe S, Muranaka J, Franco M, Dixon B, Singh, Fatokun C (2011) Evaluation of cowpea germplasm lines for protein and mineral concentrations in grains. *Acta Hort.* 9:515-522.
- Carneiro PCS (1998) Novas metodologias de análise da adaptabilidade e estabilidade de comportamento. Ph.D. diss., Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brazil.
- Cruz CD (2006) Software GENES: computational methodologies for genetics and statistics. Imprensa Universitaria, Vicoso, Brazil.
- Cruz CD, Regazzi AJ (1994) Biometrical model applied to genetic improvement. Imprensa Universitaria, Vicoso, Brazil.
- Eberhart SA, Russell W (1966) Stability parameters for comparing varieties. *Crop Sci.* 6:36-40.
- FAO (2014) The State of Food Insecurity in the World 2014. Strengthening the enabling environment for food security and nutrition. FAO, Rome.
- Flores F, Moreno MT, Cubero JI (1998) A comparison of univariate and multivariate methods to analyze G×E interaction. *Field Crop Res.* 56: 271-286.
- Huehn M (1990a) Nonparametric measures of phenotypic stability Part 1: Theory. *Euphytica.* 47: 189-194.
- Huehn M (1990b) Nonparametric measures of phenotypic stability Part 2: Applications. *Euphytica.* 47: 195-201.
- Iqbal A, Khalil IA, Ateeq N, Khan MS (2006) Nutritional quality of important food legumes. *Food Chem.* 97:331-335.
- Jäger I (2013) Nutritional benefits of legume consumption at household level in rural areas of sub-Saharan Africa: A literature study. www.N2Africa.org, number of pages pp. 95. *jfca.* 2009.05.008
- Kang MS (1998) Using genotype-by-environment interaction for crop cultivar development. *Adv Agron.* 62, 200-252.
- Lin CS, Binns MRA (1988) A superiority measure of cultivar performance for cultivar x location data. *Can J Plant Sci.* 68:193-198.
- Mano ARO (2009). Adaptabilidade e estabilidade fenotípica de cultivares de feijão-de-corda. Ph.D. diss., Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brazil.
- Marinho RCN, Nobrega RSA, Zilli JE, Kavier GR, Santos CAF, Aidar S de T, Martins LMV, Fernandes Junior PI (2014) Field performance of new cowpea cultivars inoculated with efficient nitrogen-fixing rhizobial strains in the Brazilian semiarid. *Pesqui Agropecu Bras.* 49:395-402.
- Freire Filho FR (2011) Feijão-caupi no Brasil: Produção, melhoramento genético, avanços e desafios. Embrapa Meio-Norte, Teresina.
- Mello Filho OD, Sedyama CS, Moreira MA, Reis MS, Massoni GA, Piovesan ND (2004) Grain yield and seed quality of soybean selected for high protein content. *Pesq agropec bras.* Brasília, v.39, n.5, p.445-450.
- Nunes HF, Freire Filho FR, Ribeiro VQ, Gomes RLF (2014) Grain yield adaptability and stability of blackeyed cowpea genotypes under rainfed agriculture in Brazil. *Afr J Agric Res.* 9:255-261.
- Pereira HS, Melo LC, del Peloso MJ, Faria LC, Costa JGC, Cabrera Díaz JL, Rava CA, Wendland A (2009) Comparison of methods for phenotypic adaptability and stability analysis in common bean. *Pesq Agropec Bras.* 44:374-383.
- Sands DC, Morris CE, Dratz EA, Pilgeram AL (2009) Elevating optimal human nutrition to a central goal of plant breeding and production of plant-based foods. *Plant Sci.* 177: 377-389.
- Santos CAF, Barros GAA, Santos ICC, Ferraz MGS (2008). Agronomic and cooking quality of cowpea evaluated in the São Francisco valley, Brazil. *Hortic Bras.* 26: 404-408.
- Santos CAF, Boiteux LS (2013) Breeding biofortified cowpea lines for semi-arid tropical areas by combining higher seed protein and mineral levels. *Genet Mol Res.* 12:6782-6789.
- Santos CAF, Boiteux LS (2015) Genetic control and transgressive segregation of zinc, iron, potassium, phosphorus, calcium, and sodium accumulation in cowpea (*Vigna unguiculata*) seeds *Genet Mol Res.* 14: 259-268.
- Santos CAF, Costa DCC, Silva WR, Boiteux LS (2012) Genetic analysis of total seed protein content in two cowpea crosses. *Crop Sci.* 52:2501-2506.
- SAS Institute (1989) *User's guide: Statistics.* SAS Inst., Cary, NC.
- Silva WCJ, Duarte JB (2006) Statistical methods to study phenotypic adaptability and stability in soybean. *Pesqui Agropecu Bras.* 41:23-30.
- Simmonds NW (1991) Selection for local adaptation in a plant breeding programme. *Theor Appl Genet.* 82: 363-367.
- Singh BB (2007) Recent progress in cowpea genetics and breeding. *Acta Hort.* 752: 69-75.
- Vasconcelos IM, Maia FMM, Farias DF, Campello CC, Carvalho AFO, Moreira RA, Abreu de Oliveira JT (2010) Protein fractions, amino acid composition and antinutritional constituents of high-yielding cowpea cultivars. *J Food Compos. Anal.* 23:54-60.
- Vencovsky R, Barriga P (1992) Genética biométrica no fitomelhoramento. Sociedade Brasileira de Genética. Ribeirão Preto, Brazil.
- Wilcox JR, Cavins JF (1995) Backcrossing high seed protein to a soybean cultivar. *Crop Sci.* 35:1036- 1041.
- Wilson RF (2004) Seed composition. In: Boerma H and Specht JE, editors, *Soybeans: Improvement, Production, and Uses.* 3rd Edition, ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI. P. 621-668.

Published online October 13, 2017

RESEARCH

Adaptability and Stability Parameters of Iron and Zinc Concentrations and Grain Yield in Cowpea Lines in the Brazilian Semiarid Region

Danillo Olegário Matos da Silva* and Carlos Antonio Fernandes Santos

ABSTRACT

The biofortification of cowpea [*Vigna unguiculata* (L.) Walp.] lines will have great impact in semiarid regions, since the crop provides a rich source of food, especially of iron and zinc. The aim of the current study was to assess the adaptability and stability of iron and zinc concentrations and grain yield in cowpea lines to release new cultivars. Forty-four genotypes were distributed in two experiments, climbing and upright lines, with different population densities. They were assessed in four rainfed and three irrigated environments in two randomized block designs with three repetitions. Significant statistical differences were observed ($p < 0.01$) in the treatment, environment, and treatment \times environment interaction mean squares for all variables. The lines that showed the highest iron and zinc concentrations also showed grain yields below the overall mean in both experiments. The three applied methods showed similar results in the selection of superior materials. C4I and T16_2R in the climbing experiment and C2J in the upright experiment showed grain yield equal to or greater than the overall experiment means of 1034 and 1130 kg ha⁻¹, respectively, with iron and zinc means concentrations 15% greater than the control cultivars, as well as wide adaptability and stability in the assessed environment. These lines could be released as new cultivars.

D.O.M. da Silva, Univ. Estadual de Feira de Santana (UEFS), Programa de Pós-graduação em Recursos Genéticos Vegetais, Avenida Transnordestina, SN, Novo Horizonte, 44.036-900, Feira de Santana, Bahia, Brazil; C.A.F. Santos, Embrapa Semiárido, CP 23, CEP 56302-970, Petrolina, Pernambuco, Brazil. Received 7 June 2016. Accepted 31 Aug. 2017. *Corresponding author (danilloolegario@hotmail.com). Assigned to Associate Editor Hussein Abdel-Haleem.

Abbreviations: AMMI, additive main effects and multiplicative interaction; BRS, Brasil; PCI, principal components of interaction; SCH, semiclimbing habit and indeterminate growth; UDG, upright plants with determined growth.

COWPEA [*Vigna unguiculata* (L.) Walp.] is a legume grown in different parts of the world. It is used as staple food in >65 countries and plays an important role in human nutrition due to its good protein quality and high levels of several minerals. (Singh, 2006; Badiane et al., 2012). It plays an important role in the nutrition of the Northeast Brazilian population and is one of the main social and economic alternative crops in the northern and northeastern regions (Oliveira et al., 2010).

The nutritional micronutrient deficiency affects more than two billion people, mostly from poor families in developing countries (Bouis and Welch, 2010). Trace minerals, such as iron (Fe) and zinc (Zn), are necessary to the body in small daily amounts to maintain metabolic normality and proper cell functioning (Rios et al., 2009). The introduction of biofortified agricultural products containing high protein and mineral levels is considered an important component in breeding programs focused on eliminating human malnutrition (Santos and Boiteux, 2013).

Cowpea presents great variability in chemical composition of the grains, and this enables the selection of genotypes with high nutritional concentrations. Freire Filho et al. (2011) studied eight cultivars and found Fe concentrations ranging from 48.8 to

Published in Crop Sci. 57:2922–2931 (2017).
doi: 10.2135/cropsci2016.06.502

© Crop Science Society of America | 5585 Guilford Rd., Madison, WI 53711 USA
All rights reserved.

77.4 mg kg⁻¹ and Zn concentrations ranging from 35.6 to 53.7 mg kg⁻¹. Santos and Boiteux (2013) assessed cowpea lines with high protein and mineral levels and high yield. They found Fe concentrations ranging from 36.5 to 137 mg kg⁻¹ and Zn concentrations ranging from 36 to 58 mg kg⁻¹.

Knowing the component of the genotype × environment interaction during the selection phase, and especially during the recommendation phase, is of great importance to breeding programs. Such interaction derives from the different behavior of genetic materials against environmental variation, and such factors hinder the selection of better adapted genotypes (Cruz et al., 2012). Assessing the genotypes in as many environments as possible and applying methods to classify them according to their adaptability and stability is an alternative to minimize the influence of such interaction.

Several adaptability and stability methods used to estimate the contribution of each genotype to the interaction stand out in the literature, especially the method by Eberhart and Russell (1966) that is based on linear regression, the method by Lin and Binns (1988) that is based on non-parametric analysis, and the multiplicative methods based on principal components (the additive main effects and multiplicative interaction [AMMI] model). Such methods have been widely used to select high-yield cowpea genotypes (Rocha et al., 2007; Mano, 2009; Barros et al., 2013; Nunes et al., 2014). Differently from studies on grain yield, adaptability and stability studies related to the mineral concentration in cowpea are still scarce in the literature.

The aim of the current study was to estimate adaptability and stability parameters of grain yield and mineral production in cowpea seeds, in two experiments assessed in seven irrigated or rainfed environments, to enable the registration and release of new cultivars for Northeast Brazil.

MATERIALS AND METHODS

Plant Material

Cowpea lines selected due to their high mineral concentration and grain yield were assessed. The lines resulted from the crossing between three introduced accessions of the International Institute for Tropical Agriculture (IITA) and three cultivars adapted to the Brazilian semiarid region, as described by Santos and Boiteux (2013). The selected lines composed two experiments, according to the plant size type: (i) semiclimbing habit and indeterminate growth (SCH), with 23 treatments, 20 lines, and three control cultivars; and (ii) upright cowpea plants with determined growth (UDG), with 21 treatments, 17 lines, and four control cultivars.

The experiments were conducted in the Brazilian States of Bahia, Ceará, Pernambuco, and Piauí (Table 1). The study adopted a randomized block experimental design with three repetitions in three irrigated environments in the second half of the year, and four rainfed environments in the first half of the year. Each plot had 3.0-m × 2.0-m dimension. The experimental plot of the SCH experiment was formed by two rows, with 1.0 m of

space between rows and 0.1 m between plants, which resulted in a population density of 100,000 plants ha⁻¹. On the other hand, the experimental plot of the UDG experiment was formed by four rows, with 0.5 m of space between rows and 0.1 m between plants, resulting in a population density of 200,000 plants ha⁻¹. Drip irrigation and standard crop management practices for the region were used (Santos et al., 2008).

Mineral Quantification

Approximately 10 g of seeds from 924 plants were ground in a MA 630/1 mill (Marconi) to obtain fine flour from each sample. The samples were analyzed in duplicate, according to the standard procedures of the Association of Official Analytical Chemists (AOAC, 1995). An extract was prepared to quantify Fe and Zn. The digester tubes were cooled, and 49 mL of distilled and deionized water was added to them. The quantification samples were subjected to reading in flame atomic absorption spectrophotometer (Varian). The results were expressed in milligrams per kilogram for Fe and Zn of grain dry matter. All the analyses were performed in the soil laboratory of Semiarid Embrapa.

Statistical Analyses

The statistical analyses of the experimental designs were performed in the SAS software (SAS Institute, 1989), according to the GLM procedure. The grain yield was corrected in the SAS software through covariance method, using the average plant stand of the plots in each experiment, as was described by Vencovsky and Barriga (1992). Scott and Knott (1974) clustering was applied at 5% of significance. The adaptability and stability of genotypes were assessed through methods by Eberhart and Russell (1966) and Lin and Binns (1988) in Genes software (Cruz, 2006), as well as through AMMI using SAS software (SAS Institute, 1989), as was described by Duarte and Vencovsky (1999).

According to the method by Eberhart and Russell (1966), the regression coefficient is associated with the linear component and indicates genotype adaptability: genotypes with index $\beta_i = 1$ have wide adaptability; deviations from the regression equal to zero ($\sigma_{di}^2 = 0$) indicate good stability. According to the method by Lin and Binns (1988), the Pi parameter defines the genotype stability as the mean square of the distance between the mean of a genotype and the maximum mean response of all locations. Genotypes with lower values correspond to those with better performance.

The AMMI methodology stands out because it best describes the genotype × environment interaction through the disposal of additional noises found in traditional interaction estimates. It uses, together, the variance analysis of the main effects of genotypes and environments and the principal component analysis (PCA) of the interaction. It also identifies the most stable and adaptable genotypes and performs the agronomic zoning of the environments (Duarte and Vencovsky, 1999).

The Spearman correlation was applied to compare the three methods. The order of stability and adaptability for each genotype was performed as reported by da Silva and Duarte (2006). (i) In the Lin and Binns method, the genotypes were ordered by absolute value of Pi estimates. The genotype with the lower estimate was considered the most stable and adapted, and so on. (ii) In the AMMI method, the score of the first

Table 1. Local characteristics of each environment where 44 cowpea genotypes were evaluated.

Local	Latitude	Altitude	Soil
		m	
Acauá, Piauí	08°23' S	450	Dystrophic Latosol
Bebedouro, Pernambuco	09°09' S	350	Eutrophic Yellow Argisol
Caatinga, Pernambuco	09°04' S	350	Dystrophic Yellow Latosol
Dormentes, Pernambuco	08°15' S	490	Eutrophic Argisol
Limoeiro, Ceará	05°10' S	152	Cambisol
Juazeiro, Bahia	09°51' S	370	Cambisol
Petrolândia, Pernambuco	08°58' S	316	Dystrophic Quartzous Sand

principal component was taken. The genotype closest to zero was the most stable, and so on. (iii) In the Eberhart and Russell method, which has two parameters, the average was calculated for the two parameters of each genotype before ordering them from smallest to largest β_1 and σ^2_{di} .

RESULTS

Assessing the Environments for Grain Yield and for Iron and Zinc Concentrations in Cowpea Lines

Statistically significant differences were observed in the mean squares of the treatments for grain yield and Fe and Zn concentrations in almost every environment, except for grain yield in the environments at Acauá, Juazeiro, and Petrolândia in the UDG experiment, and for Fe concentration in the environment at Bebedouro in the SCH experiment. The experiments in Acauá, Dormentes, Limoeiro, and Petrolândia were conducted on farming properties. This did not compromise the assessments—the variation coefficients were <43% (Table 2)—and allowed us to make the assessments in environments that represented the species cultivation.

The Limoeiro environment showed the highest mean grain yield (Table 2), thus indicating the yield potential of the assessed lines. As was observed in Limoeiro, some lines may exceed 3000 kg ha⁻¹ under appropriate technology conditions. As for the minerals, the Caatinga environment showed the highest mean Zn concentration in both experiments and the highest Fe mean concentration in the UDG experiment. The Dormentes environment presented the highest mean Fe concentration in the SCH experiment.

Moura et al. (2012) found a negative correlation between grain yield and Fe and Zn levels in cowpea. Similar results were observed in the current study: the Bebedouro environment, which had the second highest mean grain yield, showed the lowest Fe and Zn means in both experiments (Table 2). Santos (2013) estimated the correlations

Table 2. Treatment mean squares (TMS), residual mean squares (RMS), means, and coefficients of variation (CVs) related to yield and iron and zinc concentrations in 20 lines and three control cultivars (SCH experiment: semiclimbing habit) and in 17 lines and four cowpea cultivars (UDG experiment: upright cowpea plants with determined growth) assessed in seven irrigated and rainfed environments.

