

**EFEITOS GÊNICOS E INTERAÇÃO GXA NA EFICIÊNCIA DO USO  
DO NITROGÊNIO EM MILHO-PIPOCA**

**ADRIANO DOS SANTOS**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE  
DARCY RIBEIRO – UENF**

**CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ  
FEVEREIRO – 2018**

# EFEITOS GÊNICOS E INTERAÇÃO GXA NA EFICIÊNCIA DO USO DO NITROGÊNIO EM MILHO-PIPOCA

**ADRIANO DOS SANTOS**

“Tese apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Doutor em Genética e Melhoramento de Plantas.”

Orientador: Prof.: Antônio Teixeira do Amaral Júnior

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ  
FEVEREIRO – 2018

## FICHA CATALOGRÁFICA

Preparada pela Biblioteca do **CCH / UENF**

033/2018

S237 Santos, Adriano dos.

Efeitos gênicos e interação GXA na eficiência do uso do nitrogênio em milho-pipoca / Adriano dos Santos. – Campos dos Goytacazes, RJ, 2018.

78 f.

Bibliografia: f. 55 – 65.

Tese (Doutorado em Genética e Melhoramento de Plantas) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias, 2018.

Orientador: Antônio Teixeira do Amaral Júnior.

1. *Zea mays* L.. 2. Interação GXA. 3. Melhoramento de Plantas. 4. Estresse Abiótico. 5. Análise Dialética I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. II. Título.

CDD – 633.15

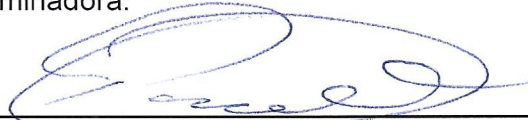
EFEITOS GÊNICOS E INTERAÇÃO GXA NA EFICIÊNCIA DO USO  
DO NITROGÊNIO EM MILHO-PIPOCA

**ADRIANO DOS SANTOS**

“Tese apresentada ao Centro de Ciências e  
Tecnologias Agropecuárias da Universidade  
Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro,  
como parte das exigências para obtenção do  
título de Doutor em Genética e Melhoramento de  
Plantas.”

Aprovada em 23 de fevereiro de 2018.

Comissão Examinadora:



Prof. Roberto Fritsche Neto (D.Sc., Genética e Melhoramento) – Esalq/USP



Prof. Messias Gonzaga Pereira (D.Sc., Genética e Melhoramento) – UENF



Prof. Geraldo de Amaral Gravina (D.Sc., Produção Vegetal) – UENF



Prof. Antônio Teixeira do Amaral Júnior (D.Sc., Genética e Melhoramento) – UENF  
(Orientador)

*À minha família, em especial, ao meu pai Lorival Ferreira dos Santos (in memoriam)*

## A TODOS

*“...Sejam como as espécies **alógamas** que aceitam os **polens das ideias** vindos dos colegas que os rodeiam, porque no mundo globalizado que vivemos o trabalho em equipe tornou-se imprescindível, não imitem as espécies **autógamas** que procuram bastar-se a si mesmas.*

*Usuem da **heterose** oriunda do choque de opiniões e ideias que certamente lhes propiciará no exercício da profissão maior criatividade na resolução de problemas, mas sejam **endogâmicos** no sentido de manter cada vez mais puro os **alelos** do dever, da ética profissional e da responsabilidade assumida...”*

*(Agenor Martinho Correa)*

## AGRADECIMENTOS

A Deus, primeiramente, pela força, coragem e saúde concedidas a mim;

Aos meus, mais que amados pais, Marlene e Lorival, pelo carinho, compreensão, amizade, por sempre terem confiado e acreditado no meu potencial, pelo amor incondicional e pelos sacrifícios ao longo dos anos só para que eu pudesse ser feliz e realizado. Pai, mesmo que o senhor não esteja aqui para ver onde seu filho chegou, quero que saiba que só cheguei aqui devido aos seus ensinamentos, por mais que eu não tenha aprendido todos, mas foram a base da minha estrutura;

Às minhas queridas irmãs, Sônia dos Santos (*in memoriam*), Ana Paula dos Santos e Fernanda dos Santos. Ao meu tio Paulo e a toda minha família, que sempre me apoiaram e incentivaram na caminhada;

À Erina Vitório Rodrigues, pelo amor, amizade, companheirismo, compreensão e ajuda em todos os momentos desta e das próximas etapas;

À Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro e ao Programa de Pós-Graduação em Genética e Melhoramento de Plantas, pela oportunidade de formação;

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) pela concessão da bolsa;

Ao Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Genética e Melhoramento de Plantas, professor Dr. Messias Gonzaga Pereira, pelo excelente profissionalismo, seriedade, atenção, dedicação e compromisso com todos.

Ao meu Orientador, professor Dr. Antônio Teixeira do Amaral Júnior, pela orientação e atenção despendida quando necessária, pelos constantes ensinamentos e pelo apoio nos momentos de dificuldades;

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Genética e Melhoramento de Plantas, em especial Antônio Teixeira do Amaral Júnior, Messias Gonzaga, Alexandre Viana, Cláudio Melo, Gonçalo Apolinário, Rosana Rodrigues, Geraldo do Amaral Gravina, Telma Nair, Helaine Ramos, pelos ensinamentos transmitidos e contribuição na minha formação;

Ao professor Dr. Roberto Fritsche Neto, pela disponibilidade em compartilhar conhecimento e contribuir para realização deste trabalho;

Ao Dr. Gessi Ceccon, pela amizade, pelo apoio nos momentos de dificuldades que ficarão marcados em toda minha vida;

A toda equipe e amigos do milho-pipoca, milho comum e agregados: Railan, Ismael Gerhardt, Amanda, Fernando Higino, Valter, Gabrielle, Guilherme, Ismael Schwantes, Janeo, Juliana, Kátia, professor Marcelo, Ismael Freitas, Tiago, Cássio, Gabriel, Júlio, Jocarla, Nayara, José Arantes e Renato pela ajuda no experimento, pela amizade, pelos conhecimentos compartilhados e pelos bons momentos de descontração durante estes anos;

Aos técnicos Geraldo, Valdinei, Luzimara e Durval e às estagiárias Jaqueline e Márcia, por toda a colaboração e incansável ajuda no experimento;

Ao secretário do Programa de Pós-Graduação em Genética e Melhoramento de Plantas, José Daniel Almeida, por sempre estar disposto a ajudar e pelo excelente trabalho prestado;

Enfim, agradeço a todos os que contribuíram direto ou indiretamente para realização deste trabalho.



## SUMÁRIO

RESUMO .....	viii
ABSTRACT .....	x
1. INTRODUÇÃO .....	1
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
3.1. Aspectos gerais do milho–pipoca.....	5
3.2. Estresse por deficiência de nitrogênio.....	6
3.3. Melhoramento para eficiência ao nitrogênio.....	8
3.4. Análise dialélica.....	10
4. MATERIAL E MÉTODOS .....	12
4.1. Seleção para eficiência no uso de nitrogênio.....	12
4.2. Efeitos gênicos e seleção de híbridos EUN .....	15
4.2.1. Análise dialélica .....	15
4.2.2. Seleção dos híbridos EUN .....	18
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	20
5.1. Seleção das linhagens para eficiência no uso do nitrogênio.....	20
5.2. Efeitos gênicos.....	31
5.3. Desempenho dos híbridos quanto à eficiência no uso do nitrogênio .....	41

6. CONCLUSÕES .....	54
7. REFERÊNCIAS.....	55

## RESUMO

SANTOS, A., dos; D.Sc.; Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro; Fevereiro de 2018. Efeitos gênicos e interação GXA na eficiência do uso do nitrogênio em milho-pipoca. Orientador: Prof. Antônio Teixeira do Amaral Júnior. Conselheiros: Prof. Roberto Fritsche Neto e Prof. Alexandre Pio Viana.

O nitrogênio é indispensável à manutenção da vida no planeta, sendo o mais importante nutriente para a obtenção de elevada produção agrícola. No entanto, a sua utilização ocasiona a liberação de óxido nitroso, que causa impacto no aquecimento global em magnitude de 296 vezes maior que a molécula de CO<sub>2</sub>, tornando-se um grande desafio para a produção agrícola sustentável. Neste contexto, os objetivos dos programas de melhoramento do milho em todo o mundo, inclui desenvolver cultivares eficientes no uso de nitrogênio (EUN), que é definida como a relação entre a produção de grãos por unidade de nitrogênio aplicado no solo. Com isto, o presente trabalho teve como objetivo elucidar a contribuição dos efeitos aditivos, não-aditivos, materno e da interação genótipos por ambientes (GA) na eficiência ao uso do nitrogênio em milho-pipoca. E, assim, identificar e selecionar linhagens endogâmicas de milho-pipoca eficientes no uso do nitrogênio; verificar o controle genético da eficiência no uso de nitrogênio quanto às capacidades gerais e específicas de combinação; bem como possíveis efeitos de herança materna; selecionar híbridos de milho-pipoca eficientes e responsivos ao uso do nitrogênio e com alto potencial produtivo. Para isto, foram avaliadas 29 linhagens S<sub>7</sub>

pertencentes ao Programa de Melhoramento do Milho-pipoca da UENF quanto ao seu desempenho *per se*, em ambientes contrastantes quanto a disponibilidade de nitrogênio, no delineamento em blocos casualizados com três repetições em dois locais: Campos dos Goytacazes, RJ e Itaocara, RJ, compreendendo as regiões Norte e Noroeste Fluminense, respectivamente. Foram selecionadas três linhagens ineficientes e não responsivas (INR), três linhagens eficientes e responsivas (ER) e quatro linhagens intermediárias quanto a eficiência e responsividade. Utilizando-se destas linhagens, foram obtidas 45 combinações híbridas e os seus respectivos recíprocos. As 90 combinações híbridas, juntamente com os dez genitores S<sub>7</sub>, foram avaliados no delineamento experimental látice triplo 10 x 10. As linhagens P7, P2, P6, P3, P5, P4, P9, P10, P9, L70, L74 e L55 são eficientes e responsivas ao uso do nitrogênio. As linhagens L66, L65, P1, L51, L53, L71, L63, L61, L75, L80 e L52 são não eficientes e não responsivas ao uso do nitrogênio. Tanto os efeitos genéticos aditivos quanto os não-aditivos são importantes para a seleção de genótipos eficientes no uso do nitrogênio. Houve complementaridade alélica entre as linhagens e efeito recíproco para eficiência no uso do nitrogênio, indicando a importância da escolha dos genitores e serem usados como fêmea ou macho. Os híbridos superiores quanto a EUN são provenientes de genitores contrastantes quanto à eficiência e responsividade ao nitrogênio. A interação híbrido x disponibilidade de nitrogênio é menos pronunciada do que a interação linhagens x disponibilidade de nitrogênio. A seleção para eficiência no uso do nitrogênio é mais eficiente quando realizada nos híbridos. Os híbridos 82 (P6 x L59), 73 (P2 x L59), 96 (P7 x L76), 94 (P7 x L61) e 86 (P6 x L77) possuem maior eficiência ao uso do nitrogênio em relação à responsividade, sendo ideais para cultivo em baixa tecnologia. Os híbridos 16 (L59 x L77), 20 (L59 x P7), 43 (L76 x L61), 53 (L77 x L59), 54 (L77 x L61), 74 (P2 x L61), 76 (P2 x L76), 77 (P2 x L77), 86 (P6 x L77), 94 (P7 x L61), 96 (P7 x L76), 97 (P7 x L77), 98 (P7 x 80), e 99 (P7 x P2) possuem alta produtividade e potencial para serem utilizados comercialmente como híbridos eficientes no uso de nitrogênio.

**Palavras-chaves:** *Zea mays* L., interação G x E, melhoramento de plantas, estresse abiótico, análise dialélica.

## ABSTRACT

SANTOS, A., dos; D.Sc.; Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro; Fevereiro de 2018. Efeitos gênicos e interação GXA na eficiência do uso do nitrogênio em milho-pipoca. Orientador: Prof. Antônio Teixeira do Amaral Júnior. Conselheiros: Prof. Roberto Fritsche Neto e Prof. Alexandre Pio Viana.

The nitrogen is indispensable to the maintenance of life on the planet, being the most important nutrient for obtaining high agricultural production. However, its use leads to the release of nitrous oxide, which impacts global warming at a magnitude of 296 times the CO<sub>2</sub> molecule, making it a major challenge for sustainable agricultural production. In this context, the objectives of maize breeding programs worldwide include the development of efficient cultivars using nitrogen (NUE), which is defined as the ratio between grain yield per unit of nitrogen applied to the soil. The objective of this work was to elucidate the contribution of additive, non-additive, maternal and genotype interaction by environments (GE) in the efficiency of the use of nitrogen in popcorn. Thus, to identify and select inbreeding lines of popcorn efficient in the use of nitrogen; to verify the genetic control of the efficiency in the use of nitrogen for the general and specific combining capacities; as well as possible effects of maternal inheritance; to select efficient popcorn hybrids that are responsive to the use of nitrogen and with high yield potential. For this purpose, 29 inbred lines belonging to the UENF Popcorn Maize Breeding Program were evaluated for their performance *per se*, in contrasting environments in terms of nitrogen availability, in a randomized complete block design with three replicates at

two sites: Campos dos Goytacazes, RJ and Itaocara, RJ, comprising the North and Northwest Fluminense regions, respectively. Three inefficient and nonresponsive strains (INR), three efficient and responsive strains (ER) and four intermediate strains were selected for efficiency and responsiveness. Using these lines, 45 hybrid combinations and their respective reciprocal ones were obtained. The 90 hybrid combinations, along with the ten S<sub>7</sub> parents, were evaluated in the 10x10 triple lattice experimental design. The inbred lines P7, P2, P6, P3, P5, P4, P9, P10, P9, L70, L74 and L55 are efficient and responsive to the use of nitrogen. The inbred lines L66, L65, P1, L51, L53, L71, L63, L61, L75, L80 and L52 are not efficient and not responsive to the use of nitrogen. Both the additive and non-additive genetic effects are important for the selection of genotypes that are efficient in the use of nitrogen. There was an allelic complementarity between inbred lines and a reciprocal effect for efficiency in the use of nitrogen, indicating the importance of the choice of the parents and to be used as female or male. The superior hybrids for NUE are derived from contrasting parents regarding efficiency and responsiveness to nitrogen. The hybrid interaction x availability of nitrogen is less pronounced than the interaction inbred line x availability of nitrogen. The selection for efficiency in the use of nitrogen is more efficient when performed in the hybrids. Hybrids 82 (P6 x L59), 73 (P2 x L59), 96 (P7 x L76), 94 (P7 x L61) and 86 (P6 x L77) have greater efficiency in the use of nitrogen in relation to responsiveness, being ideal for low-tech cultivation. Hybrids 16 (L59 x L77), 20 (L59 x P7), 43 (L76 x L61), 53 (L77 x L59), 54 (L77 x L61), 74 (P2 x L61) (P7 x L77), 97 (P7 x L77), 97 (P7 x L77), 98 (P7 x L77), 96 (P7 x L77) have high productivity and potential to be commercially used as efficient hybrids in the use of nitrogen.