Locality	Crop management conditions†	Yield				Iron				Zinc			
		TMS	RMS	Mean	CV	TMS	RMS	Mean	CV	TMS	RMS	Mean	CV
		kg ha ⁻¹				mg kg ⁻¹				mg kg ⁻¹			
		%				%				%			
SCH experiment													
Acauá	R/FF	87,189**	42,345	684d†	30.0	127.8**	51.8	62.6b	11.5	14.6**	5.8	34.7c	6.9
Bebedouro	VEA	306,194**	57,712	1322b	18.1	137.1NS§	82.2	52.4d	17.3	39.6**	9.1	29.5e	10.2
Caatinga	R/EA	90,050**	32,140	727d	24.6	112.7**	64.1	64.8b	12.3	35.4**	13.2	40.7a	8.9
Dormentes	R/FF	355,248**	60,272	689d	35.6	189.9*	96.6	66.8a	14.7	75.3**	13.1	30.9d	11.7
Limoeiro	V/FF	278,796**	114,883	2192a	15.4	177.7**	48.7	54.7d	12.7	13.9**	1.5	31.4d	3.9
Juazeiro	V/FF	202,060*	97,575	729d	42.8	118.4**	17.4	61.5b	6.8	64.9**	1.9	37.0b	3.8
Petrolândia	V/FF	259,048**	81,818	897c	31.8	220.9*	34.2	62.2b	9.4	48.5**	6.0	37.2b	6.6
UDG experiment													
Acauá	R/FF	86,308NS	78,306	1087c	25.7	49.2**	8.7	60.6b	4.8	23.0**	1.8	34.3c	3.9
Bebedouro	VEA	121,491*	62,900	1697b	14.7	57.2*	30.4	57.6c	9.5	26.2**	5.4	28.2b	8.2
Caatinga	R/EA	52,592*	28,273	734e	22.9	87.4**	13.9	63.4a	5.8	22.9**	2.5	40.2a	3.9
Dormentes	R/FF	653,413**	75,526	887d	30.9	53.9**	14.5	60.5b	6.2	18.0**	4.9	27.3f	8.1
Limoeiro	V/FF	398,371**	102,030	2057a	15.5	193.9**	57.0	59.5b	12.6	23.7**	0.5	31.8d	2.2
Juazeiro	V/FF	116,106NS	83,516	806d	35.8	92.3**	21.2	60.5b	7.6	25.6**	4.4	38.0b	5.5
Petrolândia	V/FF	98,114NS	71,214	692e	38.5	93.8**	10.0	60.5b	5.2	28.6**	4.0	38.1b	5.3

*, ** Significant at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

† I, irrigated; R, rainfed; EA, experimental area; FF, field farmers.

‡ Values followed by the same letter in a column belong to the same group, according to the Scott and Knott test (1974) at 5% probability.

§ NS, nonsignificant.

among minerals, protein, and grain yield in six cowpea crossings and found positive and significant mean correlation between Fe concentration and grain yield, as well as a lack of correlation between Fe and Zn concentrations.

The relations between the largest and smallest mean squared residuals observed in the SCH and UDG experiments were below or close to seven in all variables, and this indicated homogeneity in the residual variances, which is a required condition for the joint analysis of experiments (Cruz and Regazzi, 1997). The grain yield means in the three irrigated environments were 84 and 45% higher in the SCH and UDG experiments, respectively, than the means found in the four rainfed environments (Table 2). This result corroborated those reported by Santos et al. (2008). However, the means of the assessed minerals showed similar values, regardless of the adopted handling, with or without irrigation.

Adaptability and Stability Parameters for Grain Yield and Iron and Zinc Concentrations in Cowpea Lines

The Brasil (BRS) Acauã cultivars in the SCH experiment and the BRS Carijó and BRS Tapaihum cultivars in the UDG experiment showed the highest grain yields (Tables 3 and 4). These cultivars were previously assessed in the same locations of the current research, except for Limoeiro, and were selected exclusively for grain yield and earliness (Santos et al., 2008).

The C3R and C3B lines in the SCH experiment presented grain yield close to that of the BRS Acauã control cultivar, as well as wide adaptability and good stability parameters, by the Eberhart and Russell method, whereas the Lin and Binns method highlighted these two lines as the second and third best options (Table 3). The C2O line in the UDG experiment also showed grain yield close to that of the BRS Carijó and of the BRS Tapaihum control cultivars, as well as wide adaptability and good stability parameters, by the Eberhart and Russell, whereas the Lin and Binns method pointed out this line as the fifth best option (Table 4).

The C4G line showed the highest Fe mean concentration (67.5 mg kg^{-1}) with adaptability to unfavorable environments and low stability in the SCH experiment, whereas the C1T and C4G lines showed the highest Zn mean concentrations, with adaptability to unfavorable and broad environments, respectively, both with low stability, according to Eberhart and Russell analyses (Table 3). The Lin and Binns method highlighted C6P and C4G as the best options for Fe concentration and C1T for Zn concentration (Table 3). The T16_2R lines stood out according to Eberhart and Russell analysis, with high Fe mean concentration, wide adaptability, and good stability parameters, whereas the C6P ones stood out with high

Zn concentration, wide adaptability, and good stability parameters (Table 3).

The C2M and C2I lines in the UDG experiment showed mean values $>20\%$ in the Fe and Zn levels, respectively, in comparison with the means of the BRS Tapaihum and Canapu control cultivars—the last one is a landrace (Table 4). The methods by Eberhart and Russell and Lin and Binns highlighted the C2M line as the best option, with high Fe concentration, wide adaptability, and good stability parameters. The best option for Zn concentration was the C2M line, with high mean concentration, wide adaptability, and good stability parameters, according to Eberhart and Russell analysis, whereas Lin and Binns analysis highlighted C2I as the best option (Table 4).

The genotype \times environment interaction was decomposed in six principal components of the interaction (PCI) using the multivariate AMMI method. However, only the first axis (PCI1) showed significant residuals in the F_r test ($p < 0.01$), and the AMMI1 model was adopted in all variables. Thus, the graphic interpretation of adaptability and stability was performed through the PCI1 alone, via the AMMI1 biplot. Similar results were found by Barros et al. (2013), who assessed cowpea yield.

The first principal component of the interaction explained 49.78, 45.21, and 42.57% of grain yield and of Fe and Zn concentrations, respectively, in the SCH experiment (Table 5). The BRS Acauã environment was the most stable, with low yield production, and Limoeiro was the most productive, although with high instability. The C3R line was the most stable genotype in grain yield (Fig. 1A), as highlighted by Eberhart and Russell analysis (Table 3).

Bebedouro showed the lowest Fe mean concentration and was the most stable environment. The T16_2R line showed high stability and high Fe concentration, being highlighted as the option by AMMI analysis, as indicated by Eberhart and Russell analysis (Table 3). The Caatinga environment was the most favorable to Zn concentration, and the C1T line, which showed the highest mean, was also the most stable genotype, as indicated by Lin and Binns analysis (Table 3).

The first principal component of the interaction in the UDG experiment explained 54.46% of grain yield, as well as 47.13% of Fe and 24.89% of Zn concentrations (Table 5). Petrolândia was the most stable environment and showed the lowest mean yield. C2O stood out among the lines in the AMMI method due to high stability and mean yield close to that of the control cultivars (Fig. 1B), as pointed out by Eberhart and Russell analysis (Table 4).

Acauã and Petrolândia were the most favorable environments for Fe concentration (Fig. 2B), whereas the C2M line was pointed out as the best option according to AMMI analysis, as highlighted by the two previous

Table 3. Grain yield, iron, and zinc means (β_0), adaptability (β_i), stability (σ_{di}), and genotype order in 20 lines and three cowpea control cultivars—semiclimbing habit (SCH)—assessed in seven irrigated and rainfed environments by the Eberhart and Russell (1966) and Lin and Binns (1988) methods.

Genotype	Yield				Iron				Zinc						
	Eberhart and Russell		Lin and Binns		Eberhart and Russell		Lin and Binns		Eberhart and Russell		Lin and Binns				
	β_0	β_i	σ_{di}	Order	Pf†	β_0	β_i	σ_{di}	Order	Pf†	β_0	β_i	σ_{di}	Order	Pf†
	kg ha ⁻¹					mg kg ⁻¹					mg kg ⁻¹				
C2R	886d‡	1.3*	37,767*	20	344,349 [§]	60.5c	1.5NS§	54.9**	16	316.8 ¹⁹	33.8b	0.9NS	15.2**	10	36.9 ¹⁷
C3S	904d	1.0NS	16,770NS	3	305,069 ¹⁹	64.2b	2.1**	72.7**	22	270.9 ¹³	36.2a	0.2**	15.8**	23	28.2 ¹²
C3M	1,150b	0.9NS	-10,959NS	5	152,055 ⁵	53.9c	1.3NS	91.5**	17	461.1 ²³	31.8c	0.6*	16.3**	21	58.5 ²²
C3Q	1,021c	1.2NS	40,905*	14	219,184 ⁸	60.2c	2.6**	40.2*	20	343.9 ²¹	34.9b	0.8NS	24.9**	14	37.9 ¹⁸
C3B	1,214b	0.9NS	21,638NS	6	144,688 ⁴	60.7c	1.6NS	69.4**	19	295.7 ¹⁶	34.9b	1.6**	-1.0NS	12	31.8 ¹⁴
C6P	1,013c	0.9NS	-2,161NS	2	224,767 ⁹	65.1b	-0.4**	180.4**	23	66.2†	36.0b	1.0NS	1.2NS	2	19.1 ⁵
C1M	959d	1.4**	58,313**	22	301,820 ¹⁸	62.5b	0.2*	16.5NS	15	206.5 ⁷	35.1b	1.1NS	2.7NS	7	17.8 ³
C3F	883d	0.8NS	1,281NS	9	315,024 ²¹	63.5b	1.2NS	-1.1NS	3	185.2 ⁶	36.3b	1.4*	7.9**	18	20.4 ⁶
C3L	950d	1.0NS	-22,570NS	4	249,086 ¹³	61.5c	1.4NS	42.1*	14	251.1 ¹⁰	31.6d	1.1NS	4.5*	4	48.6 ¹⁹
C2C	968d	1.3*	29,413NS	18	287,946 ¹⁶	57.1c	1.1NS	-5.1NS	2	335.4 ²⁰	34.1c	1.1NS	-0.1NS	3	26.8 ¹¹
C1T	901d	1.1NS	50,964*	13	331,871 ²²	59.2c	0.8NS	-16.3NS	11	261.9 ¹²	38.1a	0.6*	7.9**	20	6.9†
C3R	1,228b	0.8NS	-6,056NS	8	125,105 ²	60.5c	0.1*	41.1*	18	205.9 ⁶	31.9d	0.8NS	17.2**	17	55.2 ²¹
C4G	1,023c	0.7*	27,058NS	15	251,814 ¹⁴	67.5a	0.1*	75.1**	21	114.2 ²	37.3a	1.3NS	20.7**	19	22.5 ⁷
C6A	883d	0.8NS	30,778*	17	310,255 ²⁰	64.1b	0.9NS	21.5NS	7	148.7 ⁴	36.4b	1.6**	12.9**	22	16.2 ²
C2T	934d	0.9NS	6,603NS	7	293,622 ¹⁷	57.3c	0.7NS	-11.3NS	9	312.0 ¹⁷	33.5c	0.7NS	1.1NS	6	31.2 ¹³
C3P	1,055c	0.7*	27,301NS	16	239,393 ¹¹	60.2c	1.0NS	3.2NS	1	283.3 ¹⁴	33.1c	0.7NS	1.9NS	9	35.7 ¹⁶
C6D	990c	0.9NS	43,453*	12	256,330 ¹⁵	55.8c	1.2NS	45.8**	12	379.3 ²²	33.4c	1.1NS	2.5NS	8	32.4 ¹⁵
C1V	1,019c	1.2NS	64,770**	19	243,650 ¹²	59.8c	-0.1**	6.2NS	13	289.0 ¹⁵	36.5b	1.4*	2.1NS	11	17.9 ⁴
C4I	1,102b	1.0NS	-4,448NS	1	171,894 ⁶	62.7b	1.5NS	-4.8NS	8	218.7 ⁸	35.5b	1.0NS	6.8**	5	22.9 ⁹
T16_2R	1,171b	1.0NS	69,547**	10	131,728 ³	65.8b	1.1NS	9.3NS	4	139.7 ³	35.4b	1.4*	7.9**	15	25.8 ¹⁰
Acauá	1,341a	1.0NS	112,508**	11	63,731 ¹	59.4c	0.8NS	-15.6NS	6	252.9 ¹¹	31.4d	0.7NS	5.8**	13	64.5 ²³
Pujante	1,050c	0.8NS	185,586**	21	228,464 ¹⁰	59.9c	1.3NS	-13.4NS	10	233.1 ⁹	35.9b	0.6*	5.8**	16	22.7 ⁸
Canapu	1,153b	0.5**	175,495**	23	184,265 ⁷	56.2c	0.8NS	-12.0NS	5	314.5 ¹⁸	31.5d	1.1NS	0.0NS	1	52.8 ²⁰
Mean	1,034					60.83									

*, ** Significant at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

† Pf, genotype order for Lin and Binns.

‡ Values followed by the same letter in a column belong to the same group, according to the Scott and Knott test (1974) at 5% probability.

§ NS, nonsignificant.

Table 4. Grain yield, iron, and zinc means (β_0), adaptability (β_1), stability (σ_{di}), and genotype order in 17 lines and four cowpea cultivars—upright cowpea plants with determined growth (UDG)—assessed in seven irrigated and rainfed environments by Eberhart and Russell (1966) and Lin and Binns (1988) methods.

Genotype	Yield				Iron				Zinc			
	Eberhart and Russell		Lin and Binns		Eberhart and Russell		Lin and Binns		Eberhart and Russell		Lin and Binns	
	β_0	β_1	σ_{di}	P†	β_0	β_1	σ_{di}	P†	β_0	β_1	σ_{di}	P†
	kg ha ⁻¹				mg kg ⁻¹				mg kg ⁻¹			
C1N	1,170b‡	1.2NS§	-55,352NS	18	269,486 ⁹	1.2NS	-1.24NS	2	123.5 ¹²	1.1NS	0.50NS	6
C1R	1,044d	0.9NS	-35,616NS	14	372,225 ¹⁸	0.6NS	5.41NS	5	103.1 ⁹	0.9NS	3.79**	15
C3O	1,203b	0.4*	-5,163NS	16	235,209 ⁷	-0.0NS	1.86NS	8	88.6 ⁷	0.9NS	2.41*	14
C2I	953d	0.9NS	-53,143NS	15	404,583 ¹⁹	66.7a	3.1**	19	55.3 ²	0.8*	2.73**	18
C1G	1,129c	1.0NS	-42,325NS	2	304,343 ¹¹	59.3b	0.7NS	1	122.9 ¹¹	1.1NS	0.72NS	5
C1S	1,107c	0.9NS	-28,073NS	4	344,578 ¹⁴	58.7b	-0.3NS	15	140.1 ¹⁵	1.0NS	4.90**	10
C2J	1,129c	1.2NS	43,212NS	17	202,587 ⁴	63.4b	2.7**	17	75.9 ⁴	1.0NS	1.66*	2
C1J	1,121c	1.0NS	-38,895NS	3	249,457 ⁸	61.5b	0.3NS	14	119.3 ¹⁰	0.9NS	1.75*	11
C1F	1,111c	1.1NS	-45,872NS	7	322,260 ¹²	59.4b	0.5NS	13	147.1 ¹⁶	1.2*	5.18**	21
C2O	1,243b	1.1NS	-46,357NS	9	232,239 ⁶	61.7b	0.6NS	10	74.9 ³	1.0NS	2.93**	7
C2S	1,196b	0.9NS	-45,261NS	10	276,396 ¹⁰	62.0b	0.3NS	18	82.9 ⁵	0.9NS	1.12NS	4
C2B	1,009d	0.6NS	71,955NS	20	496,665 ²¹	58.1b	1.4NS	12	128.1 ¹³	0.8*	2.54**	17
C2A	1,111c	1.2NS	-25,378NS	8	329,596 ¹³	61.3b	-0.0NS	21	86.2 ⁶	1.3**	2.07*	19
C2Q	1,032d	1.0NS	-46,745NS	5	364,971 ¹⁶	56.4b	1.7NS	9	172.8 ¹⁶	1.1NS	0.63NS	1
C1O	1,022d	0.8NS	-57,381NS	19	367,170 ¹⁷	55.8b	-0.5**	11	177.6 ¹⁹	1.2*	0.28NS	9
C1I	1,078c	0.8NS	-26,876NS	13	353,772 ¹⁵	58.6b	1.2NS	6	155.9 ¹⁷	1.3**	-0.64NS	13
C2M	893d	0.9NS	-35,771NS	6	479,205 ²⁰	69.7a	1.2NS	3	33.6 ¹	0.9NS	1.34NS	8
Marrom	1,307a	1.4NS	6,935NS	12	185,480 ³	56.7b	1.9NS	20	194.6 ²⁰	0.9NS	6.19**	16
Carrijo	1,344a	0.9NS	-893NS	1	135,731 ²	62.1b	0.4NS	4	95.2 ⁸	1.0NS	5.46**	12
Tapathum	1,323a	1.4NS	-15,169NS	11	123,155 ¹	55.1b	1.8NS	16	213.2 ²¹	0.7**	1.89*	20
Canapu	1,211b	0.5*	49,379NS	21	228,627 ⁵	59.6b	1.8NS	7	131.8 ¹⁴	0.9NS	0.24NS	3
Mean	1,130				60.42				34.07			

*, ** Significant at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

† P†, genotype order for Lin and Binns.

‡ Values followed by the same letter in a column belong to the same group, according to the Scott and Knott test (1974) at 5% probability.

§ NS, nonsignificant.

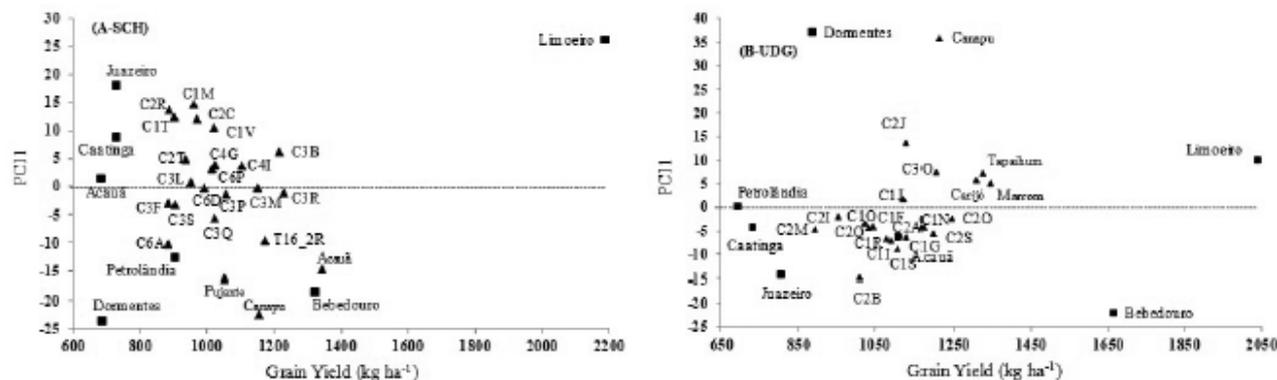


Fig. 1. Additive main effects and multiplicative interaction (AMMI) biplot for grain yield in 20 lines and three cowpea cultivars (triangles) with semiclimbing habit (A-SCH) and in 17 lines and four cowpea cultivars of upright and determined growth (B-UDG) assessed in seven irrigated and rainfed environments (squares). PCI, principal component of interaction.

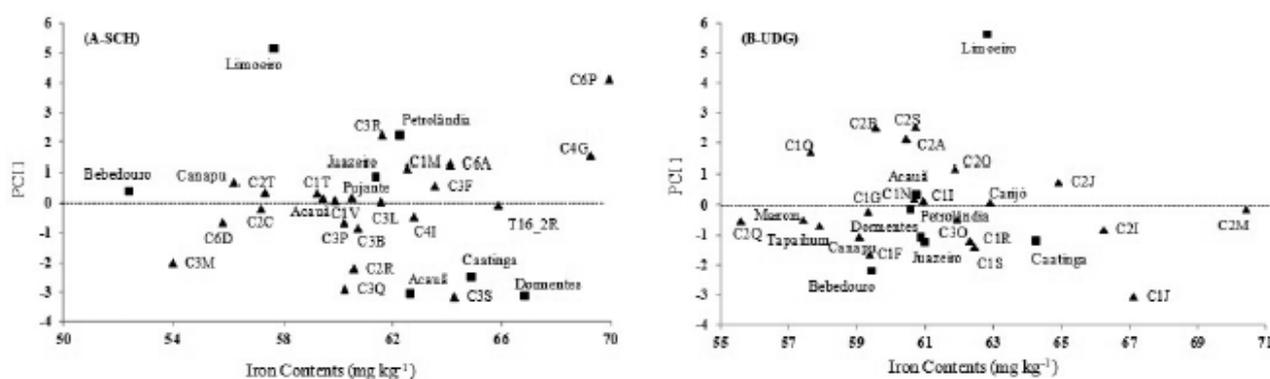


Fig. 2. Additive main effects and multiplicative interaction (AMMI) biplot for iron concentration in 20 lines and three cowpea cultivars (triangles) with semiclimbing habit (A-SCH) and in 17 lines and four cowpea cultivars of upright and determined growth (B-UDG) assessed in seven irrigated and rainfed environments (squares).

methods of analysis (Table 5). The most stable environment for Zn concentration was Limoeiro, whereas Caatinga was the environment with the highest Zn value (Fig. 3B). C2I and C2M were the best option according to AMMI analysis, with high Zn concentration and good stability (Fig. 3B), as highlighted by the two previous methods of analysis (Table 4).

Spearman Correlation among Applied Methods

The Lin and Binns method was uncorrelated with the two other methods for the three analyzed variables, whereas AMMI × Eberhart and Russell methods presented positive and significant Spearman correlations for grain yield and Fe for both experiments (Table 6). These Spearman correlations indicated that the Lin and Binns method

Table 5. Joint analysis of variance related to grain yield and iron and zinc levels in 20 lines and three cultivars (SCH experiment: semiclimbing habit) and in 17 lines and four cowpea cultivars (UDG experiment: upright cowpea plants with determined growth) assessed in seven irrigated and rainfed environments.

Source of variation†	df	Mean square			GL	Mean square		
		SCH experiment				UDG experiment		
		Yield	Iron	Zinc		Yield	Iron	Zinc
Genotype (G)	22	328,825*	239.91**	83.01**	20	366,806*	257.23**	105.54**
Environment(A)	6	20,986,713*	1814.57**	1086.80**	6	17,240,794*	182.32**	1613.31**
G × A	132	209,439**	137.76**	39.08**	120	200,801**	79.86**	11.40**
PCI1	27	517,149**	339.82**	69.93**	25	599,283**	196.80**	13.41NS
Residual _{AMMI}	105	134,136NS‡	114.90NS	24.24NS	95	131,874NS	58.98NS	10.41NS
PCI1 (%)		49.78	45.21	42.57		54.46	47.13	24.89
CV (%)		26.20	13.02	8.22		27.60	7.67	5.60

*, ** Significant at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

† PCI, principal component of interaction; AMMI, additive main effects and multiplicative interaction; CV, coefficient of variation.

‡ NS, nonsignificant.

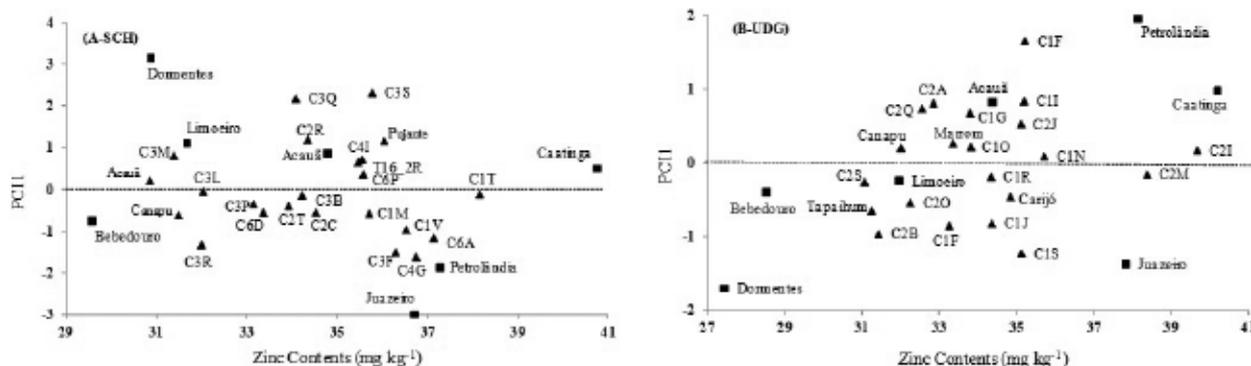


Fig. 3. Additive main effects and multiplicative interaction (AMMI) biplot for zinc concentration in 20 lines and three cowpea cultivars (triangles) with semiclimbing habit (A-SCH) and in 17 lines and four cowpea cultivars of upright and determined growth (B-UDG) assessed in seven irrigated and rainfed environments (squares).

should be applied with another method and that AMMI should replace the Eberhart and Russell method, since the first present easy, graphical interpretation.

These three methods have been applied together (da Silva et al., 2016; da Silva and Santos, 2016). In a study to evaluate the effect of genotype \times environment interaction in cowpea, Ddamulira et al. (2015) applied only the AMMI method to select and recommend lines to be grown in Ugandan environments.

DISCUSSION

Biofortification is a strategy used in agriculture as a way to improve the health of poor populations, and it is an additional tool to combat micronutrient deficiency (Nutti et al., 2009). Freire Filho et al. (2008) highlighted that applying this strategy to cowpea will have great impact on the future, since the crop represents a rich source of food—mainly protein, Fe, and Zn—for nutrient-deficient populations that have a great consumption tradition, as is the case in many countries of Africa, Asia, and northeastern South America.

New cultivars with better nutritional features able to improve nutritional quality are of great importance to breeding programs. Genotype \times environment interaction studies in cowpea mineral concentrations were not found,

this being the pioneering study in the species. Multilocal assessments of cowpea genotypes that combine high grain yields and Fe and Zn concentrations are of great importance, because they allow indication of genotypes that have good performance in different cultivation environments or genotypes that respond to better management strategies, such as the use of irrigation.

Several statistical methods have been developed and applied to interpret the genotype \times environment interaction and to identify stable-behavior genotypes in several environments, as well as those that show environmental response predictability. The linear regression (Eberhart and Russell, 1966), nonparametric (Lin and Binns, 1988), and multiplicative methods, which are based on principal components (AMMI), have been extensively used in genotype \times environment interaction studies and have shown low Spearman correlation between them (da Silva and Duarte, 2006).

Polizel et al. (2013) used seven methods to test 16 soybean [*Glycine max* (L.) Merr.] genotypes in different environments. They found that the studied methods showed consistent and complementary results. Pereira et al. (2009) emphasized that one method does not replace the other and that they should be applied together, as was done in the current study. The adaptability and stability methods used showed similar results with respect to the identification of

Table 6. Estimates of the Spearman correlation among stability and adaptability parameters to grain yield and iron and zinc levels in 20 lines and three cultivars (SCH experiment: semiclimbing habit) and in 17 lines and four cowpea cultivars (UDG experiment: upright cowpea plants with determined growth) assessed in seven irrigated and rainfed environments.

Method	Yield		Iron		Zinc	
	Lin and Binns	AMMI†	Lin and Binns	AMMI	Lin and Binns	AMMI
SCH experiment						
Eberhart and Russell	-0.03	0.69**	-0.03	0.67**	-0.15	0.52*
Lin and Binns		0.09		0.01		-0.06
UDG experiment						
Eberhart and Russell	0.09	0.24	0.02	0.41**	-0.15	0.31
Lin and Binns		-0.24		-0.01		0.31

*, ** Significant at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

† AMMI, additive main effects and multiplicative interaction.

superior materials. Cargnelutti Filho et al. (2007) point out that evaluation of the data by several methods of adaptability and stability, and the consideration of peculiarities, is suitable for better decision making in relation to the indication of cultivars, as applied in the present study.

The results in the current study indicate difficulties to select lines that combine high grain yields and Fe and Zn concentrations, since the lines that showed the highest Fe and Zn levels were not the same ones that showed the highest grain yields, and vice versa. Similar results were found by Moura et al. (2012). The selection of genotypes with intermediate or above average grain yield and Fe and Zn concentrations is an alternative to overcome the limits imposed by the lack of association among such variables.

The lines C4G, C2I, and C2M showed the highest Fe and Zn levels and are good options to be used in back-crossings or to develop new lines with BRS Acauã, BRS Carijo and BRS Tapaihum as a way to simultaneously increase the grain yield and the production of Fe and Zn.

The Lin and Binns method was biased in the present study for the genotypes with the highest production or concentration and should be used together with another method to infer adaptability and stability parameters. The AMMI method was the best option, due the graphical disposal of genotypes, associating yield performance with stability parameter.

C4I and T16_2R in the SCH experiment and C2J in the UDG experiments showed grain yield equal to or greater than the overall experiment means of 1034 and 1130 kg ha⁻¹, respectively, with Fe and Zn means concentrations 15% greater than the control cultivars, as well as wide adaptability and stability in the assessed environment. These lines could be released as new cultivars adapted to the Brazilian semiarid environment.

Conflict of Interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Acknowledgments

The authors thank the Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) for financial support. Danilo O.M. da Silva has a CAPES scholarship. Carlos A.F. Santos is a CNPq researcher.

References

- AOAC. 1995. Official methods of analysis. Assoc. Official Anal. Chem., Arlington, VA.
- Badiane, F.A., B.S. Gowda, N. Cissé, D. Diouf, O. Sadio, and M.P. Timko. 2012. Genetic relationship of cowpea (*Vigna unguiculata*) varieties from Senegal based on SSR markers. *Genet. Mol. Res.* 11:292–304. doi:10.4238/2012.February.8.4
- Barros, M.A., M.M. Rocha, R.L.F. Gomes, K.J.D. Silva, and A.C. Neves. 2013. Adaptabilidade e estabilidade produtiva de feijão-caupi de porte semiprostrado. (In Portuguese, with English abstract.) *Pesquisa Agropecu. Bras.* 48:403–410. doi:10.1590/S0100-204X2013000400008
- Bouis, H.E., and R.M. Welch. 2010. Biofortification: A sustainable agricultural strategy for reducing micronutrient malnutrition in the global south. *Crop Sci.* 50:S20–S32. doi:10.2135/cropsci2009.09.0531
- Cargnelutti Filho A., D. Perecin, E. B. Malheiros and J. P. Guadagnin. 2007. Comparison of adaptability and stability methods related to grain yield of maize cultivars. (In Portuguese, with English abstract.) *Bragantia* 66:571–578. doi:10.1590/S0006-87052007000400006
- Cruz, C.D. 2006. Programa genes: Estatística experimental e matrizes. (In Portuguese.) Univ. Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, Brazil.
- Cruz, C.D., and A.J. Regazzi. 1997. Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético. (In Portuguese.) Univ. Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, Brazil.
- Cruz, C.D., A.J. Regazzi, and P.C.S. Carneiro. 2012. Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético. Vol. 1. (In Portuguese.) Univ. Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, Brazil.
- da Silva, D.O.M., and C.A.F. Santos. 2016. Adaptability and stability parameters for potassium and calcium contents and grain yield in cowpea lines. *Afr. J. Agric. Res.* 11:3366–3374. doi:10.5897/AJAR2016.11526
- da Silva, D.O.M., C.A.F. Santos, and L.S. Boiteux. 2016. Adaptability and stability parameters of total seed yield and protein content in cowpea (*Vigna unguiculata*) genotypes subjected to semi-arid conditions. *Aust. J. Crop Sci.* 10:1164–1169. doi:10.21475/ajcs.2016.10.08.p7828
- Ddamulira, G., C.A.F. Santos, P. Obuo, M. Alanyo, and C.K. Lwanga. 2015. Grain yield and protein content of Brazilian cowpea genotypes under diverse Ugandan environments. *Am. J. Plant Sci.* 6:2074–2084. doi:10.4236/ajps.2015.613208
- Duarte, J.B., and R. Vencovsky. 1999. Interação genótipos × ambientes: Uma introdução à análise AMMI. (In Portuguese.) *Soc. Bras. Genét., Ribeirão Preto, Brazil.*
- Eberhart, A.S., and W.A. Russell. 1966. Stability parameters for comparing varieties. *Crop Sci.* 6:36–40. doi:10.2135/cropsci1966.0011183X000600010011x
- Freire Filho, F.R., V.Q. Ribeiro, M.M. Rocha, K.J.D. Silva, M.S.R. Nogueira, and E.V. Rodrigues. 2011. Feijão-caupi: Produção, melhoramento genético, avanços e desafios. (In Portuguese.) Embrapa Meio-Norte, Teresina, Brazil.
- Freire Filho, F.R., M.M. Rocha, V.Q. Ribeiro, and I.M. Sitollin. 2008. Avanços e perspectivas para a cultura do feijão-caupi. (In Portuguese.) In: A.C.S. Albuquerque and A.G. da Silva, editors, *Agricultura tropical: Quatro décadas de inovações tecnológicas, institucionais e políticas*. Vol. 1. Embrapa Informação Tecnológica, Brasília, Brazil. p. 250–285.
- Lin, C.S., and M.R. Binns. 1988. A superiority measure of cultivar performance for cultivar x location data. *Can. J. Plant Sci.* 68:193–198. doi:10.4141/cjps88-018
- Mano, A.R.O. 2009. Adaptabilidade e estabilidade fenotípica de cultivares de feijão-de-corda. (In Portuguese.) Ph.D. diss., Univ. Federal do Ceará, Fortaleza, Brazil.
- Moura, J.O., M.M. Rocha, R.L.F. Gomes, F.R. Freire Filho, and K.J.D. Silva. 2012. Path analysis of iron and zinc contents and others traits in cowpea. *Crop Breed. Appl. Biotechnol.* 12:245–252. doi:10.1590/S1984-70332012000400003
- Nunes, H.F., F.R. Freire Filho, V.Q. Ribeiro, and R.L.F. Gomes. 2014. Grain yield adaptability and stability of blackeyed cowpea genotypes under rainfed agriculture in Brazil. *Afr. J. Agric. Res.* 9:255–261. doi:10.5897/AJAR212.2204