**Keywords:** *Zea mays* L., G x E interaction, plant breeding, abiotic stress, diallel analysis.

## 1. INTRODUÇÃO

O aumento da produção agrícola, ao longo das últimas quatro décadas, tem sido associado ao aumento de sete vezes no uso de nitrogênio (N). Como consequência, o uso de fertilizantes nitrogenados na agricultura tem impactos negativos para a diversidade e funcionamento dos ecossistemas. Os exemplos mais típicos de tal impacto são a eutrofização da água doce e dos ecossistemas marinhos (Beman et al., 2005), resultante da lixiviação devido às altas taxas de fertilizantes nitrogenados aplicados nos campos agrícolas (Haddad et al., 2015).

De acordo com a *United Nations*, a atual população mundial é de 7,6 bilhões, com estimativa de atingir 9,6 bilhões até 2050, o que revela a necessidade de aumento, estimado, de 50 a 70% na produção de cereais para acompanhar a crescente demanda por alimentos (Savary et al., 2014). Com isso, o uso de fertilizantes irá aumentar ao longo dos próximos anos para atender essas demandas (Cordell et al., 2009). Neste contexto, projeções indicam aumento global no consumo de fertilizantes de cerca de 69 milhões de toneladas em 2030, sendo o nitrogênio responsável por 67% desse montante (Tenkorang e Lowenberg-Deboer, 2009), o que conduzirá a consequências econômicas e ambientais, tais como altos custos de produção, esgotamento dos recursos energéticos e aumento da poluição ambiental (Li et al., 2015).

O nitrogênio é um macro elemento fundamental para o crescimento e desenvolvimento das plantas, e sua disponibilidade é o principal fator limitante para a produtividade primária na maioria dos ecossistemas terrestres (Cole et al., 2008).

Não por acaso, a adubação nitrogenada é uma prática intensamente difundida para elevação da produtividade agrícola. De acordo com os dados mais recentes da FAO, o consumo de fertilizantes nitrogenados no Brasil aumentou em aproximadamente 78% nos últimos 20 anos. Este excesso de aplicação pode resultar em uso ineficiente e elevadas perdas do nitrogênio ao meio ambiente, o que pode impactar o ar e a qualidade da água, com efeitos nocivos na biodiversidade e na saúde humana (Goulding et al., 2008). Por exemplo,  $\text{NO}_3$  é facilmente perdido nas áreas agrícolas por lixiviação. Esta forma altamente móvel de nitrogênio pode levar à contaminação do abastecimento de água potável.

O milho é uma das mais importantes *commodities* agrícolas no cenário mundial e sua produção consome quase um quinto do nitrogênio produzido no mundo. Nesse contexto, o uso excessivo de fertilizantes nitrogenados causa prejuízos ao meio ambiente, incluindo a acidificação do solo e a poluição da água e do ar (Guo et al., 2010; Liu et al., 2013), uma vez que as plantas são capazes de utilizar apenas 30 - 40% do nitrogênio aplicado (Raun e Johnson, 1999). Assim, mais de 60% do nitrogênio no solo é perdido por meio de lixiviação, escoamento superficial, desnitrificação, volatilização e consumo microbiano.

Sob esta perspectiva, uma opção para a manutenção da produtividade, com menor impacto sobre o custo de produção e ao meio ambiente, é a utilização de cultivares eficientes no uso de nitrogênio (EUN). Nesse seguimento, Kant et al. (2011) estimaram que o aumento de 1% na EUN das culturas pode economizar 1,1 bilhões de dólares anualmente. Portanto, é crucial desenvolver cultivares EUN para minimizar a perda de nitrogênio aplicado, reduzir a poluição ambiental e mitigar o uso do insumo e, conseqüentemente, reduzir custos de produção.

Vale ressaltar que existe ampla variabilidade genética no germoplasma do milho quanto à eficiência no uso do nitrogênio (Paponov et al., 2005; Uribelarrea et al., 2007). Todavia, o desenvolvimento de cultivares de milho eficientes no uso do nitrogênio é um grande desafio devido à complexidade genética e à forte interação com o ambiente. O conhecimento sobre informações do controle genético em condições contrastantes de disponibilidade de nitrogênio é essencial para orientar o melhorista quanto ao método de melhoramento mais adequado para ser empregado.

Contudo, trabalhos vêm sendo realizados com o intuito de estudar o controle genético da eficiência no uso do nitrogênio e identificar regiões genômicas e, até



mesmo, genes candidatos relacionados a eficiência no uso do nitrogênio em milho (Gallais e Hirel, 2004; Coque et al., 2008; Zhang et al., 2010; Cañas et al., 2012). Todavia, até o momento, inexistem relatos na literatura sobre o estudo do controle genético da eficiência ao uso de nitrogênio no milho-pipoca e, para tanto, a análise dialélica é uma opção genético-estatística exequível, permitindo-se selecionar genitores e híbridos desejáveis, além de prover informações relativas à natureza e à magnitude dos efeitos genéticos que controlam o caráter.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1. Gerais:

Elucidar a contribuição dos efeitos aditivos, não-aditivos, materno e da interação genótipos por ambientes na eficiência do uso do nitrogênio em milho-pipoca.

### 2.2. Específicos:

i) Determinar os padrões de herança da eficiência no uso de nitrogênio quanto às capacidades gerais e específicas de combinação e obter informações sobre os possíveis efeitos de herança materna;

ii) Avaliar a interação genótipo por ambiente nas diferentes disponibilidades de nitrogênio;

iii) Identificar e selecionar linhagens endogâmicas de milho-pipoca eficientes no uso do nitrogênio; e

iv) Selecionar híbridos de milho-pipoca eficientes e responsivos ao uso do nitrogênio e com elevado potencial produtivo.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. Aspectos gerais do milho-pipoca

Existem centenas de variedades de milho, que incluem o milho comum e os vários tipos especiais de milho, dentre eles o milho-pipoca que pertence à família *Poaceae* (Goodman e Smith, 1987), subfamília Panicoide, tribo Maydeae, gênero *Zea*, espécie *Zea mays* L., var. *everta* (Sturtev) L.H. Bailey (Galinat, 1979; Paterniani e Campos, 2005). As plantas são anuais, monóicas e alógamas ( $2n=2x=20$ ) (Gaut et al., 2000; Tenailon et al., 2004). O milho-pipoca é o tipo que possui grão duro e pequeno, capaz de expandir seu endosperma devido à presença de óleo e umidade, os quais, sob aquecimento à temperatura apropriada, exercem pressão sobre o pericarpo até que este se rompa, cujo fenômeno constitui-se na diferença básica entre o milho-pipoca e o milho comum (Zinsly e Machado, 1987).

A origem genética do milho-pipoca ainda não está muito bem elucidada; Mangelsdorf e Smith Jr. (1949) e Mangelsdorf (1974) relataram não haver indícios de que o teosinte seja o genitor silvestre do milho, sendo que esse último autor identificou os milhos mais antigos como precursores das raças mexicanas de milho-pipoca. Segundo Erwin (1950), o milho-pipoca adveio de uma mutação do milho comum do tipo duro, sendo, então, cultivado e consumido pelo homem, mas essa hipótese não é consistente, pelo fato de que a capacidade da expansão ser um caráter poligênico. Goodman e Smith (1987) relataram a existência de evidências genéticas e citológicas que comprovam o parentesco entre o milho e o teosinte; portanto, propuseram que o milho-pipoca seria descendente do teosinte.

Em comparação ao milho comum, as plantas de milho-pipoca possuem algumas peculiaridades tais como, menor tamanho de espiga, maior suscetibilidade a doenças e pragas, menor espessura e menor resistência do colmo. Consequentemente, maior acamamento e quebramento, podridões de espigas e de grãos, necessitando ainda de cuidados especiais na colheita e secagem dos grãos para evitar danos ao pericarpo e ao endosperma (Sawazaki, 2001).

Quanto à fisiologia e arquitetura das plantas de milho-pipoca, geralmente os genótipos são mais prolíficos, possuem um sistema radicular menos desenvolvido, o que torna a planta mais suscetível, também, ao acamamento e à seca (Fantin et al., 1991). De acordo com Carpentieri-pípolo et al. (2005) isso, possivelmente, ocorre devido aos caracteres agronômicos do milho-pipoca correlacionarem-se negativamente com os caracteres de qualidade da pipoca.

Embora o Brasil, nos últimos anos, tenha reduzido à importação de milho-pipoca, a disponibilidade de variedades melhoradas ainda é escassa (Brugnera et al., 2003; Santos et al., 2008). Neste contexto, vislumbra-se o desenvolvimento e lançamento de cultivares visando mitigar a dependência de genótipos de países estrangeiros e atender a demanda dos produtores e consumidores, oferecendo-lhes cultivares com características de interesse, principalmente, alta produtividade e capacidade de expansão.

O milho, de uma forma geral, é considerado uma das culturas mais dependentes e exigentes em fertilizantes, principalmente os nitrogenados. Desta forma, o nitrogênio é o que mais onera a produção agrícola, pois em grande parte dos solos agricultáveis este elemento não está disponível em quantidades necessárias para proporcionar altas produtividades, exigindo, assim, aplicações suplementares. Por outro lado, se o empecilho econômico para a aplicação de fertilizantes nitrogenados for superado, pode-se ter problemas de cunho ambiental e na saúde, pois a produção desses compostos é altamente poluente. Assim sendo, o uso do nitrogênio vem sendo bastante estudado a fim de buscar alternativas sustentáveis no seu uso.

### **3.2. Nitrogênio na cultura do milho**

Na planta de milho, o nitrogênio assume grande importância devido a atuação decisiva no metabolismo, por ser constituinte da clorofila, aminoácidos,

ácidos nucleicos e das proteínas. Por conseguinte, as principais reações bioquímicas que ocorrem nos vegetais envolvem a presença do nitrogênio. Este nutriente representa grande importância no incremento da produção de grãos e na elevação do teor proteico (Hirel et al., 2007; Taiz e Zeiger, 2013).

Por apresentar essas características, o N é o elemento que causa maiores efeitos no aumento da produtividade na cultura do milho (Duete et al., 2008; Civardi et al., 2011). Além do efeito sobre a produtividade, ele interfere em diversas características da planta relacionadas ao crescimento e desenvolvimento, as quais, direta ou indiretamente, afetam a produtividade da cultura. Encontram-se relatos sobre a influência do N no aumento da massa de mil grãos (Mota et al., 2015), do número de espigas por planta (Soratto et al., 2010), da altura de plantas, do peso de espigas (Schiavinatti et al., 2011), do comprimento de espiga, do diâmetro do colmo (Soratto et al., 2010; Schiavinatti et al., 2011) e da produção de matéria seca (Duete et al., 2008).

As exigências de N, pelo milho, variam com os diferentes estádios de desenvolvimento da planta, sendo mínimas nos estádios iniciais, aumentando com a elevação da taxa de crescimento e alcançando um pico do estágio de florescimento até o início da formação dos grãos (Okumura et al., 2012). Os trabalhos demonstram que o aumento de produtividade está diretamente relacionado com o uso de suplementação de nitrogênio. No entanto, essa prática onera os custos de produção em virtude das principais fontes de nitrogênio disponíveis.

Embora houvesse grandes avanços na forma de aplicação e o aumento no uso de fertilizantes nitrogenados, o nitrogênio continuará sendo um dos fatores limitantes para produção de milho, pois exige uma grande participação dos custos de aplicações no valor total da produção e esse valor vem aumentando, podendo, assim, limitar o seu uso no futuro (Savary et al., 2014). Além disso, causa poluição ambiental, se aplicado em doses excessivas (Goulding et al., 2008).

Para a cultura do milho, a adubação nitrogenada é recomendada pela perspectiva de aumento na produtividade. É indicada a aplicação de um terço do N no plantio, visto que, na fase inicial, as plantas precisam de poucas quantidades deste nutriente e a aplicação do restante em cobertura (Sawazaki, 2001). Contudo, apresenta baixa eficiência em condições tropicais, pois apresenta grandes perdas,

em razão, principalmente, da lixiviação, desnitrificação e volatilização tanto da ureia quanto da amônia (NH<sub>3</sub>) (Gamboa et al., 1971).

Para contornar este empecilho, uma alternativa é o desenvolvimento de cultivares eficientes no uso do N. Com isso, vários autores vêm realizando a seleção de cultivares de milho comum adaptadas a ambientes deficientes em nitrogênio e/ou a identificação de genótipos responsivos à aplicação deste nutriente (Wu et al., 2011; DoVale et al., 2012; De Oliveira et al., 2013) e em milho–pipoca (Mundim et al., 2013).

O melhoramento para eficiência no uso de nitrogênio pode ser entendido sob dois enfoques: i) busca de genótipos superiores em ambientes com limitado suprimento, ou seja, genótipos eficientes no uso do nitrogênio; ii) busca de genótipos altamente responsivos em produtividade, em ambiente com suprimento elevado do nutriente, ou seja, genótipos responsivos à aplicação de adubos nitrogenados.

Na literatura, de modo geral, é enfatizado o primeiro aspecto, ou seja, o desempenho sob condições de estresse. Entretanto, a maioria dos experimentos realizados para o caráter produtividade de grãos, tem demonstrado que a herdabilidade é maior quando os genótipos são avaliados em ambientes favoráveis, pois quando se avalia em ambientes pobres em N a variação ambiental é muito alta e, conseqüentemente o valor da herdabilidade é reduzido. Contudo, programas de melhoramento genético de milho, em regiões tropicais, deveriam incluir seleção em baixo nitrogênio para maximizar ganhos com a seleção (Banziger et al., 1989; Santos et al., 2008).

Diante do exposto, pode-se presumir que ambiente adequado para a seleção de genótipos eficientes é o próprio local destinado ao cultivo. Muruli e Paulsem (1981) confirmaram esta pressuposição, onde os autores selecionaram genótipos de milho em solos com alta e baixa dose de N e comprovaram a superioridade da seleção específica, uma vez que o material selecionado em baixa dose de N apresentou superioridade produtiva no cultivo em solo pobre, enquanto ocorreu o contrário no cultivo em solo bem adubado, ou seja, o material selecionado na dose alta de N foi superior.

### **3.3. Melhoramento para eficiência ao nitrogênio**

O desenvolvimento de cultivares eficientes no uso de nitrogênio (EUN) constitui-se em estratégia importante para a diminuição do uso de fertilizantes, visto que é possível a produção de modo econômico com a utilização de menores quantidades desse nutriente. No entanto, existe dificuldade em encontrar no mercado cultivares que apresentem essa característica, em decorrência do germoplasma ter sido selecionado em condições otimizadas, como acontece nas empresas multinacionais de melhoramento genético de plantas. Sob condições de estresse, essas cultivares não irão expressar o seu potencial produtivo, pois os genes que controlam a produtividade em condições de estresse são, em grande parte, diferentes daqueles para condições ótimas de desenvolvimento (Atlin e Frey, 1989).

Para conduzir trabalhos visando à identificação de cultivares eficientes, o primeiro questionamento é como mensurar a eficiência. Diversas características morfoagronômicas e fisiológicas têm sido adotados para auxiliar na quantificação da eficiência no uso de nutrientes e também para serem utilizadas como indicadores dessa eficiência.

Com relação à eficiência no uso de nitrogênio, a maioria dos trabalhos foi realizada com gramíneas, principalmente com a cultura do milho. Um trabalho clássico para a interpretação dos fatores que contribuem para a eficiência de utilização de nitrogênio pelo milho foi apresentado por Moll et al. (1982), em que foram avaliados oito híbridos de milho, de acordo com a produtividade de grãos, acumulação de N nos grãos e restos culturais. Diferenças foram encontradas em todos os níveis de N e para todos os caracteres avaliados. Sob baixa disponibilidade de N, a diferença entre híbridos na EUN ocorreu devido, principalmente, a variação na utilização do nutriente acumulado, bem como à proporção do N translocado para os grãos.

Os mesmos autores definiram a EUN como a massa de grãos dividida pela massa de nitrogênio aplicada. Foi definido também dois componentes primários relacionados diretamente com a eficiência. A eficiência de absorção de nitrogênio que, é obtida pela quantidade de nitrogênio aplicado e a eficiência de utilização de nitrogênio, que é dada pela razão entre a massa de grãos e a quantidade de nitrogênio total na planta no estágio de maturidade.

As informações disponíveis na literatura quanto ao controle genético de caracteres associados à EUN em milho são contraditórias. Pollmer et al. (1979)

verificaram que o controle genético de absorção e translocação de nitrogênio na planta de milho é, predominantemente, aditivo; todavia, efeitos não-aditivos também foram importantes. Worku et al. (2008) reportaram que os efeitos aditivos para produtividade de grãos em alto nível de nitrogênio são mais importantes, entretanto em baixo nitrogênio os efeitos não-aditivos possuem maior importância. No entanto, DoVale et al. (2012), verificaram que os efeitos genéticos aditivos apresentam maior importância para a EUN, ao passo que a seleção poderia ser realizada pelo desempenho individual das linhagens genitoras dos híbridos. Todavia, Kamara (2015) afirma que os efeitos não-aditivos foram mais importantes na expressão da produtividade de grãos em ambos ambientes – baixa e alta disponibilidade de nitrogênio. Deste modo, a seleção de genótipos superiores deve ser feita com base no desempenho dos híbridos.

Tem-se, pois, uma gama de trabalhos na literatura abordando o controle genético da eficiência no uso do nitrogênio no milho comum. Porém, inexistem estudos correlatos ao controle genético da eficiência ao uso de nitrogênio em milho-pipoca. É de clarividência que a compreensão do controle genético da característica de interesse é de extrema importância para o desenvolvimento de um programa de melhoramento genético, pois irá definir qual o método de melhoramento deverá ser utilizado.

#### **3.4. Análise dialélica**

Em programa de melhoramento envolvendo hibridações, a seleção de genitores constitui uma das etapas mais importantes. Por isso, é essencial que a escolha destes seja feita criteriosamente, pois quando é baseada apenas em caracteres agronômicos desejáveis, não assegura a obtenção de progênies com alto potencial genético. Uma das técnicas genético-estatística frequentemente utilizada no melhoramento de diversas culturas, sendo mais intensamente na cultura do milho, é a análise de cruzamentos dialélicos, em razão do grande número de informações genéticas que oferece (Hallauer et al., 2010; Cruz et al., 2012).

Os cruzamentos dialélicos correspondem ao intercruzamento de “n” genótipos, dois a dois, produzindo  $n^2$  combinações possíveis, em que  $n(n-1)/2$  representa os híbridos simples e  $n(n-1)/2$  os recíprocos, perfazendo uma tabela dialélica completa (Ramalho et al., 2012). A análise dialélica tem por finalidade analisar o delineamento genético, estimando parâmetros úteis na seleção de



genitores para hibridação e no entendimento dos efeitos genéticos envolvidos na determinação dos caracteres (Cruz et al., 2012). Ela pode incluir, além dos híbridos, os respectivos pais, os híbridos recíprocos e outras gerações como  $F_2$  e retrocruzamentos.

Entre os métodos mais comumente utilizados citam-se os propostos por Griffing (1956), pelos quais estima-se a capacidade geral de combinação (CGC) e a capacidade específica de combinação (CEC) dos genótipos provenientes de cruzamentos dialélicos. A primeira é a medida do desempenho relativo de uma linhagem em uma série de cruzamentos e está associada a efeitos genéticos aditivos, enquanto a segunda caracteriza o desempenho de combinações híbridas específicas em relação à média dos genitores e está relacionada a efeitos de dominância, epistasia e vários tipos de interações alélicas.

Os tipos de cruzamentos dialélicos podem ser balanceados (completo ou de meia tabela), parciais e incompletos. O dialelo completo é bastante utilizado; neste incluem os híbridos  $F_1$ 's entre todos os pares de combinações dos genitores, seus híbridos recíprocos e, algumas vezes, outras gerações relacionadas, como  $F_2$ 's. Com a utilização deste tipo de dialelo é possível fazer inferências quanto à herança materna, pois são utilizados os cruzamentos recíprocos, em que um determinado genitor é usado ora como parental masculino, ora como feminino (Cruz et al., 2012).

Existem vários relatos na literatura da aplicação de dialelo para elucidação do controle genético e determinação de grupos heteróticos em milho (Lee et al., 2005; Miranda et al., 2005; Pswarayi e Vivek, 2008). Neste sentido, Guimarães (2006) avaliou o padrão da herança da eficiência no uso de nitrogênio de populações de milho por meio de cruzamentos dialélicos entre linhagens selecionadas em ambientes com baixa disponibilidade de N. Neste, verificou diferenças significativas entre as linhagens eficientes e as ineficientes. No qual observou que as linhagens mais eficientes foram as mais responsivas, produzindo híbridos, de modo geral, mais eficientes e mais responsivos que os híbridos de linhagens ineficientes no uso de N. Entretanto, o autor concluiu que para cruzamentos entre linhagens de milho eficientes no uso de N, os efeitos genéticos aditivos e não-aditivos são importantes para a produtividade de grãos tanto em baixo quanto em alto N

## 4. MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1. Seleção para eficiência no uso de nitrogênio

Foram avaliadas 29 linhagens S<sub>7</sub> de milho-pipoca, pertencentes ao Banco de Germoplasma da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), das quais, cinco provieram da população Viçosa, sete da população Beija-Flor, sete da população BRS-Angela e dez da população-base do programa, UENF 14.

Os experimentos foram realizados em dois níveis de disponibilidade de nitrogênio: baixa e ideal, e em dois locais: Campos dos Goytacazes, RJ, com localização de 21° 42' 48" S, 41° 20' 38" O, com altitude de 14 metros e na Estação Experimental de Itaocara, RJ, de coordenadas 21° 38' 50" S, 42° 03' 46" O, com altitude de 58 metros. Correspondendo as regiões Norte e Noroeste Fluminense, respectivamente. O clima de ambos ambientes é do tipo tropical úmido (Aw), segundo a classificação de Köppen. As informações sobre os atributos químicos do solo se encontram na Tabela 1.

**Tabela 1.** Atributos químicos do solo nas áreas experimentais em Itaocara e Campos dos Goytacazes, nas profundidades de 0-10 e 10-20 cm.

Itaocara, RJ										
Profundidade	Ph	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	Na	C	MO
	H <sub>2</sub> O	mg/dm <sup>-3</sup>	.....mmol/dm <sup>-3</sup> .....					g dm <sup>-3</sup>		
0 – 10 cm	5.1	5.0	3.7	11.9	8.0	1.2	18.2	1.1	8.9	15.3
10 – 20 cm	4.9	2.0	1.9	11.9	7.2	1.8	17.8	0.6	9.3	16.0
Campos dos Goytacazes, RJ										
Profundidade	Ph	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	Na	C	MO
	H <sub>2</sub> O	mg dm <sup>-3</sup>	.....mmol/dm <sup>-3</sup> .....					g dm <sup>-3</sup>		
0 – 10 cm	4.8	22.0	2.6	16.3	8.5	1.2	21.4	12.3	8.9	15.3
10 – 20 cm	5.0	10.0	1.7	15.6	7.4	1.5	18.3	10.3	9.3	16.0

O delineamento experimental utilizado, em ambos experimentos, foi em blocos casualizados com três repetições. A unidade experimental foi constituída por uma linha de 5,00 m, com espaçamento de 0,90 m entre linhas e 0,20 m entre plantas. Foram semeadas duas sementes por cova e, aos 21 dias após emergência, foi realizado o desbaste, deixando uma planta por cova, resultando em estande de 25 plantas por parcela.

Para a diferenciação dos experimentos quanto ao nível de nitrogênio, foi adotada a seguinte estratégia: para os experimentos com disponibilidade ideal de nitrogênio, a adubação de semeadura foi realizada de acordo com a análise de solo e adicionando 32 kg ha<sup>-1</sup> de nitrogênio; a adubação de cobertura para suplementação desse nutriente foi realizada com 108 kg ha<sup>-1</sup>. Para os experimentos com baixa disponibilidade de nitrogênio (baixo N), a adubação de plantio foi semelhante à do experimento anterior e a adubação de cobertura constituiu-se de 30% da realizada no ambiente com dosagem ideal de N. Para ambos os casos utilizou-se ureia como fonte de nitrogênio.

As características analisadas foram: i) produtividade de grãos (PG), obtida pela pesagem dos grãos após debulha de cada unidade experimental e estimada para kg ha<sup>-1</sup>; e ii) capacidade de expansão (CE), obtida pela relação entre o volume de pipoca expandida e a massa de 30 g, expressa em mL g<sup>-1</sup>, utilizando-se a média de duas amostras por parcela.

Inicialmente, foi realizada uma análise de variância para cada ambiente, com intuito de verificar a homogeneidade da variância residual; posteriormente, foi realizada a análise de variância conjunta, considerando os efeitos de genótipos, locais e níveis, tendo como principal objetivo determinar possíveis interações de genótipos com as disponibilidades de nitrogênio. Posteriormente, foi estimada a acurácia seletiva (Resende e Duarte, 2007) como sendo  $AS = (1-1/F)^{1/2}$ , em que F é o valor do teste F para genótipos.

A análise multivariada GGE *Biplot* foi fundamentada na informação de médias fenotípicas, considerando o seguinte modelo:

$$\bar{Y}_{ij} - \mu = G_i + E_j + GE_{ij},$$

em que  $\bar{Y}_{ij}$  representa a média fenotípica do genótipo i no ambiente j (disponibilidade ideal ou baixa de N);  $\mu$  é a constante geral;  $G_i$  é o efeito do genótipo i;  $E_j$  é efeito do ambiente j; e  $GE_{ij}$  é efeito da interação entre o genótipo i com o ambiente j.

O modelo GGE *Biplot* não separa o efeito de genótipo (G) do efeito da interação genótipos x ambientes (GE), mantendo-os juntos em dois termos multiplicativos, representados na equação:

$$Y_{ij} - \mu - \beta_j = g_{1i}e_{1j} + g_{2i}e_{2j} + \varepsilon_{ij},$$

em que  $Y_{ij}$  é o desempenho esperado do genótipo i no ambiente j;  $\mu$  é a constante geral das observações;  $\beta_j$  é o efeito principal do ambiente j;  $g_{1i}$  e  $e_{1j}$  são os escores principais para o i-ésimo genótipo no j-ésimo ambiente, respectivamente;  $g_{2i}$  e  $e_{2j}$  são os escores secundários para o i-ésimo genótipo no j-ésimo ambiente, respectivamente; e  $\varepsilon_{ij}$  é o resíduo não explicado por ambos os efeitos.

Assim, a construção do gráfico *Biplot* no modelo GGE é realizada por meio da dispersão simples de  $g_{1i}$  e  $g_{2i}$  para genótipos e  $e_{1j}$  e  $e_{2j}$  para ambientes, por meio da Decomposição em Valores Singulares (DVS), conforme a equação:

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

em que  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$  são os maiores autovalores do primeiro e segundo componente principal ACP<sub>1</sub> e ACP<sub>2</sub>, respectivamente;  $\xi_{i1}$  e  $\xi_{i2}$  são os autovetores do i-ésimo genótipo para ACP<sub>1</sub> e ACP<sub>2</sub>, respectivamente; e  $\eta_{1j}$  e  $\eta_{2j}$  são os autovetores do j-ésimo ambiente para ACP<sub>1</sub> e ACP<sub>2</sub>, respectivamente. A análise GGE *Biplot* foi realizada com auxílio do *software* R (R Development Core Team, 2014).

Para avaliar a adequação de um *Biplot* em exibir os padrões de uma tabela de dupla entrada, foi realizado o cálculo “relação de informação” (RI), proposto por Yan e Tinker (2006). A RI pode ser calculada para cada componente principal utilizando a proporção da variação total explicada por cada componente principal multiplicado por  $k$ . Se não houver correlação entre os ambientes, todos os  $k$  PCs devem ser completamente independentes e a proporção da variação total explicada por cada PC deve ser exatamente  $1/k$ .

Quando existir correlação entre os ambientes, a proporção da variação explicada pelos primeiros PCs deve ser maior do que  $1/k$ , e a variação explicada por outros PCs deve ser inferior ou igual a  $1/k$ . Um componente principal com  $RI > 1$  contém padrões (associações entre ambientes); um PC com  $RI = 1$  não contém padrões, mas pode conter alguma informação independente; e um PC com  $RI < 1$  não contém qualquer padrão ou informação (Yan et al., 2007).

## 4.2. Efeitos gênicos e seleção de híbridos EUN

### 4.2.1. Análise dialélica

Os genótipos utilizados foram obtidos a partir de um cruzamento no esquema de dialelo completo com recíprocos entre dez linhagens  $S_7$  contrastantes quanto ao uso do nitrogênio (Santos et al., 2017). As linhagens foram previamente classificadas como ineficientes e não-responsivas (INR), eficientes e responsivas (ER), e intermediárias quanto a eficiência e responsividade (Tabela 2).