- Nutti, M.R., M.M. Rocha, E. Watanabe, J.L.V. Carvalho, F.R. Freire Filho, and K.J.D. Silva. 2009. Biofortificação de feijão-caupi no Brasil. (In Portuguese.) In: Congresso nacional de feijão-caupi. Da agricultura de subsistência ao agronegócio: Anais, Belém, Brazil. 24–28 Aug. 2009. Embrapa Amazônia Oriental, Belém. p. 26–38.
- Oliveira O. M. S., J. F. Silva, J. R. P. Gonçalves, and C. S. Klehm. 2010. Período de convivência das plantas daninhas com cultivares de feijão-caupi em várzea no Amazonas. (In Portuguese, with English abstract.) *Planta Daninha* 28:523–530. doi:10.1590/S0100-83582010000300009.
- Pereira, H.S., L.C. Melo, M.J. Del Peloso, L.C. Faria, J.G.C. Costa, J.L. Cabrera Díaz et al. 2009. Comparison of methods for phenotypic adaptability and stability analysis in common bean. *Pesq. Agropecu. Bras.* 44:374–383. doi:10.1590/S0100-204X2009000400007
- Polizel, A.C., F.C. Juliatti, O.T. Hamawaki, R.L. Hamawaki, and S.L. Guimarães. 2013. Adaptabilidade e estabilidade fenotípica de genótipos de soja no estado do Mato Grosso. *Biosci. J.* 29:910–920.
- Rios, A.S., K.R. Alves, N.M.B. Costa, and H.S.D. Martin o. 2009. Biofortificação: Culturas enriquecidas em micronutrientes pelo melhoramento genético. (In Portuguese.) *Rev. Ceres* 56:713–718.
- Rocha, M.M., F.R. Freire Filho, V.Q. Ribeiro, H.W.L. Carvalho, J. Belarmino Filho, J.A.A. Raposos et al. 2007. Adaptabilidade e estabilidade produtiva de genótipos de feijão-caupi de porte semi-ereto na região Nordeste do Brasil. (In Portuguese, with English abstract.) *Pesquisa Agropecu. Bras.* 42:1283–1289. doi:10.1590/S0100-204X2007000900010
- Santos, C.A.F. 2013. Melhoramento de linhagens de feijão-caupi com altos teores de proteínas e minerais nas sementes para o Vale do São Francisco. (In Portuguese.) In: Congresso nacional de feijão-caupi, 3, Recife, Pernambuco, Brazil. 22–24 Apr. 2013. Inst. de Pesquisa Agropecuária, Recife, Pernambuco. <http://docplayer.com.br/21345561-Melhoramento-de-linhagens-de-feijao-caupi-com-altos-teores-de-proteinas-e-minerais-nas-sementes-para-o-vale-do-sao-francisco.html> (accessed 14 Sept. 2017).
- Santos, C.A.F., G.A.A. Barros, I.C.C.N. Santos, and M.G.S. Ferraz. 2008. Comportamento agrônomico e qualidade culinária de feijão-caupi no Vale do São Francisco. (In Portuguese, with English abstract.) *Hortic. Bras.* 26:404–408. doi:10.1590/S0102-05362008000300023
- Santos, C.A.F., and L.S. Boiteux. 2013. Breeding biofortified cowpea lines for semi-arid tropical areas by combining higher seed protein and mineral levels. *Genet. Mol. Res.* 12:6782–6789. doi:10.4238/2013.December.16.4
- SAS Institute. 1989. SAS/STAT user's guide, version 6. 4th ed. Vol. 1. SAS Inst., Cary, NC.
- Scott, A., and M. Knott. 1974. Cluster-analysis method for grouping means in analysis of variance. *Biometrics* 30:507–512. doi:10.2307/2529204
- Silva, W.C.J., and J.B. Duarte. 2006. Métodos estatísticos para estudo de adaptabilidade e estabilidade fenotípica em soja. (In Portuguese, with English abstract.) *Pesquisa Agropecu. Bras.* 41:23–30. doi:10.1590/S0100-204X2006000100004
- Singh, B.B. 2006. Cowpea breeding at IITA: Highlights of advances impacts. In: Congresso Nacional de Feijão-Caupi, 1/Reunião Nacional de Feijão-Caupi, Teresina, Piauí, Brazil. 23–24 May 2006. Tecnologias para o agronegócio. Embrapa Meio-Norte, Teresina, Piauí.
- Vencovsky, R., and P. BARRIGA. 1992. Genética biométrica no fitomelhoramento. (In Portuguese.) *Soc. Bras. Genét., Ribeirão Preto.*

Full Length Research Paper

Adaptability and stability parameters for potassium and calcium contents and grain yield in cowpea lines

Danillo Olegario Matos da Silva^{1*} and Carlos Antonio Fernandes Santos²

¹Programa de Pós-graduação em Recursos Genéticos Vegetais, Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS), Avenida Transnordestina, SN, Novo Horizonte, 44.036-900, Feira de Santana-BA, Brazil.

²Embrapa Semiárido. CP 23, CEP 56302-970, Petrolina-PE, Brazil.

Received 4 August, 2016; Accepted 26 August, 2016

The aim of the present study is to estimate the adaptability and stability of K and Ca contents, and grain yield in cowpea lines for release as new cultivars. Forty-four inbred lines and cultivars were assessed in seven sites of the Brazilian semi-arid region. Significant statistical differences were observed in the treatment, environments and environment treatment interaction mean squares for all variables. The methods by Eberhart and Russell (1966), Lin and Binns (1988), and the additive main effects and multiplicative interaction (AMMI) showed similar results in the selection of superior materials. The C4I and C3O lines showed grain yield equal to or greater than the overall mean of 1050 kg ha⁻¹ in the experiments, with mean of K and Ca higher than the values of the assessed cultivars, as well as wide stability and good predictability in the assessed environment series. The lines showed great potential to be released as new cultivars in the Brazilian semiarid region.

Key words: *Vigna unguiculata*, additive main effects and multiplicative interaction (AMMI), biofortification, genotype×environment interaction.

INTRODUCTION

In Brazil, cowpea cultivation has become a major social and economic alternative for rural populations in the North and Northeast regions, and its cultivation has expanded to other regions in the country (Oliveira et al., 2010). Besides that, the nutritional and functional benefits of cowpea have gained industrial importance for use as a potential ingredient for food formulations (Hamid et al., 2014). Currently, introduction of biofortified agricultural products containing high protein and mineral levels is considered an important component in breeding programs focused on eliminating human malnutrition (Santos and Boiteux, 2013).

The nutritional deficiency in food has affected many poor families, particularly in developing countries (Bouis and Welch, 2010). According to FAO (2014), it is estimated that approximately 805 million people were chronically undernourished and that they did not have access to daily protein and carbohydrate intake recommended by the World Health Organization (WHO). According to Nutti et al. (2009), biofortification is a strategy used in agriculture to improve the health of the poor populations and it is an additional tool to combat nutrient deficiency. Cowpea presents great variability in the chemical composition of the grains and it enables the selection of

*Corresponding author. E-mail: danilloolegario@hotmail.com.

Author(s) agree that this article remain permanently open access under the terms of the [Creative Commons Attribution License 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

genotypes with high nutritional contents. Singh (2007) evaluated fifty cowpea lines and noted that the potassium content ranged from 12.7 to 16.2 g kg⁻¹ and calcium content from 0.54 to 1.33 g kg⁻¹. Santos and Boiteux (2013) studying eighty-seven cowpea lines found K content from 21 to 27 g kg⁻¹ and Ca content from 0.41 to 6.26 g kg⁻¹. These minerals are of great importance for human health. Ca is essential for muscle contraction, nervous system function, blood vessel expansion and contraction, and secretion of hormones and enzymes (McDowell, 1992). Potassium is the third most abundant mineral in the human body and is essential to human life (COMA, 1991).

In the selection phase of cowpea lines, the same line may have different behavior according to the year and place of cultivation. According to Cruz et al. (2012), this difference is often influenced by various environmental conditions treated as genotype×environment interaction (G×E). An alternative to minimize the influence of this interaction is to evaluate genotypes in many environments and apply methods to classify and select them according to their adaptability and stability.

The methods of adaptability and stability analysis are very helpful to identify stable and predictably genotypes in the presence of G×E (Silva and Duarte, 2006). Several adaptability and stability methods used to estimate the contribution of each genotype to the interaction stand out in the literature. Methods based on linear regression (Eberhart and Russell, 1966), non-parametric analysis (Lin and Binns, 1988) and the multiplicative based on principal components of additive main effects and multiplicative interaction (AMMI) have been the most used in the selection of cowpea genotypes with high productivity (Barros et al., 2013; Mano, 2009; Nunes et al., 2014). Differently from studies on grain yield, adaptability and stability studies related to the mineral content in cowpea are still scarce in the literature.

The aim of the current study was to estimate the adaptability and stability parameters of grain yield and mineral production in cowpea seeds, in two experiments assessed in seven irrigated or rainfed environments, in order to enable the recommendation and registration of new cultivars for São Francisco Valley region.

MATERIALS AND METHODS

Plant material

Cowpea lines selected due to their high mineral content and grain yield were assessed. The lines resulted from the crossing between three introduced accessions of the International Institute for Tropical Agriculture (IITA) and three cultivars adapted to the Brazilian semiarid region, according to the procedures described by Santos and Boiteux (2013). The selected lines composed of two experiments, according to the plant size type: I) semi-climbing habit and indeterminate growth (SCH), with 23 treatments - 20 lines (C2R, C3S, C3M, C3Q, C3B, C6P, C1M, C3F, C3L, C2C, C1T, C3R, C4G, C6A, C2T, C3P, C6D, C1V, C4I and T16_2R) and three control cultivars (BRS Acauã, BRS Pujante and Canapu landrace),

and II) upright cowpea plants with determinate growth (UDG), with 21 treatments - 18 lines (C1N, C1R, C3O, C2I, C1G, C1S, C2J, C1J, C1F, C2O, C2S, C2B, C2A, C2Q, C1O, C1I, C2M and Marrom) and three control cultivars (BRS Carijó, BRS Tapaihum and Canapu landrace).

The experiments were conducted in the Brazilian States of Bahia, Ceará, Pernambuco and Piauí. The study adopted a randomized block experimental design with three replications in three irrigated environments, in the second half of the year, and four rainfed environments, in the first half of the year. Each plot had 3.0×2.0 m dimension. The experimental plot of the SCH experiment was formed by two rows, with 1.0 m space between rows and 0.1 m between plants, and it resulted in the population density of 100,000 plants per hectare. On the other hand, the experimental plot of the UDG experiment was formed by four rows, with 0.5 m space between rows and 0.1 m between plants, and it led to the population density of 200,000 plants per hectare.

Mineral quantification

Approximately 10 g of seeds from 924 plants were ground in a MA 630/1 mill (Marconi, Brazil) in order to obtain fine flour from each sample. The samples were analyzed in duplicate, according to the standard procedures of the Association of Official Analytical Chemists (AOAC, 1995). Five milliliters of nitric acid and 1 ml perchloric acid were added to each 500 mg of cowpea sample for acid digestion, which was carried out in a block digester. One milliliter of extract was transferred to a 50 ml beaker, identified by the sample protocol number, and 49 ml lanthanum oxide was added. The quantification samples were subjected to reading in flame atomic absorption spectrophotometer (Varian). The results were expressed in g kg⁻¹ for potassium and calcium of grain dry matter. All the analyses were carried out in the soil laboratory of Semi-Arid Embrapa.

Statistical analyses

The statistical analyses of the experimental designs were performed in the SAS software (SAS, 1989), according to the GLM procedure (SAS, 1989). The grain yield was corrected in the SAS (1989) software, through covariance method, using the average plant stand of the plots in each experiment, as it was described by Vencovsky and Barriga (1992). Scott and Knott's (1974) clustering was applied at 5% of significance. The adaptability and stability of genotypes were assessed through the methods developed by Eberhart and Russell (1966) and Lin and Binns (1988) in the Genes software (Cruz, 2006), as well as by the multiplicative method based on principal components (AMMI), using the SAS software (1989) as described by Duarte and Vencovsky (1999).

According to the method by Eberhart and Russell (1966), the regression coefficient is associated with the linear component, and it indicates genotype adaptability; genotypes with index $\beta_i = 1$ has wide adaptability; deviations from the regression equal to zero ($\sigma^2_{\beta_i} = 0$) indicate good stability. According to the method by Lin and Binns (1988), the Pi parameter defines the genotype stability as the mean square of the distance between the mean of a genotype and the maximum mean response of all locations. Genotypes with lower Pi values correspond to those with better performance.

The AMMI methodology stands out because it best describes the G×E interaction through the disposal of additional noises found in traditional interaction estimates. It uses together the variance analysis of the main effects of genotypes and environments and the principal component analysis (PCA) of the interaction. It also identifies the most stable and adaptable genotypes and performs the agronomic zoning of the environments (Duarte and Vencovsky, 1999).

Table 1. Treatment mean squares (TMS), residual mean squares (RMS), means and coefficient of variation (CV) related to yield, and potassium and calcium contents in 20 lines and three control cultivars (SCH experiment – semi-climbing habit) and in 17 lines and four cowpea cultivars (UDG experiment – upright cowpea plants with determined growth) assessed in seven irrigated and rainfed environments.

Locality	Yield				Potassium				Calcium			
	TMS	RMS	Mean	CV	TMS	RMS	Mean	CV	TMS	RMS	Mean	CV
SCH Experiment												
Acauã	87189**	42345	684	30.0	3.5**	1.4	15.1 ^b	7.8	0.2	0.11	1.3 ^a	25.9
Petrolina A	306194**	57712	1322	18.1	7.9**	3.1	14.8 ^b	11.9	0.0*	0.02	0.8 ^c	17.2
Petrolina B	90050**	32140	727	24.6	3.2	3.7	14.9 ^b	12.9	0.1	0.06	1.1 ^b	22.1
Dormentes	355248**	60272	689	35.6	19.6**	5.4	14.7 ^b	15.8	0.1**	0.04	0.9 ^c	21.3
Limoeiro	278796**	114883	2192	15.4	15.0**	3.1	14.9 ^b	11.8	0.4*	0.15	1.1 ^b	33.6
Juazeiro	202060*	97575	729	42.8	5.5*	2.7	14.9 ^b	11.0	0.7**	0.07	1.3 ^a	20.7
Petrolândia	259048**	81818	897	31.8	5.9**	1.5	15.7 ^a	7.9	0.1**	0.03	1.2 ^a	14.9
UDG Experiment												
Acauã	86308	78306	1087	25.7	1.6*	0.7	14.5 ^b	6.0	0.03	0.02	0.9 ^b	18.8
Petrolina A	121491*	62900	1697	14.7	5.3*	2.3	16.2 ^a	9.4	0.04*	0.02	0.8 ^b	16.8
Petrolina B	52592*	28273	734	22.9	3.4	3.4	14.1 ^c	13.1	2.20*	0.01	0.8 ^b	16.1
Dormentes	653413**	75526	887	30.9	2.5	1.8	14.0 ^c	9.6	0.05	0.03	0.9 ^b	21.5
Limoeiro	398371**	102030	2057	15.5	11.4**	4.3	14.8 ^b	14.0	0.24	0.04	0.8 ^b	24.5
Juazeiro	116106	83516	806	35.8	3.7*	1.9	14.6 ^b	9.5	0.75**	0.08	1.1 ^b	26.3
Petrolândia	98114	71214	692	38.5	5.2	3.9	16.4 ^a	12.1	0.16**	0.05	1.2 ^a	19.2

Values followed by the same letter in the column belong to the same group, according to the Scott and Knott test (1974) at 5% probability; **, * Significant at 1 and 5%, respectively, according to the F test.

RESULTS AND DISCUSSION

Cowpea lines of semi-climbing habit (SCH)

Statistically significant differences were observed in the mean squares of the treatments, for the grain yield and the potassium and calcium contents in most environments, except for the potassium and calcium contents in the Bebedouro environment, and for calcium content in the Acauã environment. The experiments in Acauã, Dormentes, Limoeiro and Petrolândia were conducted on farming properties. Such fact did not compromise the assessments as the variation coefficients were below 43% (Table 1) and allowed making the assessments in environments that represent the cowpea cultivation.

The Limoeiro environment showed the highest mean grain yield (Table 1), indicating the yield potential of the assessed lines. As it was observed in Limoeiro, some of them may exceed 3,000 kg ha⁻¹ grain yield under high technology conditions. As for the minerals, the Petrolândia environment showed the highest mean potassium and calcium content.

The relations between the largest and smallest mean squared residuals observed in experiment were below or close to seven for all variables, and it indicated homogeneity in the residual variances, which is a required condition for the joint analysis of experiment (Cruz and

Regazzi, 1997). The grain yield means in the three irrigated environments was 84% higher than the means found in the four rainfed environments (Table 1). This result corroborated those reported by Santos et al. (2008). However, the means of the assessed minerals showed similar values, regardless of the adopted handling, whether with or without irrigation.

The BRS Acauã cultivar showed the highest grain yield (Table 2). This cultivar was previously assessed in the same locations the lines of the current research were done (except for Limoeiro) and was selected exclusively for grain yield and earliness (Santos et al., 2008). The C3R and C3B lines presented grain yield close to that of the BRS Acauã control cultivar, as well as wide adaptability and good stability parameters through both the Eberhart and Russell (1966) and the Lin and Binns (1988) methods (Table 2).

The C2C, C3P, C6D, C1V, C4I e T16_2R lines showed the highest mean K contents. The Eberhart and Russell (1966) method highlighted the C6D and C1V lines with wide adaptability and stability. The Lin and Binns (1988) method highlighted the C4I, C6D and C1V lines with the lowest Pi values. C1T, C6A, C2T and C4I lines showed the highest mean Ca contents and all showed unpredictable stability and only C1T presented broad adaptability by the Eberhart and Russell (1966) method. The Lin and Binns (1988) method were very different from Eberhart and Russell (1966) results, highlighting C4I

Table 2. Yield, potassium and calcium stability and adaptability in 20 lines and three cowpea control cultivars -semi-climbing habit (SCH) - assessed in seven irrigated and rainfed environments using the methods by Eberhart and Russell (1966) and Lin and Binns (1988).