**Tabela 2.** Descrição das linhagens  $S_7$  utilizadas no cruzamento dialélico quanto a eficiência no uso do nitrogênio.

Genitores	Classificação quanto a eficiência no uso do nitrogênio
L54	Intermediária
L59	Intermediária
L61	Não eficiente e não responsiva
L75	Não eficiente e não responsiva
L76	Intermediária
L77	Intermediária
L80	Não eficiente e não responsiva
P2	Eficiente e responsiva
P6	Eficiente e responsiva
P7	Eficiente e responsiva

As 90 progênies híbridas (Tabela 3), juntamente com os dez genitores S<sub>7</sub>, foram avaliados no delineamento em látice triplo 10x10, no qual cada unidade experimental consistiu de uma linha de 4,20 m, espaçada 0,25 m entre plantas e 0,60 m entre linhas. Foram semeadas duas sementes por cova e, aos 21 dias após emergência, foi realizado o desbaste, deixando uma planta por cova, resultando em estande de 18 plantas por parcela.

**Tabela 3.** Identificação dos híbridos obtidos no dialelo completo. Campos dos Goytacazes, RJ, 2015.

Híbrido	Cruzamento	Híbrido	Cruzamento	Híbrido	Cruzamento
1	L54 x L59	35	L75 x L76	68	L80 x P6
2	L54 x L61	36	L75 x L77	69	L80 x P7
3	L54 x L75	37	L75 x L80	70	Genitor
4	L54 x L76	38	L75 x P2	71	Genitor
5	L54 x L77	39	L75 x P6	72	P2 x L54
6	L54 x L80	40	L75 x P7	73	P2 x L59
7	L54 x P2	41	L76 x L54	74	P2 x L61
8	L54 x P6	42	L76 x L59	75	P2 x L75
9	L54 x P7	43	L76 x L61	76	P2 x L76
10	Genitor	44	L76 x L75	77	P2 x L77
11	Genitor	45	L76 x L77	78	P2 x L80
12	L59 x L54	46	L76 x L80	79	P2 x P6
13	L59 x L61	47	L76 x P2	80	P2 x P7
14	L59 x L75	48	L76 x P6	81	P6 x L54
15	L59 x L76	49	L76 x P7	82	P6 x L59
16	L59 x L77	50	Genitor	83	P6 x L61
17	L59 x L80	51	Genitor	84	P6 x L75
18	L59 x P2	52	L77 x L54	85	P6 x L76
19	L59 x P6	53	L77 x L59	86	P6 x L77
20	L59 x P7	54	L77 x L61	87	P6 x L80
21	L61 x L54	55	L77 x L75	88	P6 x P2
22	L61 x L59	56	L77 x L76	89	P6 x P7
23	L61 x L75	57	L77 x L80	90	Genitor
24	L61 x L76	58	L77 x P2	91	Genitor
25	L61 x L77	59	L77 x P6	92	P7 x L54
26	L61 x L80	60	L77 x P7	93	P7 x L59
27	L61 x P2	61	L80 x L54	94	P7 x L61
28	L61 x P6	62	L80 x L59	95	P7 x L75
29	L61 x P7	63	L80 x L61	96	P7 x L76
30	Genitor	64	L80 x L75	97	P7 x L77
31	Genitor	65	L80 x L76	98	P7 x L80
32	L75 x L54	66	L80 x L77	99	P7 x P2
33	L75 x L59	67	L80 x P2	100	P7 x P6
34	L75 x L61	-	-	-	-

Para a diferenciação dos experimentos utilizou-se o mesmo procedimento para a seleção das linhagens, já relatado no item 4.1. Porém a adubação de cobertura foi realizada com 128 kg ha<sup>-1</sup> de N, nos estádios V4 e V6, utilizando ureia como fonte de nitrogênio. Utilizando-se a produtividade de grãos em alta e baixa disponibilidade de nitrogênio, que foi obtida pela pesagem dos grãos de cada unidade experimental, corrigida para 13% de umidade e estimada para kg ha<sup>-1</sup>, foram estimados para cada genótipo em cada repetição dois índices para a eficiência no uso do nitrogênio. Inicialmente, foi estimado o índice descrito por Wu et al. (2011), que foi modificada a partir da eficiência agrônômica (EABN), expressa por:

$$EABN_{ij} = \frac{PG_{(BN)ij}}{PG_{(AN)ij}} \cdot PG_{(BN)ij}$$

em que, EABN<sub>ij</sub> é eficiência agrônômica à baixa disponibilidade de nitrogênio da linhagem i na repetição j; PG(AN)<sub>ij</sub> é a produtividade de grãos no ambiente de alta disponibilidade de nitrogênio (valor fenotípico) da linhagem i na repetição j; PG(BN)<sub>ij</sub> é a produtividade de grãos no ambiente de baixa disponibilidade de nitrogênio (valor fenotípico) da linhagem i na repetição j.

Em seguida, foi estimada a média harmônica da performance relativa (MHPR), (Resende, 2007), qual seja:

$$MHPR_{ij} = \frac{2}{\left(\frac{PG_{(AN)ij}}{\bar{X}_{(AN)}}\right)^{-1} + \left(\frac{PG_{(BN)ij}}{\bar{X}_{(BN)}}\right)^{-1}}$$

em que MHPR<sub>ij</sub> é a média harmônica da performance relativa da linhagem i na repetição j; PG(AN)<sub>i</sub> é a produtividade de grãos no ambiente de alta disponibilidade de nitrogênio (valor fenotípico) da linhagem i na repetição j; PG(BN)<sub>i</sub> é a produtividade de grãos no ambiente de baixa disponibilidade de nitrogênio (valor fenotípico) da linhagem i na repetição j;  $\bar{X}_{(AN)}$  é a média geral do ambiente de alta disponibilidade de N;  $\bar{X}_{(BN)}$  é a média geral do ambiente de baixa disponibilidade de N.

A análise de capacidade combinatória foi realizada de acordo com o Método I de Griffing (1956), em que são avaliadas as p<sup>2</sup> combinações correspondentes aos parentais e seus cruzamentos, incluindo-se os recíprocos. No qual foi considerado que os genótipos são de efeito fixo, considerando o seguinte modelo:

$$Y_{ij} = m + g_i + g_j + s_{ij} + r_{ij} + a_k + ga_{ik} + ga_{jk} + as_{ijk} + ra_{ijk} + \varepsilon_{ijk},$$

em que  $Y_{ij}$  é valor médio da combinação híbrida  $ij$ ;  $m$  é a constante inerente às observações;  $g_i$  e  $g_j$  são os efeitos da capacidade geral de combinação dos pais de ordem  $ij$ , respectivamente;  $s_{ij}$  é o efeito da capacidade específica de combinação para os cruzamentos entre os genitores de ordem  $i$  e  $j$ ;  $r_{ij}$  é o efeito recíproco que mede as diferenças proporcionadas pelo genitor  $i$  ou  $j$ , quando utilizado como macho ou fêmea no cruzamento  $ij$ ;  $a_k$  é o efeito do ambiente  $k$ ;  $ga_{ik}$  e  $ga_{jk}$  são os efeitos da interação entre a capacidade geral de combinação dos pais de ordem  $i$  e  $j$ , respectivamente, com os ambientes  $k$ ;  $as_{ijk}$  é o efeito da interação entre a capacidade específica de combinação entre os pais  $i$  e  $j$  e o ambiente  $k$ ;  $ra_{ijk}$  é a interação entre o efeito recíproco e o ambiente  $k$ ;  $\varepsilon_{ijk}$  é o erro experimental médio associado à observação de ordem  $ij$ , com NID  $(0, \sigma^2)$ .

O grau médio de dominância (*GMD*) foi estimado por meio da expressão:  $GMD = 2\sigma^2_{CGC} / (2\sigma^2_{CGC} + \sigma^2_{CEC})$ , conforme descrito por Baker (1978), na qual  $2\sigma^2_{CGC}$  é a forma quadrática (análoga aos componentes de variância, mas referindo ao efeito fixo) derivada do efeito do quadrado médio da CGC;  $\sigma^2_{CEC}$  é a forma quadrática dos efeitos da CEC.

#### 4.2.2. Seleção dos híbridos EUN

Para verificação do desempenho dos híbridos foram avaliadas as seguintes variáveis morfofisiológicas e produtivas, a saber: i) teor de clorofila (SPAD): avaliado no florescimento feminino, aferido no terço médio na folha da espiga, com auxílio de um clorofilômetro da marca Minolta (modelo SPAD-502) em seis plantas por parcela; ii) florescimento feminino (FF): considerado quando 50% das plantas na parcela apresentavam o estilo-estigma visível; iii) intervalo de florescimento (IF): diferença entre o florescimento masculino e florescimento feminino; iv) altura de planta (AP): avaliada, em cm, do nível do solo à inserção da última folha (folha bandeira), obtida da média de seis plantas aleatórias por parcela; v) altura da espiga (AE): obtida pela quantificação da distância, em cm, do nível do solo ao nó de inserção da espiga superior, expressa pela média de seis plantas aleatórias por parcela; vi) prolificidade (PROL): refere-se ao número médio de espigas por planta; vii) diâmetro da espiga (DE): média do diâmetro da espiga despalhada, em milímetros; viii) comprimento de espiga (CPE): média do comprimento das espigas



de cada parcela, expressa em centímetros; ix) massa de 100 grãos (M100): aferida em balança analítica, utilizando-se 100 grãos e expressa em gramas; x) produtividade de grãos (PROD): obtida por meio da produção de grãos da parcela, corrigido para 13% de umidade e extrapolado para  $\text{kg ha}^{-1}$ ; e xi) capacidade de expansão (CE): determinada pela utilização de forno micro-ondas, colocando-se 30 g de sementes em saco de papel *kraft* especial para o pipocamento, na potência de 1.000 W, por dois minutos e vinte segundos, em duas repetições por tratamento, e o volume da pipoca expandida foi aferido com o auxílio de uma proveta graduada de 2.000 mL, sendo o quociente do volume pipocado dividido por 30 e expresso em  $\text{mL g}^{-1}$ .

Inicialmente, foi realizada uma análise de variância para cada ambiente, com intuito de verificar a homogeneidade da variância residual; posteriormente, foi realizada a análise de variância conjunta, considerando os efeitos de genótipos, locais e níveis de nitrogênio. O efeito de genótipo foi desdobrado em genitor,  $F_1$  e recíproco, tendo como principal objetivo determinar possíveis interações destes com as disponibilidades de nitrogênio.

Para verificar a eficiência e responsividade ao uso do nitrogênio, os híbridos foram classificados em quatro categorias, de acordo com a produção em condições de estresse (baixa disponibilidade de nitrogênio) e em condição ideal de disponibilidade de nitrogênio, quais sejam:

I: híbridos eficientes e não-responsivos (ENR): são os que apresentam alta produção sob baixos teores do nutriente e não respondem ao fornecimento do mesmo;

II: híbridos eficientes e responsivos (ER): são os que apresentam alta produtividade de grãos sob baixa disponibilidade do nutriente e respondem positivamente ao fornecimento do mesmo;

III: híbridos ineficientes e responsivos (IR): são as que produzem pouco sob baixa disponibilidade do nutriente e respondem positivamente ao fornecimento do mesmo;

IV: híbridos ineficientes e não-responsivos (INR): são aqueles que produzem pouco sob baixa disponibilidade do nutriente e não respondem ao fornecimento do mesmo.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. Seleção das linhagens para eficiência no uso do nitrogênio

Houve efeito significativo ( $p < 0,01$ ) para todas as fontes de variação, exceto para a interação Local x Nível de nitrogênio (L x N). A diferença significativa entre os genótipos indica a existência de variabilidade genética entre as linhagens. O efeito significativo do nível de nitrogênio demonstra que as dosagens de N utilizadas foram adequadas para diferenciar os ambientes, que foram suficientemente contrastantes para possibilitar a adequada seleção de genótipos eficientes no uso do nutriente (Tabela 4).

O efeito significativo para as interações Genótipo x Nível de nitrogênio (G x N), Genótipo x Local (G x L) e a interação tripla (G x L x N) para rendimento de grãos, evidencia que as médias de produtividade de grãos são distintas e que a classificação dos genótipos, possivelmente, foi alterada entre os experimentos com baixa e adequada disponibilidade de nitrogênio. Deste modo, a seleção de genótipos eficientes ao uso do nitrogênio, com base na produtividade de grãos, deve ser específica para o ambiente e local, e não em função do desempenho médio, pois os alelos que controlam a expressão de determinado caráter, em baixa suplementação nutricional, são, parcialmente, diferentes dos alelos que controlam esse mesmo caráter em condição ideal de suplementação (Souza et al., 2008).

**Tabela 4-** Resumo da análise de variância conjunta para a produtividade de grãos ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) e capacidade de expansão ( $\text{mL g}^{-1}$ ) de 29 linhagens S<sub>7</sub> de milho-pipoca avaliadas em níveis contrastantes de nitrogênio no solo.

Fonte de Variação	GL	Quadrados Médios	
		Produtividade	Capacidade de Expansão
(Bloco/N)/L	8	34.193,47	19,931
Genótipo (G)	28	2.745.565,46**	228,078**
Local (L)	1	2.266.088,28**	4,604 <sup>ns</sup>
Nível (N)	1	1.843.703,73**	8,714 <sup>ns</sup>
Genótipo x Local (G x L)	28	99.393,97**	38,805**
Genótipo x Nível (G x N)	28	106.969,80**	18,904 <sup>ns</sup>
Local x Nível (L x N)	1	16.634,59 <sup>ns</sup>	9,079 <sup>ns</sup>
G x L x N	28	233.316,90**	13,505 <sup>ns</sup>
Resíduo	224	23.274,88	18,538
Acurácia	-	0,99	0,96
Média	-	955,56	30,25

\*\* , <sup>ns</sup>: significativo em  $p < 0,01$ ; e não-significativo a 5% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

Para a capacidade de expansão, o efeito significativo ( $p < 0,01$ ) para fonte de variação genótipos, denota presença de variabilidade desta variável entre as linhagens avaliadas. Todavia, o ambiente não revelou influência sobre CE, considerando-se a ausência de significância para a interação tripla G x L x N, o que está em concordância com o preconizado por Lu et al. (2003), para os quais a capacidade de expansão é pouco influenciada pelo ambiente. Esse resultado remete a inferência da expressão oligogênica para capacidade de expansão, referenciada por Dofing et al. (1991), sendo uma variável em que os efeitos aditivos são os principais componentes da variância genética (Pereira e Amaral Junior, 2001).

A precisão experimental foi avaliada por meio da estimativa de acurácia seletiva (AS). Este parâmetro reflete a qualidade das informações e dos procedimentos utilizados na predição dos valores genéticos (Pimentel et al., 2014). Assim, um parâmetro adequado para avaliar a qualidade dos experimentos pode ser sumarizado em termos de uma única estatística, a qual contempla, simultaneamente, o coeficiente de variação experimental, o número de repetições e o coeficiente de variação genotípica (Resende e Duarte, 2007). Neste contexto, observa-se valor expressivo de acurácia, o que representa elevada precisão na

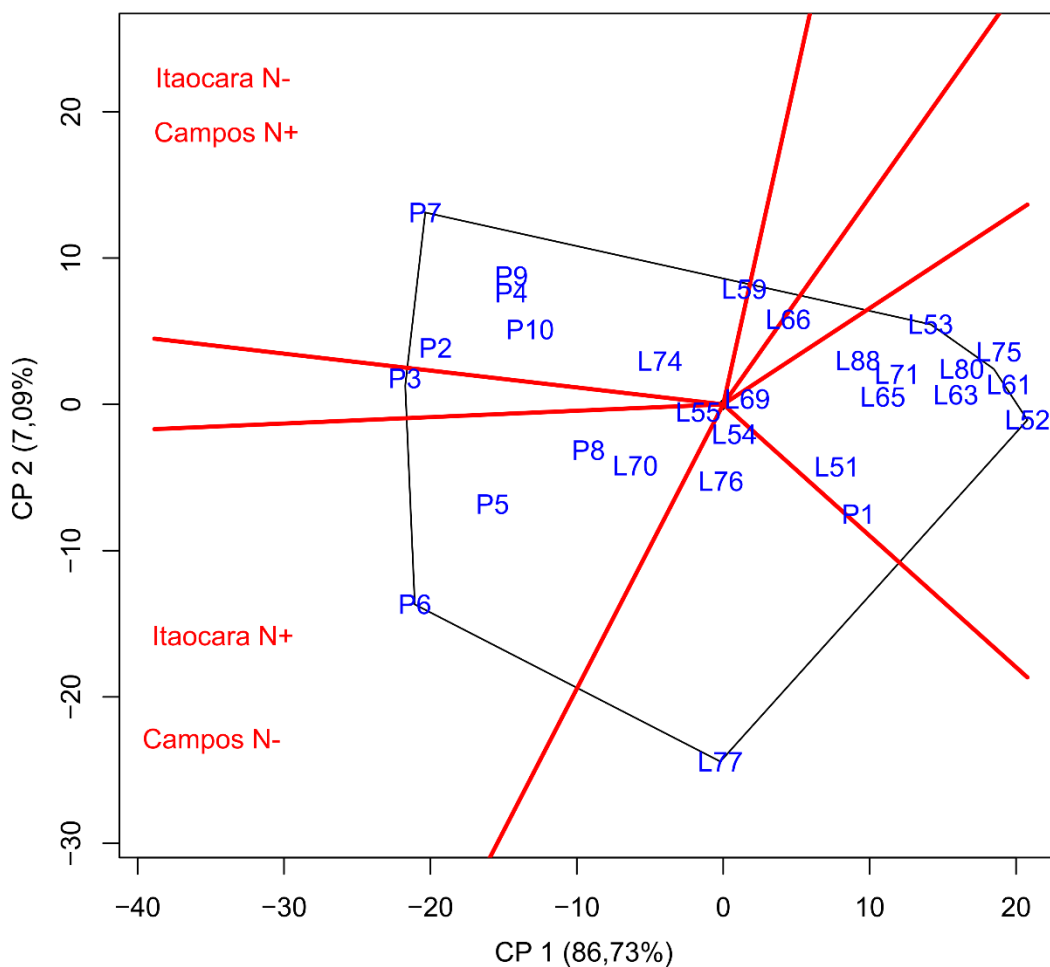
identificação e possibilidade de sucesso na seleção de indivíduos eficientes no uso do nitrogênio.

Os dois primeiros componentes principais explicaram 93,82% da variação total. Desta forma, o método GGE *Biplot* explicou grande proporção da soma de quadrados de genótipos e da interação GA, indicando que há alta confiabilidade nos resultados produzidos pela técnica multivariada. Quanto à relação de informação (RI), qualquer componente principal com um valor de RI menor do que 1,0 exerce pouca informação, ao passo que, um componente principal com um valor de RI superior a 1,0, como pode ser observado para o CP1, possui padrão importante. Portanto, o *Biplot* foi considerado adequado para representar os padrões relacionados à interação (Tabela 5).

**Tabela 5-** Valor singular, variação explicada, proporção acumulada e relação da informação (RI) dos quatro componentes principais (PCs) da análise GGE *Biplot*.

PC	Valor singular	% explicada	% acumulada	RI
1	5.082,73	86,73	86,73	3,47
2	1.453,16	7,09	93,82	0,28
3	1.040,79	3,64	97,46	0,15
4	870,47	2,54	100,00	0,10

Com relação ao desempenho produtivo, os genótipos alocados no vértice do polígono revelam-se mais distantes da origem que os demais genótipos dentro do setor delimitado por eles, sendo classificados como os mais responsivos. Estes podem ser os genótipos com desempenho superior ou inferior em alguns ou em todos os ambientes e, assim, podem ser utilizados para identificar possíveis mega-ambientes. Por sua vez, os genótipos localizados no interior do polígono são os menos responsivos aos estímulos dos ambientes (Figura 1).



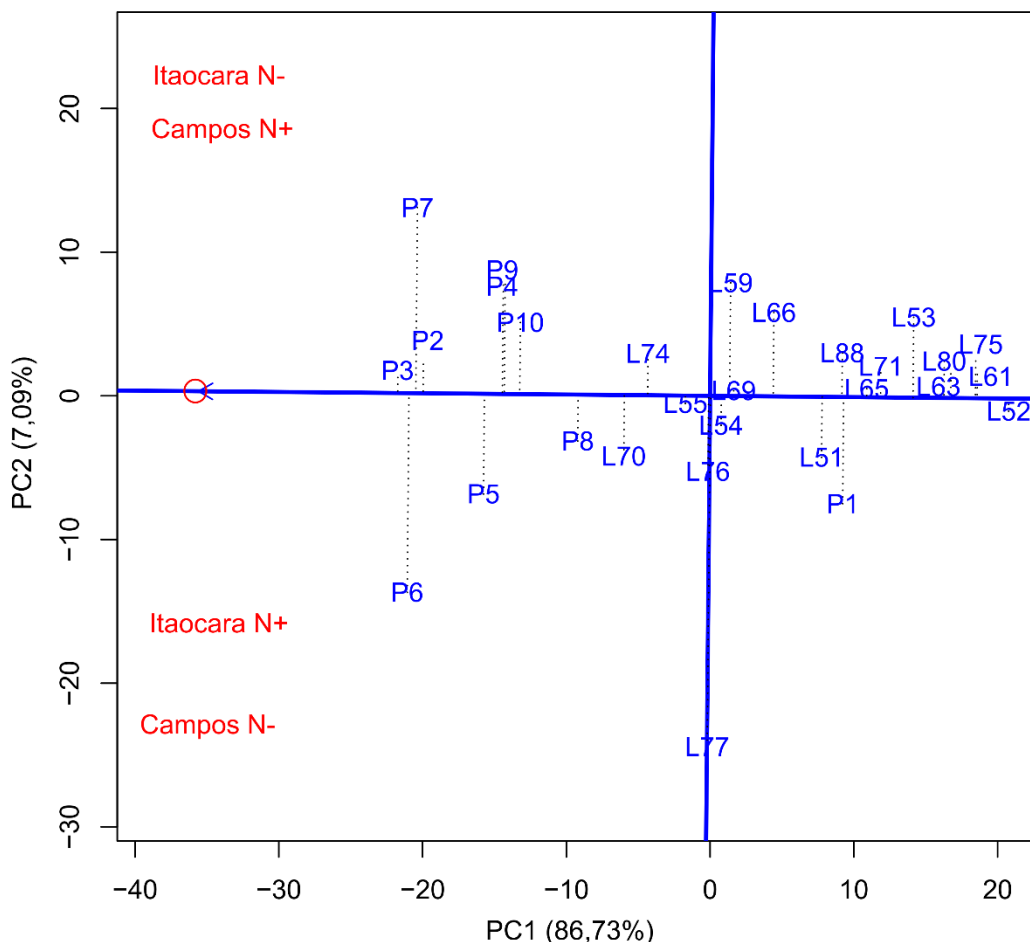
**Figura 1-** GGE *Biplot* representando o gráfico "quem venceu onde" (*which won where*) de 29 linhagens de milho-pipoca.

As linhagens P7 e P6 são os vértices do polígono em que os ambientes estão contidos; logo, são as mais produtivas em ambos os ambientes, com baixa e adequada disponibilidade de nitrogênio (Figura 1). Têm-se, pois, que estes genótipos são prováveis fontes de alelos favoráveis para a eficiência no uso do nitrogênio, apresentando potencial para serem utilizados como genitores em programas de recombinação gênica, no intento de aumentar a frequência de alelos favoráveis. Essa opção será tanto mais eficiente quanto maior a influência da aditividade na expressão da eficiência no uso do nitrogênio. Porém, ainda não há estudos sobre a herança da eficiência do uso do nitrogênio em milho-pipoca. Por sua vez, em milho comum, há relatos que os efeitos aditivos têm maior importância para os componentes da EUN (Worku et al., 2008; DoVale et al., 2012). Portanto, a seleção pode ser realizada pelo desempenho *per se* das linhagens, uma vez que

as combinações híbridas obtidas entre os seus cruzamentos também serão superiores em relação à EUN.

Quando genótipos dão origem a vértices do polígono, mas não contêm nenhum ambiente agrupado, são considerados desfavoráveis aos ambientes testados, revelando baixa responsividade e produtividade. Desse modo, os indivíduos localizados nos setores por eles compreendidos também são desfavoráveis à recomendação como genitores para comporem programas de melhoramento genético objetivando aumento na expressão da característica em condições de estresse. Assim, as linhagens contidas nestes setores podem ser consideradas como não-eficientes e não-responsivas ao uso do nitrogênio. São elas: L66, L65, P1, L51, L53, L71, L63, L61, L75, L80 e L52.

A produtividade de grãos e a estabilidade dos genótipos foram avaliadas a partir da coordenação do ambiente médio (CAM) (Figura 2). Neste método, um ambiente ideal é definido a partir da média dos escores dos componentes principais 1 e 2 (PC1 e PC2) de todos os ambientes, representado no gráfico por um pequeno círculo. A linha que passa pela origem do *Biplot* e pelo ambiente ideal é chamada de eixo do ambiente ideal e representa a CAM abscissa; e a pequena seta aponta para o maior valor genotípico de efeito principal. A CAM ordenada é o eixo que passa pela origem do *Biplot*, é perpendicular a CAM abscissa e indica um maior efeito da interação genótipos x ambientes, menor estabilidade e, ainda, separa os genótipos superiores e inferiores à média geral (Yan e Tinker, 2006).

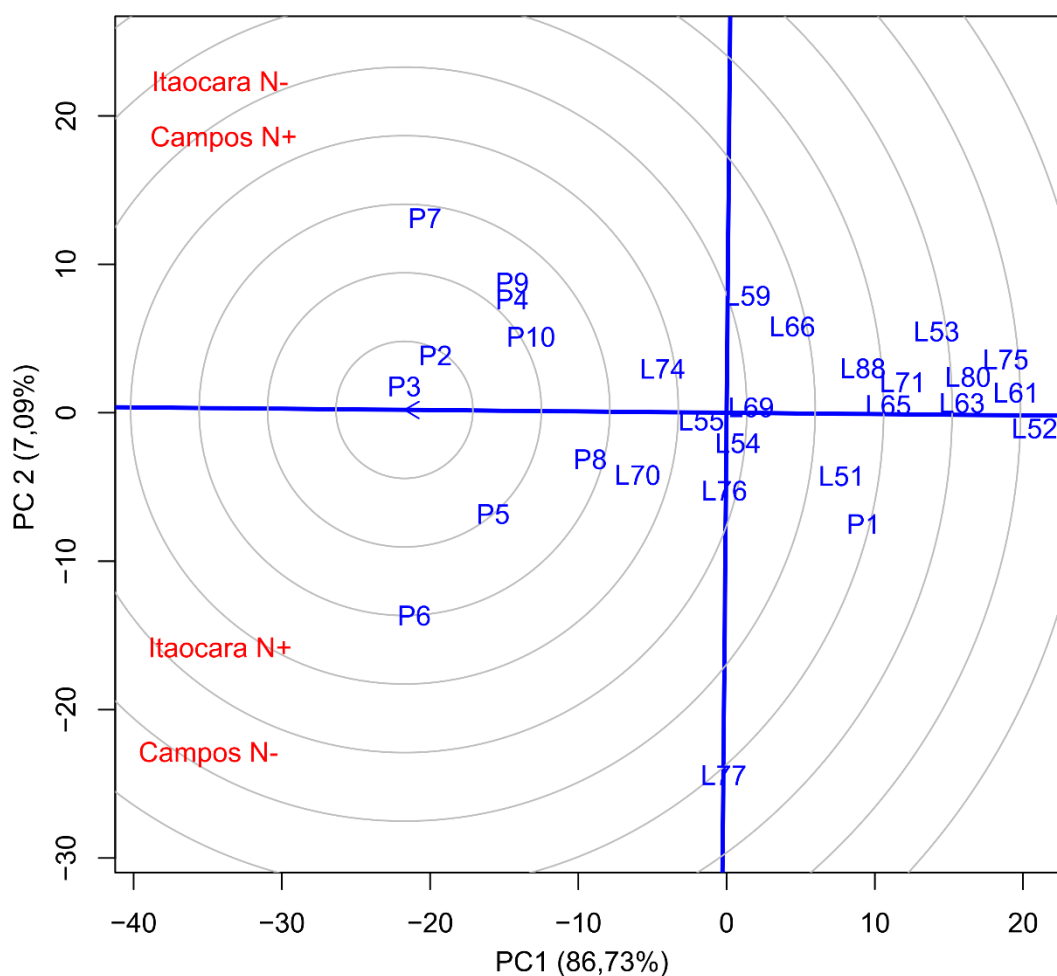


**Figura 2-** GGE *Biplot* indicando o *ranking* de produtividade de 29 linhagens de milho-pipoca com suas respectivas estabilidades produtivas.

Nesse sentido, os genótipos que possuem produtividade de grãos superior à média, são P3, P7, P6, P2, P5, P9, P4, P10, P9, P8, L70, L74 e L55; os genótipos L54, L76 e L77 expressaram produtividade semelhante à produtividade média geral e os demais exibiram produtividade inferior à produtividade média geral. Além da produtividade média, a estabilidade do genótipo é um ponto crucial a ser analisado. Quanto maior a projeção do genótipo no eixo da CAM ordenada, maior é a instabilidade do genótipo, representando uma maior interação com os ambientes. Deste modo, pode-se observar que o genótipo L77 foi o mais instável.