Genotype	Yield				Potassium				Calcium			
	E&R		L&B		E&R		L&B		E&R		L&B	
	β_0	β_1	σ_{dii}	Pi	β_0	β_1	σ_{dii}	Pi	β_0	β_1	σ_{dii}	Pi
C2R	886	1.3*	37767*	344349 ⁽²³⁾	13.4 ^c	-2.1*	0.90	18.4 ⁽²³⁾	0.9 ^c	0.6	-0.01	0.7 ⁽²³⁾
C3S	904	1.0	16770	305069 ⁽¹⁹⁾	13.9 ^c	-2.5**	5.35**	17.0 ⁽²²⁾	1.2 ^b	0.4	0.14**	0.5 ⁽¹³⁾
C3M	1150	0.9	-10959	152055 ⁽⁵⁾	14.7 ^b	0.0	0.32	12.1 ⁽¹⁶⁾	1.0 ^c	0.9	0.01	0.5 ⁽¹⁵⁾
C3Q	1021	1.2	40905*	219184 ⁽⁸⁾	13.5 ^c	1.4	-0.07	16.0 ⁽²¹⁾	1.2 ^b	0.5	-0.01	0.5 ⁽¹²⁾
C3B	1214	0.9	21638	144688 ⁽⁴⁾	15.2 ^b	3.8*	2.22**	13.4 ⁽¹⁹⁾	1.1 ^b	0.8	-0.00	0.5 ⁽¹⁴⁾
C6P	1011	0.9	-2161	224767 ⁽⁹⁾	14.6 ^b	2.6	2.90**	11.7 ⁽¹⁵⁾	1.1 ^b	0.4	-0.00	0.6 ⁽²⁰⁾
C1M	959	1.4**	58313**	301820 ⁽¹⁸⁾	15.3 ^b	2.0	0.93	8.3 ⁽⁶⁾	1.2 ^b	1.5	0.00	0.4 ⁽⁴⁾
C3F	883	0.8	1281	315024 ⁽²¹⁾	15.1 ^b	1.9	0.24	10.1 ⁽¹⁰⁾	1.2 ^b	0.8	0.01	0.5 ⁽⁸⁾
C3L	950	1.0	-22570	249086 ⁽¹³⁾	15.0 ^b	2.4	-0.12	10.8 ⁽¹²⁾	1.1 ^b	0.5	-0.01	0.5 ⁽¹⁶⁾
C2C	968	1.3*	29413	287946 ⁽¹⁶⁾	16.0 ^a	1.6	0.21	6.4 ⁽³⁾	1.1 ^b	1.0	-0.01	0.5 ⁽⁹⁾
C1T	901	1.1	50964*	331871 ⁽²²⁾	14.4 ^b	2.1	0.69	14.0 ⁽²⁰⁾	1.3 ^a	0.9	0.06**	0.4 ⁽⁵⁾
C3R	1228	0.8	-6056	125105 ⁽²⁾	14.8 ^b	2.9	1.31*	11.2 ⁽¹³⁾	1.1 ^b	1.1	0.01	0.5 ⁽¹¹⁾
C4G	1023	0.7*	27058	251814 ⁽¹⁴⁾	14.6 ^b	2.4	2.21**	12.6 ⁽¹⁸⁾	1.0 ^c	0.8	0.01	0.7 ⁽²¹⁾
C6A	883	0.8	30778*	310255 ⁽¹³⁾	14.9 ^b	1.8	0.12	9.0 ⁽⁹⁾	1.4 ^a	1.9**	0.09**	0.2 ⁽³⁾
C2T	934	0.9	6603	293622 ⁽¹⁷⁾	15.2 ^b	1.4	0.07	8.6 ⁽⁷⁾	1.5 ^a	1.5	0.11**	0.2 ⁽²⁾
C3P	1055	0.7*	27301	239393 ⁽¹¹⁾	16.0 ^a	-0.7	-0.75	6.7 ⁽⁴⁾	1.1 ^b	1.3	0.02	0.5 ⁽⁷⁾
C6D	990	0.9	43453*	256330 ⁽¹⁵⁾	15.9 ^a	1.0	-0.51	6.0 ⁽²⁾	1.2 ^b	1.0	0.04*	0.5 ⁽¹⁷⁾
C1V	1019	1.2	64770**	243650 ⁽¹²⁾	15.8 ^a	-0.3	-0.67	7.0 ⁽⁵⁾	1.1 ^b	1.7*	0.01	0.4 ⁽⁶⁾
C4I	1102	1.0	-4448	171894 ⁽⁶⁾	17.1 ^a	-4.3**	11.77**	1.1 ⁽¹⁾	1.7 ^a	3.5**	0.20**	0.1 ⁽¹⁾
T16_2R	1171	1.0	69547**	131728 ⁽³⁾	15.8 ^a	1.2	1.94*	10.2 ⁽¹¹⁾	1.0 ^c	-0.8**	0.06**	0.6 ⁽²⁰⁾
Acauã	1341	1.0	112508**	63731 ⁽¹⁾	15.5 ^b	1.7	1.24	11.4 ⁽¹⁴⁾	1.3 ^a	0.6	0.03	0.5 ⁽¹⁰⁾
Pujante	1050	0.8	185586**	226464 ⁽¹¹⁾	15.4 ^b	1.0	-0.81	8.8 ⁽⁸⁾	1.1 ^b	0.6	-0.01	0.5 ⁽¹⁸⁾
Canapu	1153	0.5**	175495**	184265 ⁽⁷⁾	14.8 ^b	1.7	1.17	12.4 ⁽¹⁷⁾	0.9 ^c	0.5	-0.00	0.7 ⁽²²⁾
Mean			1034				15.08				1.15	

Values followed by the same letter in the column belong to the same group, according to the Scott and Knott test (1974) at 5% probability; **, * significant at 1 and 5%, respectively, according to the F-test.

line with the lowest Pi values, with better performance for calcium content (Table 2).

The genotype×environment interaction was decomposed in six principal components of the interaction (PCI) using the multivariate AMMI method. However, only the first axis (PCI1) showed significant residuals in the F_T test ($p < 0.01$). Thus, the graphic interpretation of adaptability and stability was performed through the PCI1 alone, via AMMI1 biplot. Similar results were found by Barros et al. (2013) who assessed cowpea yield.

The first principal component of the interaction explained 49.78, 36.12 and 45.50% of grain yield and of K and Ca contents respectively in the SCH experiment (Table 4). BRS Acauã was the most stable environment and Limoeiro was the most productive for grain, although with high instability. The C3M and C3R were the most stable genotypes for grain yield (Figure 1). Petrolândia showed the lowest mean K content and was the most stable environment. The C3B, C4I and C3R genotype showed high stability and mean K content higher than that of the assessed cultivars. The Acauã environment

was the most favorable to Ca content and the C4I, C2T and C6A, which showed the highest means, were also the most stable genotypes (Figure 1).

Cowpea lines of upright with determined growth (UDG)

Statistical significant differences were observed in the mean squares of the treatments for the grain yield, and the potassium and calcium contents. Three environments for each variable showed no statistical differences in mean squares of the treatments (Table 1). The experiments in Acauã, Dormentes, Limoeiro and Petrolândia were conducted in farming properties. Such fact did not compromise the assessments as the variation coefficients were below 39% (Table 1), which allowed making the assessments in environments that represented the species cultivation. The Limoeiro environment showed the highest mean grain yield (Table 1).

Table 3. Yield, potassium and calcium stability and adaptability in 17 lines and four cowpea cultivars – upright cowpea plants with determined growth (UDG) - assessed in seven irrigated and rainfed environments using the methods by Eberhart and Russell (1966) and Lin and Binns (1988).

Genotype	Yield				Potassium				Calcium			
	β_o	E&R		L&B	β_o	E&R		L&B	β_o	E&R		L&B
		β_i	σ_{dii}	Pi		β_i	σ_{dii}	Pi		β_i	σ_{dii}	Pi
C1N	1170	1.2	-55352	269488 ⁽⁹⁾	14.7 ^b	0.9	-0.55	4.7 ⁽¹¹⁾	0.9 ^b	0.4	0.00	0.4 ⁽¹⁴⁾
C1R	1044	0.9	-3561	372225 ⁽¹⁸⁾	14.6 ^b	0.6	-0.08	5.4 ⁽¹⁷⁾	1.0 ^b	1.2	0.02*	0.2 ⁽⁴⁾
C3O	1203	0.4*	-5183	235209 ⁽⁷⁾	16.6 ^a	1.7	0.33	0.7 ⁽¹⁾	1.1 ^a	2.4**	0.09**	0.1 ⁽²⁾
C2I	953	0.9	-53143	404583 ⁽¹⁹⁾	14.4 ^b	0.9	0.42	5.7 ⁽¹⁹⁾	1.3 ^a	2.7**	0.33**	0.1 ⁽¹⁾
C1G	1129	1.0	-42325	304343 ⁽¹¹⁾	14.8 ^b	1.1	1.54*	5.0 ⁽¹⁵⁾	0.9 ^b	0.8	-0.01	0.3 ⁽¹¹⁾
C1S	1107	0.9	-28073	344578 ⁽¹⁴⁾	14.2 ^b	0.6	0.21	6.6 ⁽²⁰⁾	0.8 ^c	0.7	-0.01	0.4 ⁽²⁰⁾
C2J	1129	1.2	43212	202587 ⁽⁴⁾	14.3 ^b	0.7	-0.31	5.5 ⁽¹⁸⁾	0.9 ^b	0.9	-0.00	0.3 ⁽¹²⁾
C1J	1121	1.0	-38895	249457 ⁽⁸⁾	14.7 ^b	0.9	-0.27	4.7 ⁽¹²⁾	1.0 ^b	0.7	0.01	0.2 ⁽⁵⁾
C1F	1111	1.1	-45872	322260 ⁽¹²⁾	14.8 ^b	1.6	0.79	5.1 ⁽¹⁶⁾	0.8 ^c	0.4	0.01	0.4 ⁽¹⁹⁾
C2O	1243	1.1	-46357	232238 ⁽⁶⁾	14.5 ^b	1.2	-0.57	4.7 ⁽¹⁰⁾	1.1 ^a	1.2	0.01	0.2 ⁽³⁾
C2S	1196	0.9	-45261	276386 ⁽¹⁰⁾	15.4 ^a	1.1	2.48**	3.7 ⁽⁸⁾	1.0 ^b	1.5	0.00	0.3 ⁽⁷⁾
C2B	1009	0.6	71955	496665 ⁽²¹⁾	14.0 ^b	1.1	1.80*	8.1 ⁽²¹⁾	1.0 ^b	-0.4**	0.11**	0.3 ⁽⁸⁾
C2A	1111	1.2	-25378	329596 ⁽¹³⁾	15.4 ^a	1.4	0.03	2.7 ⁽⁴⁾	1.0 ^b	2.3**	0.09**	0.4 ⁽¹³⁾
C2Q	1032	1.0	-46745	364971 ⁽¹⁶⁾	15.6 ^a	1.5	0.42	2.4 ⁽²⁾	0.9 ^b	1.2	0.02*	0.4 ⁽¹⁵⁾
C1O	1022	0.8	-57381	367170 ⁽¹⁷⁾	15.2 ^a	0.4	0.04	3.8 ⁽⁹⁾	0.9 ^b	0.6	0.02*	0.4 ⁽¹⁸⁾
C1I	1078	0.8	-26876	353772 ⁽¹⁵⁾	15.1 ^a	1.1	1.32*	3.6 ⁽⁷⁾	0.8 ^c	1.0	0.02*	0.3 ⁽⁹⁾
C2M	893	0.9	-35771	479205 ⁽²⁰⁾	15.4 ^a	1.2	-0.14	2.7 ⁽³⁾	1.0 ^b	-0.0**	0.09**	0.3 ⁽⁶⁾
Marrom	1307	1.4	6935	185480 ⁽³⁾	15.1 ^a	0.5	-0.27	3.6 ⁽⁶⁾	0.8 ^c	0.4	0.00	0.5 ⁽²¹⁾
Carijó	1344	0.9	-893	135731 ⁽²⁾	14.5 ^b	0.8	-0.18	4.9 ⁽¹⁴⁾	0.8 ^c	0.8	-0.01	0.4 ⁽¹⁶⁾
Tapaihum	1323	1.4	-15169	123155 ⁽¹⁾	15.2 ^a	0.1*	3.17**	4.8 ⁽¹³⁾	0.9 ^b	0.7	0.00	0.4 ⁽¹⁷⁾
Canapu	1211	0.5*	493790	228627 ⁽⁵⁾	15.4 ^a	1.1	0.92**	3.3 ⁽⁵⁾	0.9 ^b	1.2	0.02*	0.3 ⁽¹⁰⁾
Mean			1130				14.96				0.95	

Values followed by the same letter in the column belong to the same group, according to the Scott and Knott test (1974) at 5% probability; **, * Significant at 1 and 5, respectively, according to the F-test.

As in the previous experiment, relations between larger and smaller squares of the residues observed were below or close to seven in all variables. The grain yield means in the three irrigated environments was 45% higher than the means found in the four rainfed environments (Table 1). This result corroborated those reported by Santos et al. (2008). However, the means of the assessed minerals showed similar values, regardless of the adopted handling, whether with or without irrigation.

The BRS Carijó and BRS Tapaihum cultivars showed the highest grain yields (Table 3). This cultivars were previously assessed in the same locations the lines of the current research were (except for Limoeiro) and were selected exclusively for grain yield and earliness (Santos et al., 2008). The C2O line presented grain yield close to that of the BRS Carijó e BRS Tapaihum control cultivar, as well as wide adaptability and good stability parameters, through both the Eberhart and Russell (1966) and the Lin and Binns (1988) methods (Table 3).

The C3O showed the highest K content, with wide adaptability by Eberhart and Russell method (1966). Lin and Binns (1988) highlighted the C3O line with the lowest

Pi value for K (Table 3). For the Ca content, the C2O showed average greater than experiment mean and wide adaptability and good stability by Eberhart and Russell (1966). By the Lin and Binns (1988) method C3 and C2I presented the lowest Pi values for Ca content (Table 3).

The genotype \times environment interaction was decomposed in six principal components of the interaction (PCI) using the multivariate AMMI method. However, only the first axis (PCI1) showed significant residuals in the F_r test ($p < 0.01$). Thus, the graphic interpretation of adaptability and stability was performed through the PCI1 alone, via AMMI1 biplot.

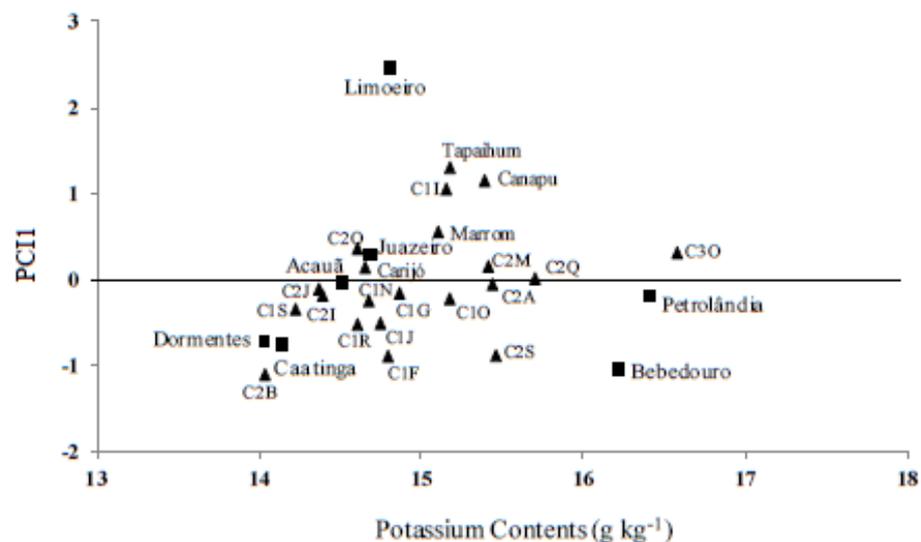
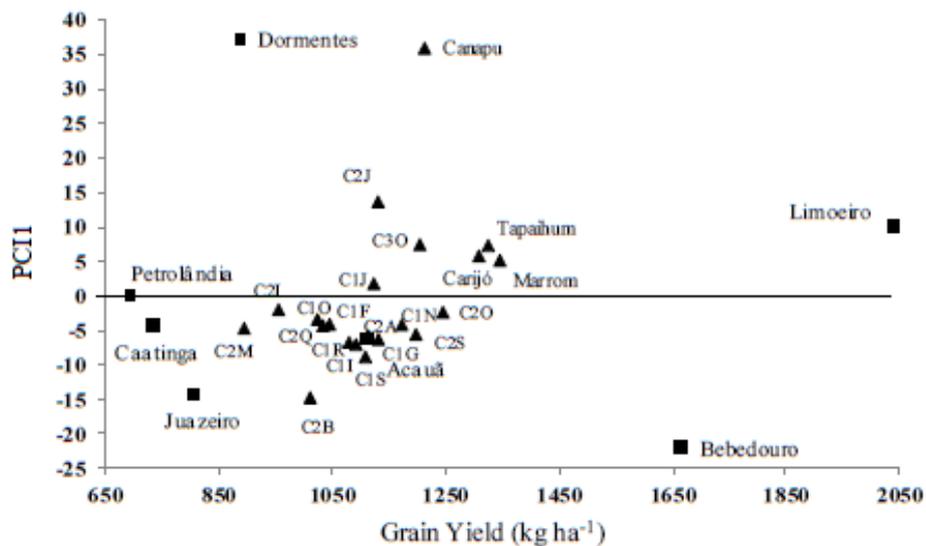
The first principal component of the interaction explained 54.46% grain yield, as well as 39.80% K and 46.96% Ca contents (Table 4). Petrolândia was the most stable environment and showed the lowest mean yield. The C2O stood out among the lines in the AMMI method due to high stability and mean yield close to that of the cultivars. The C3O line showed high K content stability. Bebedouro and Petrolândia were the most favorable environments. The C2I, C2A and C3O lines showed the highest mean Ca contents and good stability (Figure 2).

The methods by Eberhart and Russell (1966), Lin and

Table 4. Joint analysis of variance related to grain yield, and potassium and calcium levels in 20 lines and three cultivars (SCH Experiment –semi-climbing habit) and in 17 lines and four cowpea cultivars (UDG experiment – upright cowpea plants with determined growth) assessed in seven irrigated and rainfed environments.