O genótipo “ideal” deve apresentar produtividade de grãos média elevada em todos os ambientes avaliados. Este genótipo ideal é graficamente definido pelo vetor mais longo no componente principal 1 e 2 sem projeções, representado pela seta no centro dos círculos concêntricos (Figura 3). Embora este genótipo seja mais um modelo representativo, é usado como uma referência para a identificação do

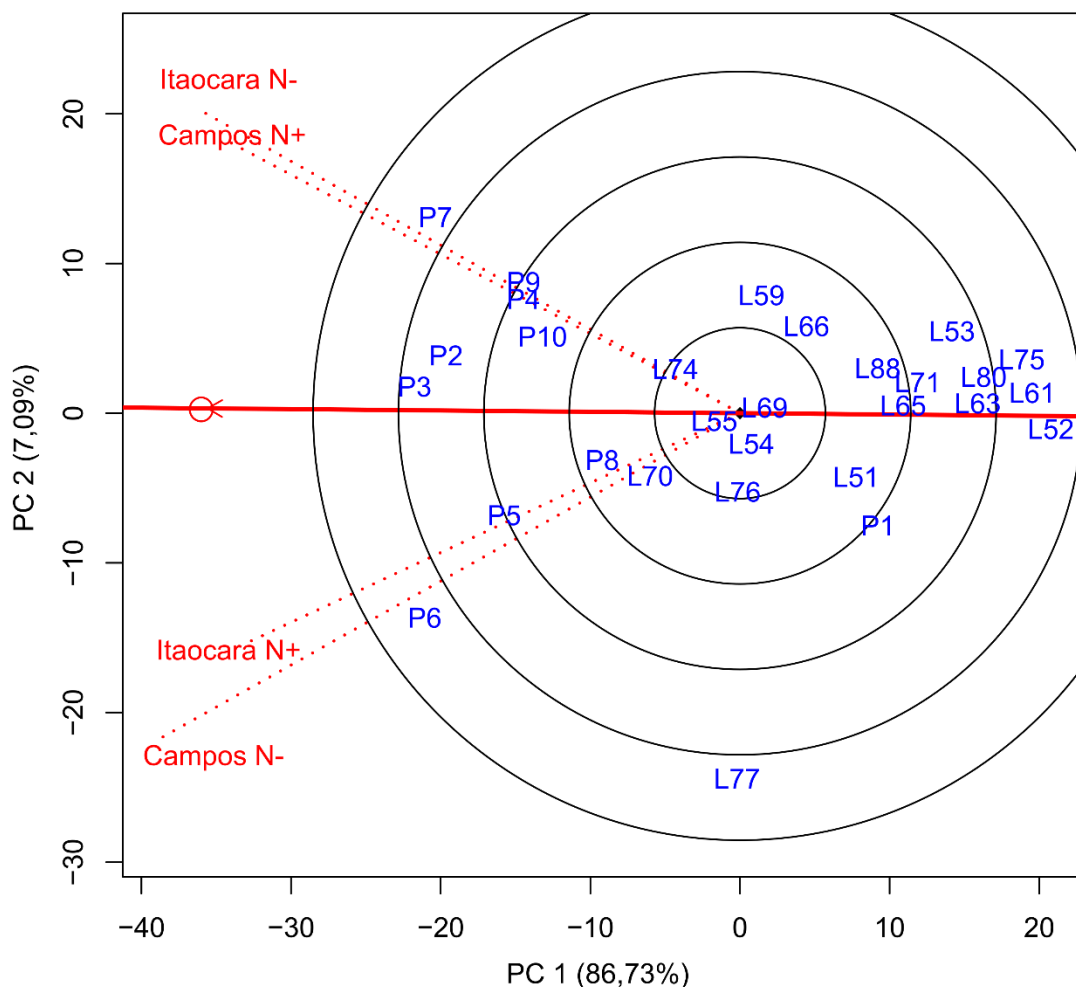
ideótipo. Desta forma, as linhagens P3 e P2, alocadas no primeiro e segundo ciclo concêntrico, respectivamente, são as mais próximas do ideal em termos de produtividade de grãos e estabilidade fenotípica.



**Figura 3-** GGE *Biplot* comparando 29 linhagens  $S_7$  de milho-pipoca avaliadas com a estimativa de um genótipo ideal para a produtividade de grãos ( $\text{kg ha}^{-1}$ ).

Um ambiente de teste ideal deve discriminar os genótipos superiores e ser representativo de todos os ambientes de teste, ou seja, deve apresentar um alto escore de PC1, pois este possui maior capacidade de discriminação dos genótipos e pontuação nula no PC2, expressando, assim, maior capacidade de representar todos os outros ambientes. Desta forma, a proporção explicada pelo PC1 (86,73%) e PC2 (7,09%) foi adequada para uma fidedigna seleção dos ambientes mais representativos (Figura 4).





**Figura 4-** Discriminação e representatividade dos ambientes para a produtividade de grãos ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) de 29 linhagens  $S_7$  de milho-pipoca.

O círculo indicado pela seta representa a média dos ambientes. Se o ângulo formado entre o ambiente e a linha que passa pela média dos ambientes for pequeno, significa que tal ambiente é representativo e, quanto maior o vetor de cada ambiente, maior a capacidade de discriminação (Yan e Tinker, 2006). Isto posto, observa-se que os ambientes com baixa disponibilidade de nitrogênio apresentaram maior capacidade de discriminação dos genótipos. Com isto, é recomendado que a avaliação e seleção de genótipos superiores eficientes no uso do nitrogênio seja feita em condições de estresse.

Deve-se salientar que ambientes discriminantes e representativos favorecerem a seleção de genótipos com adaptação geral ampla. Por outro lado, ambientes discriminantes, mas não representativos podem ser úteis para descartar genótipos instáveis. Ambientes não discriminantes e não representativos são pouco

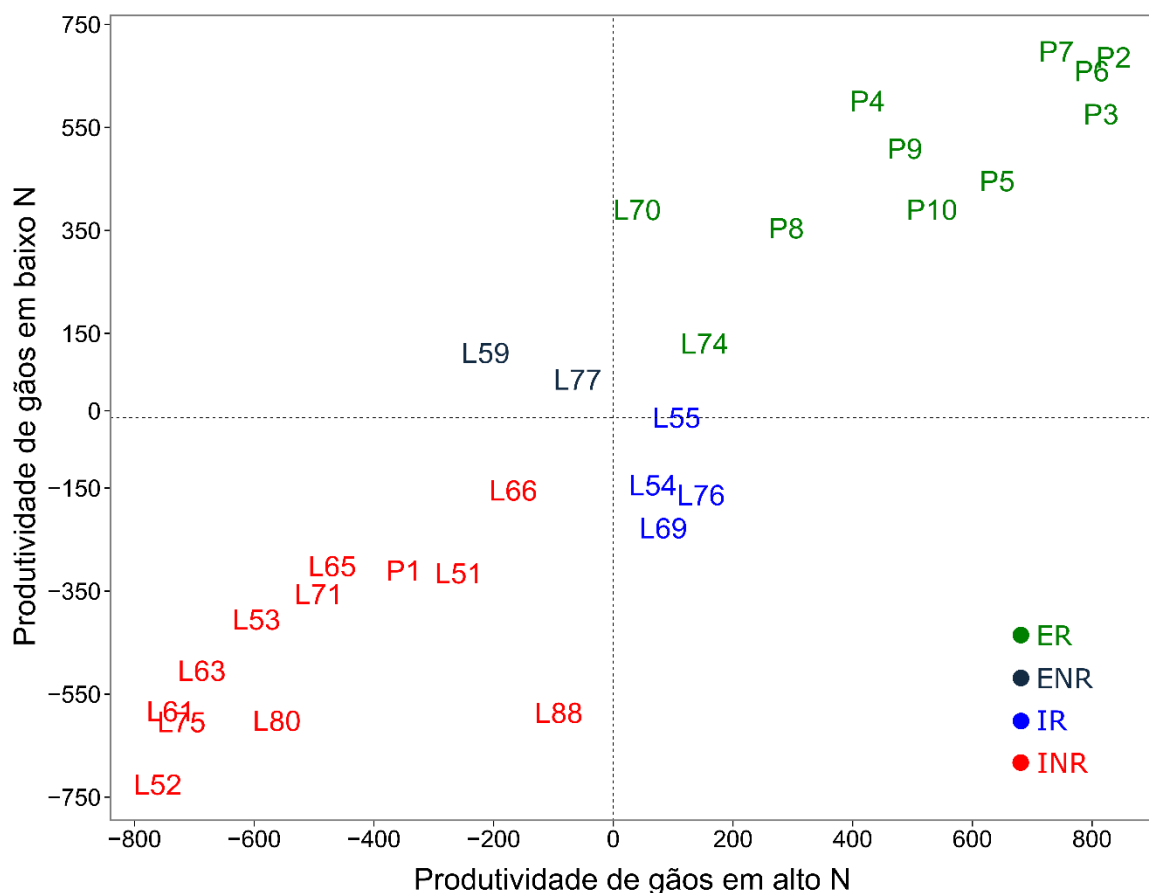
úteis em redes experimentais de ensaios e devem ser descartados (Yan e Tinker, 2006; Yan et al., 2007).

O fato dos ambientes com baixa disponibilidade de nitrogênio apresentarem maior capacidade de discriminação dos genótipos, pode estar relacionado ao fato que, em condições de estresse, além da planta ser eficiente em absorver o escasso nitrogênio do solo, ela deve ser eficiente em utilizá-lo e canalizá-lo para a produção de grãos (Hirel et al., 2007). Deste modo, a maior eficiência na absorção de nitrogênio, a partir de baixas concentrações na solução do solo, pode ser uma indicação de adaptação das plantas mais eficientes no uso deste nutriente às condições de estresse (Chen et al., 2014).

Quanto à relação entre os ambientes, os cossenos dos ângulos entre os vetores de cada ambiente são relativos aos coeficientes de correlação entre eles. Todos os ambientes estão positivamente correlacionados, pois o cosseno do ângulo entre eles é positivo, ou seja, o ângulo é menor do que  $90^\circ$ . Essa associação consistente entre os ambientes avaliados sugere que a mesma informação sobre os genótipos pode ser obtida nos mesmos ambientes, possibilitando reduzir os custos de avaliação dos genótipos (Yan e Holland, 2010).

Deste modo, pode-se inferir que a interação predominante é do tipo simples, não havendo ausência de correlação entre os ambientes. Verifica-se apenas diferenças de variabilidade entre os genótipos nos ambientes em que estes estão sendo avaliados, favorecendo a fidedigna seleção dos genótipos superiores, uma vez que a hierarquização relativa destes referentes ao desempenho nos diferentes ambientes, manter-se-ão coincidentes.

Com o objetivo de estudar o desempenho dos genótipos sob estresse de nitrogênio, esses foram representados em um plano cartesiano por meio da relação entre a produtividade de grãos nas dosagens contrastantes de nitrogênio (Figura 5). Observa-se que as linhagens P7, P2, P6, P3, P5, P4, P9, P10, P9, P8, L70, L74 e L55 foram classificadas como eficientes e responsivas, portanto, alocadas no primeiro quadrante (ER), ou seja, possuem produtividade média de grãos superiores às médias dos ambientes com baixa e ideal disponibilidade de nitrogênio. Deve-se salientar que estas linhagens foram as mesmas presentes nos dois mega-ambientes (Figura 1), ratificando a eficiência do método GGE *Biplot* na identificação de genótipos eficientes no uso do nitrogênio.



**Figura 5-** Desempenho quanto à eficiência do uso do nitrogênio e resposta à adubação nitrogenada de 29 linhagens S<sub>7</sub> de milho-pipoca. ER: eficiente e responsiva; ENR: eficiente e não-responsiva; IR: ineficiente e responsiva; INR: ineficiente e não-responsiva.

As linhagens L59 e L77 apresentaram produtividade acima da média geral nos ambientes com baixa disponibilidade de nitrogênio, portanto, estas possuem potencial de adaptação à condição de estresse. Já as linhagens L54, L76, L69 possuem adaptação específica aos ambientes com alta disponibilidade de nitrogênio (IR). As demais linhagens podem ser classificadas como ineficientes e não-responsivas (INR) ao uso do nitrogênio.

Na cultura do milho-pipoca, a produtividade de grãos e capacidade de expansão é reflexo de um desafio historicamente conhecido, a existência de correlação negativa entre estas duas variáveis principais (Willier, 1927; Hallauer, 2001; Rangel et al., 2011). Isto posto, em estudos para selecionar genótipos de milho-pipoca, ambas as variáveis devem ser avaliadas e abordadas sob procedimentos biométricos que favoreçam a seleção de genótipos superiores. Com este intento, foram realizadas avaliações fenotípicas da capacidade de expansão

das linhagens (Tabela 6), com a finalidade de monitorar a seleção de genótipos eficientes no uso do nitrogênio, mas que possuam, concomitantemente, adequada expressão para capacidade de expansão.

**Tabela 6-** Médias de capacidade de expansão ( $\text{mL g}^{-1}$ ) de 29 linhagens endogâmicas de milho-pipoca avaliadas em dois locais.

Linhagens	Capacidade de expansão	
	Campos dos Goytacazes	Itaocara
L70	34,38 a	34,27 a
L76	32,78 a	33,91 a
L80	23,57 c	21,32 c
L66	34,77 a	32,46 a
L54	32,71 a	34,80 a
L53	30,05 a	33,63 a
L88	28,77 b	29,96 a
L69	28,10 b	30,27 a
L65	25,96 b	24,24 c
L77	30,68 a	30,35 a
L52	26,10 b	21,70 c
L75	25,96 b	24,41 c
L51	21,43 c	25,71 b
L59	28,60 b	30,96 a
L74	31,94 a	35,41 a
L55	29,27 b	33,05 a
L61	28,91 b	25,19 b
L63	28,85 b	23,30 c
L71	33,66 a	31,71 a
P1	32,06 a	28,18 b
P2	29,41 b	29,30 b
P3	27,99 b	26,88 b
P4	25,57 b	26,18 b
P5	37,07 a	36,32 a
P6	32,66 a	32,46 a
P7	35,17 a	38,27 a
P8	33,18 a	37,96 a
P9	33,82 a	36,38 a
P10	35,88 a	36,93 a

Médias seguidas pela mesma letra na coluna pertencem ao mesmo grupo pelo teste de Scott-Knott (1974) em  $p < 0,05$ .

Houve a alocação das linhagens em três grupos distintos pelo agrupamento de Scott-Knott (1974), ratificando a existência de variabilidade para esta variável. As linhagens eficientes e responsivas ao nitrogênio compuseram o grupo de maiores médias, com exceção de P2, P3 e P4, que foram inseridas no segundo grupo. Pode-se inferir que há real possibilidade de seleção de indivíduos eficientes ao uso do nitrogênio e que expressem boa capacidade de expansão.

## 5.2. Efeitos gênicos

Observa-se que, para todas as características analisadas, o efeito de genótipo foi altamente significativo ( $p < 0,01$ ), evidenciando a existência de variabilidade genética para estas características na população avaliada. Pode-se, assim, propalar que há perspectiva de sucesso na seleção de genótipos superiores quanto à eficiência no uso do nitrogênio, utilizando esta população como base em programa de melhoramento genético (Tabela 7).

**Tabela 7.** Análise dialélica conjunta para a eficiência agrônômica à baixa disponibilidade de nitrogênio (EABN), média harmônica da *performance* relativa (MHPR) e produtividade de grãos (PROD) em milho-pipoca.

FV	GL	EABN	MHPR	PROD	
				Campos	Itaocara
Rep (Ambiente)	4	432448,6	0,0012	20845,00	79168,7
Ambiente (A)	1	81968638,9**	0,0016	4294487,2**	79222167,2**
Genótipo (G)	99	3328381,7**	0,529**	975235,9**	2314001,2**
C.G.C.	9	6892761,2**	1,439**	8713567,9**	10746365,9**
C.E.C.	45	3584582,2**	0,621**	3213312,2**	8446332,37**
Recíproco (REC)	45	2359305,4**	0,257**	1526251,4**	3016353,5**
Materno (M)	9	4676632,9**	0,941**	5527482,9**	6873211,3**
Não materno (NM)	36	1779973,5**	0,086**	525943,6**	2052139,04**
G X A	99	1633930,3**	0,119**	968981,0**	965416,2**
CGC x A	9	2329523,6**	0,314**	614243,6*	318340,3**
CEC x A	45	1277566,4**	0,092**	160757,9*	895005,47**
REC x A	45	1851175,6**	0,107**	167055,1*	1165242,1**
M x A	9	2613974,1**	0,185**	226979,1*	1520772,9**
NM x A	36	1660475,9**	0,087**	152074,0*	1076359,4**
Resíduo	396	123510,5	0,0037	19451,0	51665,8
<i>GMD</i>	-	0,79	0,82	0,84	0,72

\*\* , \* : significativo a ( $p < 0,01$ ) e não-significativo a ( $p < 0,05$ ), respectivamente.

Os efeitos de capacidade geral de combinação ( $\hat{g}_i$ ) - relativos aos efeitos aditivos ou à frequência de alelos favoráveis para a eficiência no uso do nitrogênio; e as capacidades específicas de combinação ( $\hat{s}_{ij}$ ) - referentes aos efeitos gênicos não-aditivos (dominância e epistasia) ou efeitos de complementação intra e intergênica, foram significativos ( $p < 0,01$ ) para todas as variáveis. A significância dos efeitos da  $\hat{g}_i$  indica que pelo menos um dos genitores difere dos demais quanto a quantidade de genes favoráveis de efeitos aditivos. Já a significância da  $\hat{s}_{ij}$  faz inferência à existência de complementação alélica entre os genitores nos *locos* com algum grau de dominância.

Todas as variáveis apresentaram efeito recíproco significativo. A significância para REC implica na estimativa dos efeitos genéticos. O efeito recíproco pode ser dividido, ainda, em efeito materno (M) e não-materno (NM) (Wu e Matheson, 2001). Os efeitos maternos são atribuídos a fatores genéticos citoplasmáticos, e os efeitos não-maternos podem ser explicados pela interação entre genes nucleares e efeitos de genes citoplasmáticos (Mukanga et al., 2010).

Quando o efeito do recíproco é devido ao efeito materno, este pode persistir durante as gerações e pode ser explorado; porém, se for devido ao componente não-materno o efeito pode ser perdido durante as gerações iniciais. Isto posto, pode-se inferir que a escolha adequada do genitor feminino é importante. Esta herança materna pode estar relacionada aos processos dependentes do metabolismo do nitrogênio, como, por exemplo, a fotossíntese, que apresenta genes extra nucleares importantes na formação do aparato fotossintético dos cloroplastos. Deste modo, é aconselhável utilizar os genótipos eficientes no uso do nitrogênio como genitores femininos nos blocos de cruzamentos.

Para os índices EABN e MHPR as interações CGC x A, CEC x A, REC x A, M x A e NM x A foram significativas, sendo, neste caso, o ambiente (A) composto por locais, indicando que não há consistência entre os efeitos observados em cada ambiente, ou seja, um genitor que apresenta maiores efeitos aditivos, em um local, pode não apresentar a mesma superioridade em outro local. Deste modo, deve-se observar os resultados dos genitores ( $\hat{g}_i$ ) e cruzamentos ( $\hat{s}_{ij}$ ) em cada ambiente, praticando a seleção de genótipos para condições específicas.

Os efeitos das interações CGC x A CEC x A, REC x A, M x A, e NM x A também foram significativos para produtividade de grãos; contudo, deve-se salientar que os ambientes, neste caso, são formados pelas diferentes

disponibilidades de nitrogênio. Este resultado sugere que a seleção de genótipos eficientes no uso do nitrogênio, com base na produtividade de grãos, deve ser específica para o ambiente e não em função do desempenho médio, pois os alelos que controlam a expressão do caráter, em baixa suplementação nutricional, são parcialmente diferentes dos alelos que controlam esse mesmo caráter em condição ideal de suplementação (Souza et al., 2008). Ou seja, a produtividade de grãos em condições de baixo teor de nitrogênio não requer apenas os genes expressos sob ideal disponibilidade de nitrogênio, e sim que outros genes sejam expressos ou silenciados (Liu et al., 2012).

Essa diferença na expressão dos genes pode ser claramente observada nos trabalhos de Gallais e Hirel (2004); Zhang et al. (2007) e Liu et al. (2012), nos quais estes autores observaram que a variabilidade genética no milho é expressa de forma distinta em condições de baixa e ideal disponibilidade de nitrogênio, pois foram encontrados diferentes QTLs sob estas condições ambientais. Essa diferença no número de QTL entre as duas condições de disponibilidade de nitrogênio pode refletir diferenças na sensibilidade das variáveis estudadas e diferenças genotípicas na resposta aos ambientes (Collins et al., 2008). Portanto, é possível que esses QTLs sejam úteis para aumentar a produtividade de novos genótipos, combinando QTLs relacionados a produtividade de grãos expressos em condições de baixa disponibilidade de nitrogênio com QTLs para EUN identificados em ambientes com baixo teor de nitrogênio.

O grau médio de dominância (*GMD*) permite inferir qual tipo de ação gênica está relacionado ao controle genético do caráter. Os valores de *GMD* próximos à unidade sugerem que o efeito da CEC não é predominante e que o desempenho dos híbridos pode ser predito baseado na média dos valores da  $\hat{g}_i$  dos pais (Baker, 1978). Deste modo, observa-se que a variância genética aditiva é mais importante do que os efeitos de dominância para a eficiência no uso do nitrogênio em milho-pipoca. Entretanto, os efeitos não-aditivos não devem ser descartados, pois estes também exercem influência. Isso implica que a seleção artificial de plantas com as características desejáveis, possivelmente, resultará em progênies com desempenho superior (Thanh et al., 2010), pois quando estão presentes efeitos aditivos dos genes a média dos pais é igual à média da  $F_1$ ,  $F_2$  e assim consecutivamente (Ramalho et al., 2012). Este resultado corrobora com o que tem

sido relatado na literatura, no qual os efeitos aditivos têm maior importância para os componentes da EUN em milho comum (Worku et al., 2008; DoVale et al., 2012).

Entretanto, deve-se ter cautela ao realizar a seleção para eficiência no uso do nitrogênio utilizando apenas a produtividade de grãos, pois sabe-se que os efeitos não-aditivos são importantes no controle da produtividade de grãos nas diferentes disponibilidades de nitrogênio (Gowda et al., 2013; Abdel-Moneam et al., 2014). Dessa forma, sugere-se considerar tanto os efeitos aditivos quanto os não-aditivos e, diferentes métodos para obtenção de novas cultivares podem ser explorados para a seleção de genitores. Entretanto, deve-se ressaltar que, dentre os métodos de melhoramento, a seleção recorrente recíproca interpopulacional torna-se a opção promissora por explorar tanto a variância genética aditiva quanto a de dominância.

As estimativas dos efeitos da capacidade geral de combinação proporcionam informações sobre a concentração de genes de efeitos aditivos. Assim sendo, os genitores que apresentam os maiores valores de  $\hat{g}_i$  são os mais favoráveis para uso em programas de melhoramento genético que visam à seleção para eficiência no uso do nitrogênio. Deste modo, pode-se observar que os genitores L59, L61, P2, P6 e P7 destacaram-se nos ambientes individuais e na média dos ambientes e, apesar de haver significância para a interação CGC x E, estes genitores expressaram estimativas positivas de  $\hat{g}_i$  para EABN e MHPR (Tabela 8).

**Tabela 8.** Efeito da capacidade geral de combinação ( $\hat{g}_i$ ) quanto à eficiência agrônômica à baixa disponibilidade de nitrogênio (EABN), média harmônica da *performance* relativa (MHPR) e eficiência agrônômica do nitrogênio (EABN) de milho-pipoca avaliados em dois locais na safra 2015/2016.

Genitor	EABN			MHPR		
	Campos	Itaocara	Média	Campos	Itaocara	Média
L54	-279,94	166,09	-56,93	-0,15	0,00	-0,08
L59	538,17	6,58	272,37	0,22	0,01	0,11
L61	113,06	83,94	98,50	0,15	0,02	0,09
L75	-273,03	-482,99	-378,01	-0,19	-0,18	-0,18
L76	-432,56	-170,31	-301,44	-0,06	0,00	-0,03



**Tabela 8.** Cont.

Genitor	EABN			MHPR		
	Campos	Itaocara	Média	Campos	Itaocara	Média
L77	-127,71	111,77	-7,97	0,00	0,05	0,03
L80	-220,12	-276,72	-248,42	-0,18	-0,14	-0,16
P2	340,41	177,58	259,00	0,08	0,06	0,07
P6	188,94	121,63	155,29	0,01	0,04	0,02
P7	152,79	262,44	207,61	0,12	0,14	0,13

Para a produtividade de grãos, em Campos dos Goytacazes, os genitores P7, L61 e L59 apresentaram os maiores efeitos de  $\hat{g}_i$  em baixa e alta disponibilidade de N. Em Itaocara, os genitores P2, P6 e P7 foram os que detiveram os maiores efeitos de  $\hat{g}_i$ , demonstrando eficiência desses genitores em condições de baixa disponibilidade e responsividade ao nitrogênio. O genitor P7 apresentou dupla aptidão, ou seja, maior responsividade e eficiência no uso do nitrogênio. Nota-se também que o genitor P2 foi altamente eficiente no uso do nitrogênio (Tabela 9).

**Tabela 9.** Efeito da capacidade geral de combinação ( $\hat{g}_i$ ) quanto à produtividade de grãos de milho-pipoca avaliados em alta e baixa disponibilidade de nitrogênio em Campos dos Goytacazes e Itaocara na safra 2015/2016.

Genitores	Campos dos Goytacazes, RJ		Itaocara, RJ		Média
	Alto N	Baixo N	Alto N	Baixo N	
L54	-312,80	-277,46	-124,50	76,00	-159,69
L59	377,37	443,74	72,15	8,11	225,34
L61	325,92	227,87	59,54	64,47	169,45
L75	-408,94	-318,43	-620,75	-537,38	-471,37
L76	91,53	-229,82	39,23	-51,28	-37,58
L77	50,29	-39,24	131,33	140,25	70,66
L80	-388,17	-291,73	-436,39	-402,17	-379,62
P2	67,48	213,89	161,41	197,79	160,14
P6	50,29	76,69	177,53	124,81	82,19
P7	247,59	194,48	540,46	379,40	340,48

Deve-se notar que o genitor L61, considerado como ineficiente, mostrou-se eficiente ao uso do nitrogênio, podendo-se inferir que para uma seleção acurada de genótipos eficientes no uso do nitrogênio, além da seleção *per se*, deve-se

utilizar as estimativas de  $\hat{g}_i$  e  $\hat{s}_{ij}$ , uma vez que a seleção *per se* de um genótipo não faz inferência às suas capacidades gerais e específicas de combinação.

No melhoramento genético, um genitor ideal deve apresentar alta responsividade e alta eficiência em condições de baixa disponibilidade do nutriente. As combinações híbridas L59 x L80, L61 x L77, L54 x L76, L59 x P2 e L77 x P6 apresentaram os maiores efeitos de  $\hat{s}_{ij}$  para EABN (Tabela 10). Deve-se ressaltar que os genitores L77, L54 e L80 apresentaram estimativas de  $\hat{g}_i$  negativas, podendo se inferir que os efeitos de  $\hat{s}_{ij}$  desses cruzamentos referem-se à complementação alélica, que se origina da diferença na frequência alélica entre os genitores (divergência) e da presença de efeitos de dominância (Ramalho et al., 2012), representados pelos genitores L59, L61 e P6 que apresentaram, em média, valor de  $\hat{g}_i$  relativamente alto para a EABN.

**Tabela 10.** Efeito da capacidade específica de combinação ( $\hat{s}_{ij}$ ) quanto à eficiência agrônômica à baixa disponibilidade de nitrogênio (EABN) de milho-pipoca avaliados em Campos dos Goytacazes e Itaocara, na safra 2015/2016.