Source of variation	Mean square							
	SCH Experiment				SCH Experiment			
	df	Yield	Potassium	Calcium	df	Yield	Potassium	Calcium
Genotype (G)	22	328825*	15.14**	0.64**	20	366806*	7.11**	0.29**
Environment (A)	6	20986713*	7.47*	2.07**	6	17240794*	58.08**	1.26**
G x A	132	209439**	7.54**	0.19**	120	200801**	4.38**	0.17**
PCI1	27	517149**	12.92*	0.45**	25	599283**	8.37*	0.61**
Residual _{AMM1}	105	134136	5.87	0.14	95	131874	3.33	0.18
PCI1%		49.78	36.12	45.50		54.46	39.80	46.96
CV(%)		26.2	11.59	23.44		27.6	11.08	22.00

**,* Significant at 1 and 5%, respectively, according to the F test.



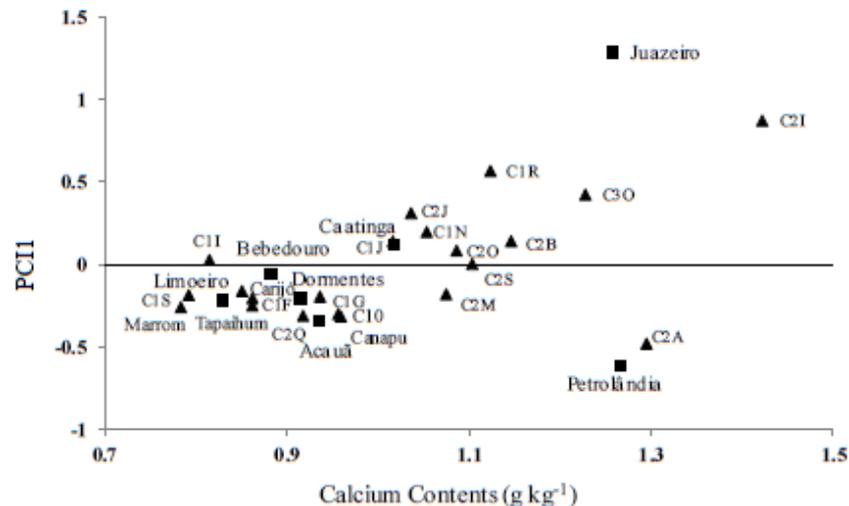


Figure 2. AMMI biplot for grain yield, potassium and calcium contents in 17 lines and four (▲) cowpea cultivars (*Vigna unguiculata*) of upright and determined growth assessed in seven (■) irrigated and rainfed environments.

Binns (1988), and the AMMI method showed similar results in the selection of superior materials, except for Ca content. Polizel et al. (2012) used seven methods to test 16 soybean genotypes in different environments. They found that the studied methods showed consistent and complementary results. Nunes et al. (2014), using parametric and non-parametric methods in 20 genotypes of cowpea found that some methods should not be used simultaneously, and those others should be complementary.

Cowpea is broadly grown in semi-arid regions due to its tolerance to water stress and substantial grain yield in comparison to other legumes such as common beans, lentils and chickpeas. Accordingly, the selection of superior cultivars through the combination of high yield and seed mineral content, and good adaptability and stability under different environmental conditions will have a huge positive impact on cowpea production-market chains, mainly in semi-arid regions.

Selection approaches have been being applied in many crop plants aiming to biofortify food crops with essential mineral elements most commonly lacking in human diets (White and Broadly, 2009). However, current efforts to select and release cowpea cultivars with high mineral content associated with good agronomic performance based on adaptability and stability parameters are still very restricted, even for important commodities, such as soybean. To our knowledge, the present study is the first one conducted to estimate adaptability and stability parameters for K and Ca contents in cowpea lines.

The C4I and C30 lines showed grain yields equal to or greater than the means of the experiments, high

potassium and calcium means, wide stability and good predictability in the series of assessed environments, by the Eberhart and Russell (1966), Lin and Binns (1988) and the AMMI methods. The BRS Acauã, BRS Tapaihum and BRS Carijó, with the highest grain yield, should be used for crossing with C4I, C30, C2I and C2T for selection of lines with higher grain yield, potassium and calcium contents, simultaneously.

Conclusion

The C4I lines cowpea, with semi-climbing habit, and C30 lines cowpea, with upright and determinate growth, identified in representative environments in the Brazilian semiarid region, both irrigated and rainfed conditions, have great potential to be recommended as new cultivars for the region, as grain yields were close to commercial cultivars, as well as potassium and calcium contents were greater than the average of the cowpea cultivar experiments.

Conflict of Interests

The authors have not declared any conflict of interests.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors thank *Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico* (CNPq) for financial support. Danilo O.M. da Silva has a CAPES

scholarship. Carlos A.F. Santos is a CNPq productivity researcher.

Abbreviations

DSUG, Genotypes with determinate and semi upright growth; **ISCG**, genotypes with indeterminate and semi-climbing growth; **G×E**, genotype×environment interaction.

REFERENCES

- AOAC (1995). Official Methods of Analysis. Association of Official Analytical Chemists, Arlington, VA.
- Barros MA, Rocha MM, Gomes RLF, Silva KJD, Neves AC (2013). Adaptabilidade e estabilidade produtiva de feijão-caupi de porte semiprostrado. *Pesqui. Agropecu. Bras.* 48:403-410.
- Bouis HE, Welch RM (2010). Biofortification - A Sustainable Agricultural Strategy for Reducing Micronutrient Malnutrition in the Global South. *Crop Sci.* 50:20-32.
- COMA - Committee on Medical Aspects of Food Policy (1991). Dietary Reference Values for Food Energy and Nutrients for the United Kingdom, N. 41. Department of Health HMSO, London.
- Cruz CD (2006). Programa Genes: Estatística experimental e matrizes. Viçosa: Ed. UFV.
- Cruz CD, Regazzi AJ (1997). Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético. Viçosa: UFV 390 p.
- Cruz CD, Regazzi AJ, Carneiro PCS (2012). Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético. Vol. 1. Viçosa: UFV 514 p.
- Duarte JB, Vencovsky R (1999). Interação genótipos x ambientes: uma introdução à análise AMMI. Ribeirão Preto: Sociedade Bras. Genética. 60 p.
- Eberhart AS, Russell WA (1966). Stability parameters for comparing varieties. *Crop Sci.* 6:36-40.
- FAO (2014). The State of Food Insecurity in the World 2014. Strengthening the enabling environment for food security and nutrition. Rome, FAO.
- Hamid S, Muzaffar S, Wani IA, Masoodi FA, Bhat MM (2014). Physical and cooking characteristics of two cowpea cultivars grown in temperate Indian climate. *J. Soc. Agric. Sci.* 15 (2):127-135.
- Lin CS, Binns MR (1988). A superiority measure of cultivar performance for cultivar×location data. *Can. J. Plant Sci.* 68:193-198.
- Mano ARO (2009). Adaptabilidade e estabilidade fenotípica de cultivares de feijão-de-corda. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 152 p.
- McDowell LR (1992). Minerals in Animal and Human Nutrition. Academic Press Inc., CA, USA.
- Nunes HF, Freire Filho FR, Ribeiro VQ, Gomes RLF (2014). Grain yield adaptability and stability of blackeyed cowpea genotypes under rainfed agriculture in Brazil. *Afr. J. Agric. Res.* 9:255-261.
- Nutti MR, Rocha MM, Watanabe E, Carvalho JLV, Freire Filho FR, Silva KJD (2009). Biofortificação de feijão-caupi no Brasil. In: Congresso nacional de feijão-caupi, Belém, PA. Da agricultura de subsistência ao agronegócio. Belém, PA pp. 26-38.
- Oliveira OMS, Silva JF, Gonçalves JRP, Klehm CS (2010). Período de convivência das plantas daninhas com cultivares de feijão-caupi em várzea no Amazonas. *Planta daninha* 28:523-530.
- Polizel AC, Juliatti FC, Hamawaki OT, Hamawaki RL, Guimarães SL (2013). Adaptabilidade e estabilidade fenotípica de genótipos de soja no estado do Mato Grosso. *Biosci. J.* 29:910-920.
- Santos CAF, Barros GAA, Santos ICCN, Ferraz MGS (2008). Comportamento agrônomo e qualidade culinária de feijão-caupi no Vale do São Francisco. *Hortic. Bras.* 26:404-408.
- Santos CAF, Boiteux LS (2013). Breeding biofortified cowpea lines for semi-arid tropical areas by combining higher seed protein and mineral levels. *Genet. Mol. Res.* 12:6782-6789.
- SAS (1989). SAS/STAT User's Guide, Version 6, Fourth Edition, Volume 1. Cary: SAS Institute Inc. 890 p.
- Scott A, Knott M (1974). Cluster-analysis method for grouping means in analysis of variance. *Biometrics* 30:507-512.
- Silva WCJ, Duarte JB (2006). Métodos estatísticos para estudo de adaptabilidade e estabilidade fenotípica em soja. *Pesqui. Agropec. Bras.* 41:23-30.
- Singh BB (2007). Recent progress in cowpea genetics and breeding. *Acta Hortic.* 752:69-75.
- Vencovsky R, Barriga P (1992). Genética biométrica no fitomelhoramento. Ribeirão Preto: Sociedade Bras. Genética 496 p.
- White PJ, Broadley MR (2009). Biofortification of crops with seven mineral elements often lacking in human diets iron, zinc, copper, calcium, magnesium, selenium and iodine. *New Phytol.* 182:49-84.

Retention of proteins and minerals after cooking in cowpea genotypes¹

Danillo Olegario Matos da Silva², Carlos Antonio Fernandes Santos³,
Sirando Lima Seido⁴, Washington Carvalho Pacheco Coelho², Deisy Aiane Lima de Aquino²

ABSTRACT

Cowpea is a tolerant crop to water deficit, with moderate protein and mineral contents, as well as fast cooking, which are important requirements for semi-arid regions. This study aimed to evaluate the retention of total proteins and minerals after cooking in cowpea genotypes, in order to select those that best preserve these nutrients contents. Twenty-four genotypes were evaluated, being ten lines, five commercial cultivars and nine landraces maintained by farmers. Cooking had a reduced effect on the contents of protein, potassium, calcium, iron and zinc in cowpea grains, with significant effects only in a few genotypes. A significant and positive correlation was observed only for grain yield x zinc content and protein content x cooking time. The line CPCR3F6L17 presented a high grain yield and high levels of protein, potassium, iron and zinc after cooking, showing to be a promising option for the studied region.

KEYWORDS: *Vigna unguiculata*; nutrient content; thermal processing.

INTRODUCTION

Cowpea [*Vigna unguiculata* (L.) Walp.] is widely cultivated in semi-arid regions, because of its tolerance to water stress and low soil fertility, in addition to its grain yield capacity, when compared with other legume species (Silva et al. 2016).

In many African, Asian and South American countries, cowpea is the main dietary supply of vegetables for populations from semi-arid regions with a great tradition of consumption (Freire Filho 2011). In the Brazilian semi-arid region, cowpea has become one of the main social and economic alternatives for the rural population, and its cultivation has expanded to other regions, reaching

RESUMO

Retenção de proteínas e minerais após a cocção em genótipos de feijão-caupi

O feijão-caupi é uma cultura tolerante ao déficit hídrico, com teores moderados de proteínas e minerais e rápida cocção, requisitos importantes para regiões semiáridas. Objetivou-se avaliar a retenção de proteínas totais e minerais após a cocção, em genótipos de feijão-caupi, a fim de selecionar os que melhor preservem os teores desses nutrientes. Foram avaliados 24 genótipos, sendo dez linhagens, cinco cultivares comerciais e nove variedades mantidas por agricultores. A cocção teve efeito reduzido nos teores de proteína, potássio, cálcio, ferro e zinco, nos grãos de feijão-caupi, com efeitos significativos em poucos genótipos. Foi observada correlação significativa e positiva apenas para produção de grãos x teor de zinco e proteínas x tempo de cocção. A linhagem CPCR3F6L17 obteve alta produtividade de grãos e elevados teores de proteína, potássio, ferro e zinco, após a cocção, mostrando-se promissora para a região estudada.

Palavras-chave: *Vigna unguiculata*; teor de nutrientes; processamento térmico.

new domestic and international markets (Oliveira et al. 2010).

Due to its high grain yield and higher nutrient content, if compared with crops traditionally grown by small farmers in the semi-arid regions, cowpea has been a good option for the diet of several populations. Some studies have proved that cowpea presents a significant variability of chemical composition in the grains, which allows the selection of genotypes with high nutritional contents (Santos & Boiteux 2013, Silva et al. 2016, Silva & Santos 2016).

The accumulation and retention of some minerals are influenced by the interaction of different factors, such as varieties, environmental conditions, part of the grain where the mineral is concentrated

1. Manuscript received in Jun./2017 and accepted for publication in Sep./2017 (<http://dx.doi.org/10.1590/1983-40632016v4747261>).

2. Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, BA, Brasil. *E-mails:* danilloolegario@hotmail.com, washington_cpc@hotmail.com, deisylima_17@hotmail.com.

3. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa Semiárido), Petrolina, PE, Brasil. *E-mail:* carlos-fernandes.santos@embrapa.br.

4. Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, PE, Brasil. *E-mail:* siroseido@hotmail.com.

and minerals solubility during immersion and cooking (Bassinello 2009). Pereira et al. (2014) evaluated five cowpea cultivars for nutrient retention in normal and pressure cookers, with and without grain immersion, and observed different responses of cultivars, regarding iron and zinc contents after cooking. In another study, Pereira et al. (2016) evaluated the bioaccessibility of these nutrients and highlighted the importance of determining the actual percentage of absorption and efficient strategies for low-income populations to have access to foods with high nutritional levels.

Another important factor in the accumulation and retention of some minerals is the high concentrations of tannins and phytates present in the grains. Carvalho et al. (2012) emphasize that the presence of phytates and tannins in plant fibers may negatively influence the availability of iron and zinc, as well as the cooking time. Lazarte et al. (2015) observed that phytate levels promoted a significant decrease in the availability of calcium, iron and zinc, and suggested the immersion and fermentation of grains to improve the nutrient availability. Hemalatha et al. (2007) stated that tannins do not significantly influence iron and zinc contents in cereals and legumes.

The lack of protein and minerals in food has negatively contributed to public health, affecting almost half of the world's population, especially children, adolescents and pregnant women (Kraemer & Zimmermann 2007). Cowpea presents a great variability in the chemical composition of grains, what enables the selection of genotypes with high nutritional concentration of iron, zinc, calcium and potassium (Silva & Santos 2016 and 2017). Iron is essential for basic cellular functions in all body tissues (Rios et al. 2011). Zinc is the cofactor of more than 300 enzymes necessary for growth and development (Shankar & Prasad 1998). Calcium is important for muscle contractions and the nervous system (McDowell 1992). Potassium is the third most abundant mineral in the human body and is essential for human life (United Kingdom 1991).

The Food and Agricultural Organization of the United Nations considers cowpea as one of the best options to increase protein supply, due to its low production cost (Grangeiro et al. 2005). The selection of new cowpea cultivars with high protein and mineral contents in the grains is crucial for human health, especially in the diet of the low-income population in the semi-arid regions. Cowpea grains present a

fast cooking time, which is an important requirement for those suffering from shortage of fuel and other natural resources (Ehlers & Hall 1997). However, the way nutrients are used by the human body may be compromised due to several factors. According to Ramírez-Cárdenas et al. (2008), the main problems are the high content of antinutritional factors, such as tannins and phytates, and the processing type, such as threshing, immersion and cooking.

The cooking time is a primary factor in the choice of a cultivar by consumers who aim to save time in meal preparation. In addition, prolonged cooking time should be avoided, as it may cause structural changes at the cellular level, reducing the availability of nutrients (Pujola et al. 2007). Mota et al. (2016) evaluated cooking methods in amaranth, wheat and quinoa, and concluded that estimates of mineral intake should be based on data obtained from cooked foods. Few studies have reported the effect of cooking on protein and mineral contents in cowpea, following the pioneering research of Pereira et al. (2014).

The present study aimed to evaluate the total proteins and minerals retention after cooking in cowpea genotypes, in order to select those that best preserve the nutrients content.

MATERIAL AND METHODS

Twenty-four cowpea genotypes were evaluated, being ten lines from the Embrapa Semiárido, five commercial cultivars and nine local varieties collected from farmers in Juazeiro (Bahia state) and Petrolina (Pernambuco state), Brazil (Table 1). The experiments were conducted in 2014-2, in an experimental field of Mandacaru, in Juazeiro. The experiment consisted of a completely randomized block design, with three replications, in 2.0 m x 3.0 m plots, spaced 1.0 m between rows and 0.1 m between plants.

Green grains were cooked using a Mattson cooker, a quick and practical apparatus to evaluate grain cooking time (Yeung et al. 2009). Groups of 25 grains were randomly selected from each treatment for evaluation with three replications, totaling 75 grains. The cooking time corresponded to the dropping of the twenty-third plunger of the Mattson grain cooker. The plunger of the apparatus exerts a pressure that corresponds to the tactile method for determining cooking times (by smashing the bean grain between the fingers). According to Proctor & Watts (1987), the dropping time of 23 of the 25

plungers, which represents 92 % of cooked grains, should be used as the optimum cooking time. This provided an acceptable cooking texture and the preferred degree of softness in sensorial analyses, in addition to a better discrimination between samples.

Raw and cooked grains were ground in a MA 630/1 mill (Marconi, Brazil), to obtain a fine flour from each sample, for the quantification of total proteins and minerals. The quantification of total proteins in dry beans was performed by the chemical method of Kjeldhal (AOAC 1995). The flour was analyzed in duplicates for each sample (AOAC 1995). The percentage of nitrogen was calculated using the formula: % N = 0.14 * correction factor of the HCl solution * volume used in the HCl titration. Protein was determined by multiplying the percentage of nitrogen by the 6.25 factor.

Two extracts of raw and cooked grains were prepared for the mineral quantification: 1) extract A for iron and zinc: after the cooling of the digestion

tubes, 49 mL of deionized and distilled water were added, and the Fe and Zn contents were determined in a flame atomic absorption spectrophotometer (Varian); 2) extract B for potassium and calcium: 1 mL of the extract A was transferred to a 50 mL Becker, identified according to the protocol number of the samples, the volume was completed with 49 mL of 0.1 % lanthanum oxide and the samples of extract B were used for potassium quantification, using a flame photometer (MicroNal), while the calcium was determined in a flame atomic absorption spectrophotometer (Varian). Results were expressed as g kg⁻¹ of grain dry matter for potassium and calcium and as mg kg⁻¹ for iron and zinc.

Analyses of simple and factorial variance were performed using the GLM procedure of the SAS software (SAS 1989) for grain yield, cooking time, total proteins and minerals. Grain yield was corrected by the method of covariance with the mean plant stand of the plots (Vencovsky & Barriga 1992), using

Table 1. Averages of yield, cooking time and protein, potassium, calcium, iron and zinc contents of 24 cowpea genotypes evaluated before (BC) and after (AC) cooking.

Treatment	Yield kg ha ⁻¹	Cooking time min	Protein (%)		DM	Potassium g kg ⁻¹	Iron mg kg ⁻¹	Zinc (mg kg ⁻¹)		DM
			BC	AC				BC	AC	
PD1_Petrolina-PE	2,079.6 a	13.2 b	27.8 a	27.7 a	ns	11.8 b	53.9 b	32.5 b	34.2 a	ns
PD2_Juazeiro-BA	1,548.4 b	10.7 a	23.8 b	21.8 c	ns	10.6 b	55.1 b	37.2 b	36.1 a	ns
PD3_Juazeiro-BA	1,676.1 b	11.5 a	24.7 b	25.8 b	ns	11.4 b	49.8 b	32.4 b	32.5 b	ns
PD4_Juazeiro-BA	1,515.1 b	11.3 a	26.2 b	26.9 a	ns	15.4 a	57.4 a	40.2 a	35.1 a	ns
PD5_Juazeiro-BA	1,259.8 b	10.9 a	24.9 b	25.5 b	ns	11.1 b	54.4 b	32.4 b	34.6 a	*
PD6_Petrolina-PE	2,053.5 a	10.7 a	24.5 b	28.4 a	*	10.4 b	54.2 b	30.5 b	36.6 a	ns
PD7_Petrolina-PE	1,640.0 b	11.6 a	26.5 b	26.3 b	ns	12.0 b	53.9 b	35.2 b	31.6 b	**
PD8_Petrolina-PE	922.5 b	14.9 b	27.5 a	25.6 b	ns	11.7 b	54.4 b	37.1 b	36.2 a	ns
PD9_Petrolina-PE	1,340.3 b	10.8 a	24.4 b	25.2 b	ns	11.2 b	48.0 b	30.3 b	30.3 c	ns
P209	2,316.6 a	13.4 b	24.8 b	26.4 b	ns	12.5 b	59.4 a	41.8 a	36.0 a	ns
PC951015D01E	2,358.7 a	11.7 a	27.0 a	25.7 b	**	11.7 b	63.0 a	34.8 b	34.6 a	ns
PC950409D02E	2,480.8 a	9.6 a	28.6 a	24.5 b	ns	13.4 a	52.2 b	31.7 b	32.8 b	ns
PC951016D01E	1,984.1 a	15.0 b	24.6 b	25.8 b	ns	13.9 a	53.1 b	31.2 b	32.8 b	ns
CPCR3F6L15	1,940.4 b	12.1 a	26.1 b	25.0 b	ns	14.0 a	69.0 a	35.4 b	33.9 a	ns
CPCR3F6L17	2,374.3 a	13.9 b	30.7 a	28.1 a	ns	12.5 b	60.2 a	36.9 b	35.0 a	ns
C2M	1,108.9 b	10.9 a	28.6 a	27.4 a	ns	11.0 b	52.0 b	29.9 b	28.7 c	ns
C2S	1,325.3 b	11.9 a	23.7 b	26.9 a	*	10.5 b	56.4 b	35.8 b	31.4 b	ns
C1J	1,343.1 b	11.3 a	25.4 b	25.5 b	ns	12.3 b	52.7 b	37.7 b	29.7 c	ns
C3Q	1,409.7 b	16.6 b	26.0 b	28.1 a	ns	10.5 b	60.4 a	32.6 b	33.0 b	ns
BRS Acauã	1,440.2 b	15.4 b	28.3 a	28.9 a	ns	12.3 b	55.8 b	34.4 b	34.3 a	ns
BRS Guariba	1,716.6 b	14.7 b	27.0 a	26.1 b	ns	11.0 b	58.9 a	33.1 b	34.0 a	ns
BRS Marataoã	1,764.9 b	14.3 b	25.0 b	26.8 a	ns	13.0 a	61.3 a	35.5 b	35.2 a	ns
BRS Pujante	1,540.1 b	11.8 a	26.5 b	24.2 b	ns	11.5 b	62.1 a	32.9 b	32.9 b	ns
BRS Rouxinol	1,723.3 b	13.5 b	28.0 a	26.0 b	ns	11.3 b	59.4 a	35.3 b	33.7 a	ns
CV (%)	18.6	21.3	5.4	4.9		10.3	8.36	7.3	5.5	

** and *: significant at 1 % and 5 %, respectively, by the t test. Values followed by the same letter in the column belong to the same group by the Scott-Knott test at 5 %. DM = difference between means.

the SAS software. The Scott-Knott test was applied at 5 % for the genotypes averages, and the Student t-test was used for differences between averages before and after cooking. Pearson correlation coefficients were estimated among all variables.

RESULTS AND DISCUSSION

Genotypes were significantly different for total protein, potassium, iron and zinc contents ($p < 0.01$), indicating the existence of variability among them and the possibility of obtaining a selection gain (Table 2). Cooking had a significant effect on calcium, iron and zinc contents ($p < 0.05$), and no differences were observed for protein and potassium contents (Table 2). The genotype x cooking time interaction was observed only for total protein and zinc contents ($p < 0.05$), indicating that the genotypes had a different response to cooking only in these two variables. According to Ramírez-Cárdenas et al. (2008), the proteins and minerals availability may be compromised because of the high content of antinutritional factors, such as phytates, tannins and fibers, which negatively influence the protein and minerals content, besides the processing, such as cooking.

In spite of the little difference between the overall averages of total proteins and minerals before and after cooking, a slight reduction was observed in the nutritional content of cowpea grains, being minimal for proteins (0.4 %) and more pronounced for iron (3.1 %) (Table 2). Similar results were reported by ElMaki et al. (2007), who evaluated the effects of cooking, with and without immersion, on mineral contents and antinutritional factors.

Genotypes differed for grain yield ($p < 0.01$), ranging 922.5-2,480.8 kg ha⁻¹ between the genotypes PD8 and PC950409D02E, respectively (Table 1).

Genotypes also varied in relation to the cooking time, with the shortest time of 9.6 min observed for the line PC950409D02E, and the longest time of 16.6 min reported for line C3Q (Table 1). Possibly, the short cooking time of cowpea grains provided a smaller reduction in the nutritional contents, when comparing raw and cooked grains.

Genotypes showed variability for protein contents ($p < 0.01$) before and after cooking, with an average of approximately 26 %. The highest values were observed for the genotypes PD6, CPCR3F6L17, C3Q and BRS Acauã (Table 1). Genotypes also presented differences for potassium content ($p < 0.01$), with an average of approximately 12 g kg⁻¹. The genotype PD4 presented the highest average. For calcium contents, the variability among genotypes was non-significant. For the iron and zinc contents, the variability between genotypes averages was significant ($p < 0.01$), with 56.5 mg kg⁻¹ and 34 mg kg⁻¹, respectively. The line CPCR3F6L15 stood out for its high iron content after cooking (70.8 mg kg⁻¹) (Table 1).

Genotypes were not different before and after cooking for protein content, by the t test, except for the genotypes PD6, PC951015D01E and C2S, whose mean values decreased or increased (Table 1). Cooking influenced only the genotype PD5 for zinc content, with no effects observed for iron in all the genotypes evaluated in this study (Table 1). Significant differences were reported by Mota et al. (2016), who evaluated minerals in amaranth, wheat and quinoa after cooking, as well as by Pereira et al. (2016), who evaluated the effect of cooking methods on iron and zinc contents in cowpea cultivars.

The genotypes BRS Acauã, PD6, C3Q and CPCR3F6L17 presented the highest protein contents after cooking (28.1-28.9 %) (Table 1). The highest

Table 2. Mean square for yield, cooking time, protein, potassium, calcium, iron and zinc contents in cowpea genotypes.

Source of variation	DF	Mean square						
		Yield	Cooking time	Protein	Potassium	Calcium	Iron	Zinc
Genotype (G)	23	356,235 ^{**}	13.7 [*]	8.34 ^{**}	7.06 ^{**}	0.04 ^{ns}	102.30 ^{**}	21.97 ^{**}
Cooking (C)	1	-	-	0.28 ^{ns}	2.65 ^{ns}	0.52 ^{**}	90.00 [*]	24.40 [*]
G x C	23	-	-	4.34 ^{**}	2.40 ^{ns}	0.03 ^{ns}	32.96 ^{ns}	10.00 [*]
Error	64	212,156	6.7	1.79	1.51	0.03	22.33	4.87
CV (%)		26.7	21.3	5.09	10.33	13.34	8.36	6.54
Mean				%	g kg ⁻¹		mg kg ⁻¹	
Before cooking				26.3	12.1	1.4	57.4	34.5
After cooking				26.2	11.9	1.2	55.7	33.6

** , * and ^{ns}: significant at 1 %, 5 % and non-significant, respectively, by the F test.

potassium contents after cooking were observed in the genotype PD4 and the cultivar BRS Marataoã, while the highest iron and zinc contents after cooking were observed for the lines CPCR3F6L15 and PD6, respectively (Table 1). The highest calcium content after cooking was observed for BRS Acauã (Table 1).

Among the nine evaluated genotypes, only PDI and PD6s, both from Petrolina, presented grain yields higher than the overall average. These genotypes also showed protein, calcium and zinc contents after cooking superior to the overall average (Table 1). The lines P209, PC951015D01E, PC950409D02E and CPCR3F6L17 stood out for their high grain yield, being 31 % higher than the most productive cultivar (BRS Marataoã) and 35 % higher than the overall average of the experiment (Table 1). The line PC951015D01E presented a high grain yield, but showed a significant reduction in the protein content after cooking (Table 1). The line CPCR3F6L17, with the highest grain yield among all the evaluated genotypes, also presented nutritional contents above the overall averages for protein, potassium, iron and zinc contents after cooking (Table 1).

A significant and positive correlation was observed only between grain yield and zinc content, as well as between protein content and cooking time. The protein content increased with the increase of cooking time (Table 3). Santos & Boiteux (2013) reported correlations between grain yield and iron content, when evaluating protein and mineral contents in 87 cowpea genotypes, and did not observe a significant correlation between the protein content and the other variables.

Except for the line CPCR3F6L17, which presented the highest averages for grain yield and protein content, the lines with the highest nutritional contents were not the same as those with the highest grain yields. The results observed in this study indicate difficulties for selecting lines that combine

high grain yields and high protein and mineral contents. Similar results were reported by Silva et al. (2016), who analyzed the protein content in 44 cowpea genotypes. An alternative to circumvent the limits imposed by the association between these two variables is the selection of intermediate or above-average values.

In the northeast of Brazil, the cowpea production presented an annual average of 426,367 t, in 2010, with a great superiority in relation to other producing regions, but with the lowest average yield of 330 kg ha⁻¹ (Freire Filho 2011). However, this value does not reflect the genetic potential of the improved cultivars. In the present study, the lines CPCR3F6L17, PC951015D01E, PC950409D02E and P209 presented grain yields above 2,300 kg ha⁻¹ (Table 1). The literature reports yields of cowpea above 3,000 kg ha⁻¹ under irrigated conditions (Bezerra 1997).

The low production in this region is mainly due to the form of cultivation, carried out predominantly by small farmers, with lack of technology, such as pest and disease control and appropriate irrigation system. The average yield of cowpea genotypes used by farmers was approximately 15 % lower than that of improved cultivars and lines (Table 1).

The selection of productive cowpea cultivars with low cooking time, biofortified, with high protein and mineral contents, adapted to various cultivation environments, and which are available to farmers and consumers, is increasingly needed. The line CPCR3F6L15 showed grain yield and potassium, calcium, iron and zinc contents above the overall average. The line CPCR3F6L17 showed a slightly longer cooking time, but presented a high grain yield and high protein, potassium, iron and zinc contents after cooking. Thus, CPCR3F6L17 was the most promising line for commercial cultivation and the one that better preserved the availability of nutrients.

Table 3. Pearson correlation coefficient among grain yield, cooking time and protein, potassium, calcium, iron and zinc contents in 24 cowpea genotypes evaluated after cooking.

	Cooking	Protein	Potassium	Calcium	Iron	Zinc
Yield	0.17 ^{ns}	0.10 ^{ns}	0.17 ^{ns}	0.08 ^{ns}	0.25 ^{ns}	0.52 ^{**}
Cooking time		0.45 [*]	0.09 ^{ns}	0.16 ^{ns}	0.24 ^{ns}	0.26 ^{ns}
Protein			-0.08 ^{ns}	0.14 ^{ns}	-0.15 ^{ns}	-0.01 ^{ns}
Potassium				-0.14 ^{ns}	0.19 ^{ns}	0.14 ^{ns}
Calcium					-0.07 ^{ns}	0.19 ^{ns}
Iron						0.21 ^{ns}

** , * and ns: significant at 1 % and 5 % and non-significant, respectively, by the t test.

CONCLUSIONS

1. Cooking time, protein and mineral contents are affected by genotype;
2. Cooking reduces the calcium, iron and zinc contents in cowpea;
3. CPCR3F6L17 reached a high grain yield, as well as protein, potassium, iron and zinc contents, after cooking, being a promising line for cultivation in the regions of Petrolina and Juazeiro.

REFERENCES

- ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS (AOAC). *Official methods of analysis*. Arlington: AOAC, 1995.
- BASSINELLO, P. Z. Qualidade nutricional, funcional e tecnológica do feijão. In: KLUTHCOUSKI, J.; STONE, L. F.; AIDAR, H. (Eds.). *Fundamentos para uma agricultura sustentável, com ênfase na cultura do feijoeiro*. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2009.
- BEZERRA, A. A. C. *Variabilidade e diversidade genética em caupi (Vigna unguiculata (L.) Walp.) precoce, de crescimento determinado e porte ereto e semiereto*. 1997. 105 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 1997.
- CARVALHO, L. M. J. et al. Iron and zinc retention in common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) after home cooking. *Food & Nutrition Research*, v. 56, n. 1, p. 1-6, 2012.
- EHLERS, J. D.; HALL, A. E. Cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp.). *Field Crops Research*, v. 53, n. 1-3, p. 187-204, 1997.
- ELMAKI, H. B. et al. Content of antinutritional factors and HCl-extractability of minerals from white bean (*Phaseolus vulgaris*) cultivars: influence of soaking and/or cooking. *Food Chemistry*, v. 100, n. 1, p. 362-368, 2007.
- FREIRE FILHO, F. R. *Feijão-caupi: produção, melhoramento genético, avanços e desafios*. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2011.
- GRANGEIRO, T. B. et al. Composição bioquímica da semente. In: FREIRE FILHO, F. R.; LIMA, J. A. A.; RIBEIRO, V. Q. (Eds.). *Feijão-caupi: avanços tecnológicos*. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2005. p. 338-365.
- HEMALATHA, S.; PLATEL, K.; KRISHNAPURA, S. Influence of heat processing on the bioaccessibility of zinc and iron from cereals and pulses consumed in India. *Trace Elements in Medicine and Biology*, v. 21, n. 1, p. 1-7, 2007.
- KRAEMER, K.; ZIMMERMANN, M. B. *Nutritional anemia*. Basel: Sigh and Life Press, 2007.
- LAZARTE, C. E. et al. Phytate, zinc, iron and calcium content of common Bolivian food, and implications for mineral bioavailability. *Journal of Food Composition and Analysis*, v. 39, n. 1, p. 111-119, 2015.
- MCDOWELL, L. R. *Minerals in animal and human nutrition*. San Diego: Academic Press, 1992.
- MOTA, C. et al. The effect of cooking methods on the mineral content of quinoa (*Chenopodium quinoa*), amaranth (*Amaranthus* sp.) and buckwheat (*Fagopyrum esculentum*). *Journal of Food Composition and Analysis*, v. 49, n. 1, p. 57-64, 2016.
- OLIVEIRA, O. M. S. et al. Período de convivência das plantas daninhas com cultivares de feijão-caupi em várzea no Amazonas. *Planta daninha*, v. 28, n. 3, p. 523-530, 2010.
- PEREIRA, E. J. et al. Effects of cooking methods on the iron and zinc contents in cowpea (*Vigna unguiculata*) to combat nutritional deficiencies in Brazil. *Food & Nutrition Research*, v. 58, n. 1, p. 1-7, 2014.
- PEREIRA, E. J. et al. Effect of different home-cooking methods on the bioaccessibility of zinc and iron in conventionally bred cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp) consumed in Brazil. *Food & Nutrition Research*, v. 60, n. 1, p. 1-6, 2016.
- PROCTOR, J. R.; WATTS, B. M. Development of a modified Mattson bean cooker procedure based on sensory panel cookability evaluation. *Canadian Institute of Food Science and Technology*, v. 20, n. 1, p. 9-14, 1987.
- PUJOLA, M.; FARRERAS, A.; CASAÑAS, F. Protein and starch content of raw, soaked and cooked beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Food Chemistry*, v. 102, n. 4, p. 1034-1041, 2007.
- RAMÍREZ-CÁRDENAS L.; LEONEL, A. J.; COSTA, N. M. B. Efeito do processamento doméstico sobre o teor de nutrientes e de fatores antinutricionais de diferentes cultivares de feijão comum. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, v. 28, n. 1, p. 200-213, 2008.
- RIOS, S.A. et al. Deficiências nutricionais e a biofortificação de alimentos. In: BORÉM, A.; RIOS, S. A. (Eds.). *Milho biofortificado*. Visconde do Rio Branco: Suprema, 2011.
- SANTOS, C. A. F.; BOITEUX, L. S. Breeding biofortified cowpea lines for semi-arid tropical areas by combining higher seed protein and mineral levels, v. 12, n. 4, p. 6782-6789, 2013.
- SAS INSTITUTE INC. *SAS/STAT user's guide*. Version 6. Cary: SAS Institute Inc., 1989.
- SHANKAR, A. H.; PRASAD, A. S. Zinc and immune function: the biological basis of altered resistance to

infection. *American Journal of Clinical Nutrition*, v. 68, n. 2, p. 475-635, 1998.

SILVA, D. O. M.; SANTOS, C. A. F. Adaptability and stability parameters for potassium and calcium contents and grain yield in cowpea lines. *African Journal of Agricultural Research*, v. 11, n. 36, p. 3366-3374, 2016.

SILVA, D. O. M.; SANTOS, C. A. F. Adaptability and stability parameters of iron and zinc concentrations and grain yield in cowpea lines in the Brazilian semiarid region. *Crop Science*, v. 57, n. 1, p. 1-10, 2017.

SILVA, D. O. M.; SANTOS, C. A. F.; BOITEUX, L. S. Adaptability and stability parameters of total seed yield and

protein content in cowpea (*Vigna unguiculata*) genotypes subjected to semi-arid conditions. *Australian Journal of Crop Science*, v. 10, n. 8, p. 1164-1169, 2016.

UNITED KINGDOM. Department of Health. Committee on Medical Aspects of Food Policy. *Dietary reference values for food energy and nutrients for the United Kingdom*. London: HMSO, 1991.

VENCOVSKY, R.; BARRIGA, P. *Genética biométrica no fitomelhoramento*. Ribeirão Preto: Sociedade Brasileira de Genética, 1992.

YEUNG, H. et al. Rapid screening methods to evaluate cowpea cooking characteristics. *Field Crops Research*, v. 112, n. 2-3, p. 245-252, 2009.

Anexo E. Script para análise de interação GxE pelo método AMMI utilizando o programa SAS University Edition.

Para a execução do programa atualize as palavras em negrito e os dados a serem analisados

```
data kdoisR;  
input genotipo $ ambiente $ pota;  
cards;  
C2R Acaua 13.83  
C2R Bebed 15.33  
C2R Caati 15.17  
C2R Dorme 12.00  
C2R Limoe 12.83  
C2R Juaze 13.17  
C2R Ptdia 11.67  
C3S Acaua 15.17  
C3S Bebed 16.83  
C3S Caati 17.17  
C3S Dorme 13.33  
C3S Limoe 11.17  
C3S Juaze 11.83  
C3S Ptdia 12.17  
C3M Acaua 15.17  
C3M Bebed 16.83  
C3M Caati 14.17  
C3M Dorme 13.67  
C3M Limoe 14.00  
C3M Juaze 14.33  
C3M Ptdia 14.67  
C3Q Acaua 14.67  
C3Q Bebed 14.33  
C3Q Caati 13.17  
C3Q Dorme 13.33  
C3Q Limoe 12.17  
C3Q Juaze 12.50  
C3Q Ptdia 14.50  
C3B Acaua 16.17  
C3B Bebed 13.00  
C3B Caati 15.50  
C3B Dorme 12.00  
C3B Limoe 17.83  
C3B Juaze 14.83  
C3B Ptdia 16.83  
C6P Acaua 15.67  
C6P Bebed 11.67  
C6P Caati 14.50
```

C6P Dorme 15.50
C6P Limoe 12.00
C6P Juaze 16.50
C6P Ptdia 16.33
C1M Acaua 15.33
C1M Bebed 12.67
C1M Caati 15.83
C1M Dorme 16.17
C1M Limoe 14.00
C1M Juaze 16.00
C1M Ptdia 16.83
C3F Acaua 15.17
C3F Bebed 14.17
C3F Caati 13.33
C3F Dorme 14.33
C3F Limoe 16.67
C3F Juaze 15.83
C3F Ptdia 16.17
C3L Acaua 14.33
C3L Bebed 14.50
C3L Caati 14.00
C3L Dorme 14.00
C3L Limoe 15.17
C3L Juaze 16.50
C3L Ptdia 16.83
C2C Acaua 16.50
C2C Bebed 13.67
C2C Caati 16.00
C2C Dorme 16.17
C2C Limoe 17.17
C2C Juaze 16.00
C2C Ptdia 16.83
C1T Acaua 15.00
C1T Bebed 15.00
C1T Caati 14.17
C1T Dorme 13.17
C1T Limoe 12.00
C1T Juaze 15.50
C1T Ptdia 15.83
C3R Acaua 15.17
C3R Bebed 12.00
C3R Caati 16.83
C3R Dorme 14.33
C3R Limoe 15.17
C3R Juaze 13.67
C3R Ptdia 16.67
C4G Acaua 12.67
C4G Bebed 14.50
C4G Caati 16.50
C4G Dorme 14.33
C4G Limoe 12.17
C4G Juaze 14.50

C4G Ptdia 17.17
C6A Acaua 13.67
C6A Bebed 13.67
C6A Caati 14.17
C6A Dorme 15.83
C6A Limoe 14.83
C6A Juaze 15.33
C6A Ptdia 16.67
C2T Acaua 14.67
C2T Bebed 13.67
C2T Caati 14.50
C2T Dorme 15.33
C2T Limoe 16.83
C2T Juaze 15.17
C2T Ptdia 16.17
C3P Acaua 15.50
C3P Bebed 17.00
C3P Caati 15.67
C3P Dorme 15.83
C3P Limoe 16.00
C3P Juaze 16.33
C3P Ptdia 15.67
C6D Acaua 15.33
C6D Bebed 15.83
C6D Caati 15.17
C6D Dorme 16.33
C6D Limoe 16.83
C6D Juaze 15.50
C6D Ptdia 17.00
C1V Acaua 16.17
C1V Bebed 15.50
C1V Caati 15.33
C1V Dorme 15.67
C1V Limoe 16.83
C1V Juaze 16.00
C1V Ptdia 15.33
C4I Acaua 16.17
C4I Bebed 16.00
C4I Caati 14.33
C4I Dorme 24.83
C4I Limoe 17.83
C4I Juaze 15.33
C4I Ptdia 15.40
T16_2R Acaua 17.00
T16_2R Bebed 16.00
T16_2R Caati 14.00
T16_2R Dorme 13.50
T16_2R Limoe 18.17
T16_2R Juaze 16.00
T16_2R Ptdia 15.67
Acaua Acaua 17.17
Acaua Bebed 17.00

Acaua Caati 14.67
 Acaua Dorme 12.83
 Acaua Limoe 15.53
 Acaua Juaze 15.53
 Acaua Ptdia 16.00
 Pujante Acaua 15.17
 Pujante Bebed 16.00
 Pujante Caati 15.00
 Pujante Dorme 14.67
 Pujante Limoe 15.40
 Pujante Juaze 15.40
 Pujante Ptdia 16.17
 Canapu Acaua 13.83
 Canapu Bebed 16.83
 Canapu Caati 14.83
 Canapu Dorme 13.17
 Canapu Limoe 15.17
 Canapu Juaze 13.17
 Canapu Ptdia 16.33;

```

proc glm;
class genotipo ambiente;
model pota=genotipo ambiente;
lsmeans genotipo ambiente;
output out=geam r=ge;
run;
proc sort data=kdoisr;
by genotipo;
proc transpose data=kdoisr out=medias prefix=A;
var pota;
by genotipo;
run;
proc print data=MEDIAS;
title2 "Matriz X de médias GxA";
run;
proc sort data=geam;
by genotipo;
PROC PRINT DATA=GEAM;
RUN;
proc transpose data=geam out=GXE prefix=A;
var GE;
by genotipo;
run;
proc print data=GXE;
title2 "Matriz de interações GxA";
run;
proc iml;
GLERR=132; QMERR=2.4386;
use work.MEDIAS; setin work.MEDIAS;
read all var {A1 A2 A3 A4 A5 A6 A7} into X;
ng=nrow(X); na=ncol(X);
GM=X[:,:]; AM=X[:,:]; GG=X[:,:];
CORR=(ng*na)*(GG##2);SQTR=ssq(X)-CORR;
  
```

```

SQGEN=na*ssq(GM)-CORR;
SQAMB=ng*ssq(AM)-CORR;
SQINT=SQTR-SQGEN-SQAMB;
GLMOD=(ng-1)+(na-1)+(ng-1)*(na-1);
XG=GM*J(1,na,1);XA=J(ng,1,1)*AM;
MG=J(ng,1,1)*GG*J(1,na,1);
GE=X-XG-XA+MG;
EIGV=EIGVAL(GE*GE`);
NNUL1=EIGV<-1E-9; NNUL2=EIGV>1E-9; NNUL=NNUL1+NNUL2;
r=(NNUL^=0)[+,];
title2 'Decomposição por Valores Singulares (A=USV` ) da matriz GxA';
SQGE=ssq(GE);
print 'SQ dos elementos da matriz GxA = SQ (GxA):' SQGE;
print 'O posto da matriz GxA:' r ;
CALL SVD(eG,VS,eA,GE);S=DIAG(VS[1:r,]);U=eG[,1:r];VT=eA[,1:r];
print 'Matriz de valores singulares (S):' S [format=12.4] /
'Matriz de autovetores (U) associados a genótipos (AA`):' U [format=12.6] /
'Matriz de autovetores (V` ) associados a ambientes (A`A):' VT [format=12.6];
Li=VS##2;AUTV=Li[1:r,];
SAUTV=SUM(Li); TR1=trace(GE*GE`); TR2=trace(GE`*GE);
PRP=INV(SAUTV)*Li;PROP=PRP[1:r,];
RESD1=SAUTV-Li[1:1,];
PACUM=CUSUM(PROP)*100;
LINH=(1:r)`;
RESUMO=LINH||AUTV||PROP||PACUM;
colu={'CP/Eixo' 'Autovalor' 'Prop./CP' '% Acumulada'};
title2 'Resultados do desdobramento da SQ(GxA) por AMMI (DVS ou ACP)';
print 'Notas:';
'-----';
'Autovalores da ACP <=> Desdobramento da SQ(GxA) por AMMI',
'Proporção da SQ(GxA) atribuída a cada CP (ou eixo singular de interação)',
'Percentagem da SQ(GxA) acumulada até o n-ésimo CP (ou eixo singular)'
'-----';
print RESUMO [colname=colu format=12.4];
print 'Soma dos Autovalores (S_Autv) = SQ(GxA):' SAUTV, '(S_Autv) = Traço(GxA`GxA) =
Traço(GxA GxA`):' TR1 /;
title2;
n=0;
GXEI=j(ng,na,0); GLACU=0;
SQGEI=ssq(GXEI);
PROPI=INV(SAUTV)*SQGEI;
PSQTR=inv(SQTR)*(SQGEN+SQAMB);
XP0=XG+XA-MG;
print '=====';
'Resultados da avaliação do modelo: AMMI' n;
print 'SQmod/SQtrat:' PSQTR ' SQga(mod)/SQga:' PROPI,
'=====';
/;
print 'Matriz de respostas previstas (gxa): Modelo AMMI' n;
print XP0 [format=12.2] /;
do n=1 to r by 1;
VG=eG[,n]; ES=S[n,n]; VA=eA[,n];

```

```

IN=VG*ES*VA`;
G=VG*(sqrt(ES));ESGE=G`;
H=sqrt(ES)*VA;ESAM=H`;
if n=1 then ECP1=G//H;
if n=2 then ECP2=G//H;
if n=3 then ECP3=G//H;
GEI=G*H`; ZE=IN-GEI;
SQGEI=SQGEI+ssq(GEI);
PROPI=INV(SAUTV)*SQGEI;
GLAMI=ng+na-1-(2*n); QMAMI=inv(GLAMI)*(ssq(GEI));
GLACU=GLACU+GLAMI;
GLRAMI=(ng-1)*(na-1)-GLACU;
if n<r then QMRAMI=inv(GLRAMI)*(SAUTV-SQGEI); else QMRAMI=0;
FMODI=inv(QMERR)*QMAMI; FRESI=inv(QMERR)*QMRAMI;
GXEI=GXEI+GEI;
XPI=XG+XA-MG+GXEI;
PSQTR=inv(SQTR)*(SQGEN+SQAMB+SQGEI);
prob1=1-probf(FMODI,GLAMI,GLERR);
if n<r then prob2=1-probf(FRESI,GLRAMI,GLERR); else prob2={.};
FV1=GLAMI||QMAMI||FMODI||PROB1;
FV2=GLRAMI||QMRAMI||FRESI||PROB2;
FV3=GLERR||QMERR||{.}||{.};
FV=FV1//FV2//FV3;
lin={'AMMIIn (GxA)' 'Res.GxA/AMMIIn' 'Erro médio'};
col={'GL' 'QM' 'teste F' 'Pr > F'};
print 'Resultados da avaliação do modelo: AMMI' n;
print FV [rowname=lin colname=col format=12.4];
print 'SQmod/SQtrat:' PSQTR 'SQga(mod)/SQga:' PROPI /;
print 'Aproximação DVS para a Matriz de interações (gxa): Modelo AMMI' n;
print GXEI [format=12.4] /;
print 'Matriz de respostas preditas (gxa): Modelo AMMI' n;
print XPI [format=12.2] /;
end;
/* d) Resultados para representação gráfica (Biplot): */
GEN=1:ng;AMB=1:na;
OBJ=(GEN||AMB)`;
PROD=GM//AM`;
RES=OBJ||PROD||ECP1||ECP2||ECP3;
RESGEN=RES[1:C1M C1T C1V C2C C2R C2T C3B C3F C3L C3M C3P C3Q C3R C3S C4G
C4I C6A C6D C6P Cana Puja T162R,1:5];
RESAMB=RES[24:Acaua Bebed Caati Dorme Juaze Limoe Ptdia,1:5];
VAR1={'GENOTIPOS' 'MEDIAS' 'IPCA1' 'IPCA2' 'IPCA3'};
VAR2={'AMBIENTES' 'MEDIAS' 'IPCA1' 'IPCA2' 'IPCA3'};
create RESULT1 from RESGEN [colname=VAR1];
append from RESGEN;
close RESULT1;
create RESULT2 from RESAMB [colname=VAR2];
append from RESAMB;
close RESULT2;
quit;
proc print data=RESULT1;
title2 "Resultados úteis para a representação gráfica em Biplot";

```

```

title3 "Médias e escores (3 primeiros IPCA's) para genótipos";
run;
proc print data=RESULT2;
title2 "Resultados úteis para a representação gráfica em Biplot";
title3 "Médias e escores (3 primeiros IPCA's) para ambientes";
run;
/* e) Representação gráfica (Biplot): */
data BILOT1GEN(keep=xsys ysys x y color function position size text style);
length text $ 8;
set RESULT1;
text=GENOTIPOS;
style = 'ZAPFB';
xsys='2'; ysys='2'; color='blue'; position='5'; function='label';
size=1;
x=IPCA1;
y=IPCA2;
data BILOT1AMB(keep=xsys ysys x y color function position size text style);
length text $ 8;
set RESULT2;
text=AMBIENTES;
style = 'SWISSB';
xsys='2'; ysys='2'; color='red'; position='5'; function='label';
size=1.5;
x=IPCA1;
y=IPCA2;
data GRAFICO1;
set BILOT1GEN BILOT1AMB;
data BILOT2GEN(keep=xsys ysys x y color function position size text style);
length text $ 8;
set RESULT1;
text=GENOTIPOS;
style = 'ZAPFB';
xsys='2'; ysys='2'; color='blue'; position='5'; function='label';
size=1;
x=MEDIAS;
y=IPCA1;
data BILOT2AMB(keep=xsys ysys x y color function position size text style);
length text $ 8;
set RESULT2;
text=AMBIENTES;
style = 'SWISSB';
xsys='2'; ysys='2'; color='red'; position='5'; function='label';
size=1.5;
x=MEDIAS;
y=IPCA1;
data GRAFICO2;
set BILOT2GEN BILOT2AMB;
proc Gplot data=GRAFICO1;
symbol1 v=none i=none color=white;
plot y*x=1 y*x=1/anno=GRAFICO1 overlay vref=0 href=0 ;
title1 'Biplot IPCA2(y) vs IPCA1(x)';
title2 'Obs.: Os ambientes N° maiores e genótipos N° menores';

```

```
proc Gplot data=GRAFICO2;  
plot y*x=1 y*x=1/anno=GRAFICO2 overlay vref=0 href=0;  
title1 'Biplot IPCA1(y) vs MEDIAS(x)';  
title2 'Obs.: Os ambientes N° maiores e genotipos N° menores';  
run;
```