Genótipos	Campos	Itaocara	Média	Genótipos	Campos	Itaocara	Média
L54 x L59	249,37	711,18	480,27	L61 x P7	470,62	-106,23	182,20
L54 x L61	23,89	278,16	151,03	L75 x L76	-340,72	-315,20	-327,96
L54 x L75	-56,63	-270,13	-163,38	L75 x L77	451,80	-333,44	59,18
L54 x L76	950,07	441,60	695,83	L75 x L80	275,45	492,03	383,74
L54 x L77	-118,96	425,62	153,33	L75 x P2	-510,80	921,06	205,13
L54 x L80	212,17	466,16	339,16	L75 x P6	65,14	370,36	217,75
L54 x P2	-217,54	110,02	-53,76	L75 x P7	176,41	170,45	173,43
L54 x P6	-271,23	130,97	-70,13	L76 x L77	-85,88	623,73	268,93
L54 x P7	-198,80	-142,62	-170,71	L76 x L80	-119,38	-121,78	-120,58
L59 x L61	-63,37	-62,27	-62,82	L76 x P2	-44,33	449,93	202,80
L59 x L75	20,58	-409,58	-194,50	L76 x P6	-128,75	542,85	207,05
L59 x L76	-136,30	-74,83	-105,57	L76 x P7	481,29	-132,90	174,20
L59 x L77	28,41	-51,79	-11,69	L77 x L80	-167,20	-234,81	-201,01
L59 x L80	232,52	1934,96	1083,74	L77 x P2	332,20	-609,29	-138,54
L59 x P2	923,92	337,99	630,95	L77 x P6	198,24	885,91	542,07
L59 x P6	1035,66	-115,77	459,94	L77 x P7	-52,08	584,25	266,09
L59 x P7	-244,07	-194,20	-219,14	L80 x P2	276,37	-595,94	-159,79
L61 x L75	485,11	393,01	439,06	L80 x P6	-298,78	-1234,48	-766,63
L61 x L76	156,35	350,78	253,56	L80 x P7	257,77	82,27	170,02

**Tabela 10.** Cont.

Genótipos	Campos	Itaocara	Média	Genótipos	Campos	Itaocara	Média
L61 x L77	616,33	883,64	749,99	P2 x P6	609,47	190,58	400,03
L61 x L80	-244,58	-10,05	-127,31	P2 x P7	-410,53	-415,25	-412,89
L61 x P2	131,00	-206,48	-37,74	P6 x P7	-245,96	-880,53	-563,25
L61 x P6	-198,16	323,42	62,63	-	-	-	-

Quanto a MHPR que, assim como EABN, funciona como um índice *per se* de seleção simultânea, trata-se de um índice que leva em consideração genótipos produtivos em todos os ambientes e, assim possibilita a seleção de genótipos produtivos em ideal e baixa disponibilidade de nitrogênio. Isto posto, os cruzamentos superiores que apresentaram, em média, os maiores efeitos de  $\hat{\sigma}_{ij}$  foram: L54 x L76, L59 x L77, L77 x P7, L61 x L77 e L59 x P7 (Tabela 11).

**Tabela 11.** Efeito da capacidade específica de combinação ( $\hat{\sigma}_{ij}$ ) para média harmônica da performance relativa (MHPR), de milho-pipoca avaliados em Campos dos Goytacazes e Itaocara na safra 2015/2016.

Genótipos	Campos	Itaocara	Média	Genótipos	Campos	Itaocara	Média
L54 x L59	-0,146	0,133	-0,006	L61 x P7	0,030	-0,061	-0,015
L54 x L61	0,068	0,235	0,152	L75 x L76	-0,248	-0,104	-0,176
L54 x L75	0,053	-0,043	0,005	L75 x L77	0,073	0,019	0,046
L54 x L76	0,368	0,162	0,265	L75 x L80	0,033	0,042	0,038
L54 x L77	0,037	0,032	0,035	L75 x P2	-0,072	0,026	-0,023
L54 x L80	0,126	0,202	0,164	L75 x P6	0,098	0,224	0,161
L54 x P2	-0,049	0,156	0,054	L75 x P7	-0,021	0,070	0,024
L54 x P6	-0,022	0,139	0,059	L76 x L77	0,140	0,034	0,087
L54 x P7	-0,082	-0,270	-0,176	L76 x L80	0,083	0,145	0,114
L59 x L61	0,194	-0,085	0,055	L76 x P2	-0,001	0,239	0,119
L59 x L75	0,214	0,071	0,142	L76 x P6	0,070	0,077	0,073
L59 x L76	0,149	-0,058	0,046	L76 x P7	-0,009	0,097	0,044
L59 x L77	0,084	0,371	0,228	L77 x L80	-0,239	-0,265	-0,252
L59 x L80	0,109	0,051	0,080	L77 x P2	0,229	0,004	0,117
L59 x P2	-0,022	0,095	0,036	L77 x P6	0,086	0,204	0,145

**Tabela 11.** Cont.

Genótipos	Campos	Itaocara	Média	Genótipos	Campos	Itaocara	Média
L59 x P6	0,115	-0,065	0,025	L77 x P7	0,017	0,395	0,206
L59 x P7	0,242	0,105	0,174	L80 x P2	-0,060	-0,143	-0,101
L61 x L75	0,123	0,171	0,147	L80 x P6	0,039	-0,063	-0,012
L61 x L76	0,095	0,246	0,171	L80 x P7	0,090	0,212	0,151
L61 x L77	0,309	0,084	0,197	P2 x P6	0,089	0,068	0,078
L61 x L80	-0,081	0,127	0,023	P2 x P7	0,032	0,006	0,019
L61 x P2	0,130	0,054	0,092	P6 x P7	-0,213	-0,207	-0,210
L61 x P6	0,065	-0,072	-0,003	-	-	-	-

Pode-se observar semelhança entre os cruzamentos superiores para EABN e MHPR. Este resultado pode estar relacionado ao fato que o índice EABN tem como principal característica a seleção de genótipos que mantêm alta produtividade em condições de baixa disponibilidade do nutriente (Wu et al., 2011) e de acordo com Resende (2007) o índice MHPR leva a seleção simultânea para estabilidade e adaptabilidade. Ou seja, possibilita a seleção de genótipos que apresentem médias de produtividade acima da média do ambiente em condições ideais e de estresse.

Em Campos dos Goytacazes, os maiores efeitos da  $\hat{\sigma}_{ij}$  foram observados nas combinações L54 x L76, L61 x L77, L59 x P7 e L77 x P2, sendo que estes cruzamentos apresentaram alto efeito de  $\hat{\sigma}_{ij}$  na presença e ausência de nitrogênio, podendo-se inferir que estes híbridos foram eficientes e responsivos (Tabela 12). O efeito superior de  $\hat{\sigma}_{ij}$  para o híbrido L54 x L76 é um indicativo que ocorreu desvio, em relação ao que se esperava pela CGC dos genitores L54 e L76, evidenciando a presença superior de genes não-aditivos na expressão do índice (Cruz et al., 2014).

**Tabela 12.** Efeito da capacidade específica de combinação ( $\hat{g}_{ij}$ ) quanto à produtividade de grãos de milho-pipoca avaliados em ideal e baixa disponibilidade de nitrogênio em Campos dos Goytacazes na safra 2015/2016.

Genótipos	Alto N	Baixo N	Média	Genótipos	Alto N	Baixo N	Média
L54 x L59	-439,18	-96,93	-268,05	L61 x P7	-85,11	198,90	56,90
L54 x L61	174,74	88,12	131,43	L75 x L76	-549,55	-412,83	-481,19
L54 x L75	158,45	41,23	99,84	L75 x L77	28,60	242,75	135,67
L54 x L76	482,81	794,32	638,57	L75 x L80	9,32	130,38	69,85
L54 x L77	198,64	-6,55	96,04	L75 x P2	-3,50	-260,98	-132,24
L54 x L80	262,32	220,68	241,50	L75 x P6	219,26	146,86	183,06
L54 x P2	-40,78	-132,90	-86,84	L75 x P7	-52,67	24,83	-13,92
L54 x P6	24,24	-113,95	-44,85	L76 x L77	453,40	120,55	286,98
L54 x P7	-133,61	-167,89	-150,75	L76 x L80	271,33	54,13	162,73
L59 x L61	500,82	216,79	358,81	L76 x P2	-89,93	-1,71	-45,82
L59 x L75	486,32	276,45	381,39	L76 x P6	192,22	42,77	117,50
L59 x L76	492,05	123,95	308,00	L76 x P7	-106,51	143,63	18,56
L59 x L77	134,87	127,95	131,41	L77 x L80	-545,30	-350,21	-447,76
L59 x L80	161,35	229,91	195,63	L77 x P2	419,23	405,13	412,18
L59 x P2	-283,59	271,57	-6,01	L77 x P6	117,80	182,37	150,09
L59 x P6	14,41	468,29	241,35	L77 x P7	73,58	0,93	37,25
L59 x P7	672,22	212,14	442,18	L80 x P2	-200,80	15,04	-92,88
L61 x L75	143,10	319,07	231,08	L80 x P6	172,60	-52,10	60,25
L61 x L76	163,38	172,23	167,80	L80 x P7	106,87	203,56	155,21
L61 x L77	535,05	593,55	564,30	P2 x P6	48,91	310,76	179,83
L61 x L80	-99,24	-184,64	-141,94	P2 x P7	194,57	-100,69	46,94
L61 x P2	291,28	202,51	246,90	P6 x P7	-475,14	-337,03	-406,08
L61 x P6	266,56	5,92	136,24	-	-	-	-

Os híbridos L61 x L76 e L61 x L77 combinam genitores intermediários (L76 e L77) com outro ineficiente (L61), assim como o híbrido L80 x P7, que combina um genitor eficiente (P7) com outro ineficiente (L80) (Tabelas 12 e 13). Esses resultados demonstram a ocorrência de complementação alélica entre esses genitores. Dois genitores com alta  $\hat{g}_i$  nem sempre resultam em uma combinação específica superior, como pode ser observado para o cruzamento L61 x P7, pois, para isso, é necessário haver complementação alélica satisfatória e presença de dominância (Ramalho et al., 2012). Ressalta-se que não é comum observar dois genitores com baixa estimativa de  $\hat{g}_i$  resultarem em alta estimativa de  $\hat{g}_{ij}$ . Entretanto, deve-se observar que os híbridos L54 x L76 e L54 x L80 apresentaram altas

estimativas de  $\hat{\sigma}_{ij}$  em Campos dos Goytacazes e em Itaocara, respectivamente, apesar de suas *performances* desfavoráveis para  $\hat{\sigma}_i$  (Tabela 9).

**Tabela 13.** Efeito da capacidade específica de combinação ( $\hat{\sigma}_{ij}$ ) quanto à produtividade de grãos de milho-pipoca avaliado em alta e baixa disponibilidade de nitrogênio em Itaocara na safra 2015/2016.

Genótipos	Alto N	Baixo N	Média	Genótipos	Alto N	Baixo N	Média
L54 x L59	234,50	561,81	398,15	L61 x P7	-342,47	-141,84	-242,16
L54 x L61	915,33	587,39	751,36	L75 x L76	-381,93	-324,80	-353,36
L54 x L75	-56,23	-188,20	-122,21	L75 x L77	309,60	-106,43	101,58
L54 x L76	532,24	497,24	514,74	L75 x L80	-108,80	285,25	88,23
L54 x L77	-50,87	237,51	93,32	L75 x P2	-167,46	384,05	108,30
L54 x L80	723,42	584,24	653,83	L75 x P6	784,16	608,21	696,18
L54 x P2	671,67	353,94	512,81	L75 x P7	153,04	228,96	191,00
L54 x P6	638,77	304,21	471,49	L76 x L77	-60,97	304,66	121,84
L54 x P7	-1090,98	-613,58	-852,28	L76 x L80	779,83	233,05	506,44
L59 x L61	-238,05	-200,48	-219,26	L76 x P2	931,15	650,00	790,58
L59 x L75	566,63	-29,82	268,41	L76 x P6	39,78	377,66	208,72
L59 x L76	-315,33	-133,00	-224,16	L76 x P7	607,42	120,44	363,93
L59 x L77	1789,23	704,15	1246,69	L77 x L80	-1212,17	-611,20	-911,68
L59 x L80	-520,37	806,09	142,86	L77 x P2	406,81	-248,10	79,36
L59 x P2	164,18	346,55	255,36	L77 x P6	461,98	765,02	613,50
L59 x P6	-449,36	-137,63	-293,49	L77 x P7	1498,55	1027,79	1263,17
L59 x P7	561,21	134,03	347,62	L80 x P2	-523,40	-489,22	-506,31
L61 x L75	751,14	468,34	609,74	L80 x P6	820,40	-668,81	75,79
L61 x L76	984,01	625,16	804,58	L80 x P7	941,77	455,69	698,73
L61 x L77	13,41	504,66	259,03	P2 x P6	98,97	230,12	164,55
L61 x L80	478,30	267,58	372,94	P2 x P7	252,85	-154,54	49,16
L61 x P2	262,81	41,85	152,33	P6 x P7	-647,84	-742,26	-695,05
L61 x P6	-237,02	-66,42	-151,72	-	-	-	-

Dentre os genitores avaliados, P7 e L59 são considerados como muito eficientes e intermediária *per se*, respectivamente. Como o genitor ideal deve possuir maior efeito de  $\hat{\sigma}_i$  e ainda participar de cruzamentos com alto  $\hat{\sigma}_{ij}$ , pode-se inferir que estes genitores são considerados como responsivos ao nitrogênio, pois ambos apresentam elevada estimativa de  $\hat{\sigma}_i$  e participam dos cruzamentos de maiores efeitos de  $\hat{\sigma}_{ij}$  no ambiente com ideal disponibilidade de nitrogênio. Quanto à eficiência de uso, o genitor P7 é o mais promissor, uma vez que possui o maior

valor de  $\hat{g}_i$  e participa da combinação com o maior valor de  $\hat{s}_{ij}$ , no ambiente com baixa disponibilidade de nitrogênio.

### 5.3. Desempenho dos híbridos quanto à eficiência no uso do nitrogênio

O efeito de Local (L) foi significativo para todas as variáveis analisadas, podendo-se inferir que os locais utilizados são divergentes e possibilitam uma seleção mais fidedigna dos genótipos (Tabelas 14 e 15). Como a fonte de variação Genótipo é composta por genitores e híbridos, já era esperado o efeito significativo para esta. Assim, avaliou-se os efeitos isolados de Genitor, Híbridos  $F_1$  e Recíprocos. Isto posto, observam-se efeitos significativos de Genitor,  $F_1$  e Recíproco para todas as variáveis avaliadas; entretanto, podem-se observar respostas diferentes entre os genitores, híbridos  $F_1$  e recíprocos para FF, IF, AP, M100 e CE nos ambientes com baixa e ideal disponibilidade de nitrogênio, fato este ratificado pelas diferentes significâncias da interação Genitor,  $F_1$  e Recíproco com nitrogênio.

A fonte de variação Nitrogênio (N) foi significativa para intervalo do florescimento, teor de clorofila, altura de planta e produtividade de grãos, evidenciando que a média destas características são influenciadas pelas diferentes disponibilidades de nitrogênio. Observa-se, também, que a classificação relativa dos genitores,  $F_1$  e recíprocos para AP, PROL, CPE e DE foram semelhantes em baixa e ideal disponibilidade de nitrogênio; fato este, facilmente verificado pela não-significância da interação Genitor x N,  $F_1$  x N e Recíproco x N. Este resultado é indício que estas variáveis possuem controle genético análogo nas duas disponibilidades de nitrogênio.

A interação Local x N foi significativa para todas as variáveis, exceto para SPAD. As médias destas variáveis foram alteradas em decorrência do local e da disponibilidade de nitrogênio utilizada. Deste modo, a utilização de ambientes formados pela combinação de locais e doses torna-se mais informativa, aumentando a eficiência de seleção de genótipos em ambientes contrastantes. Apenas a produtividade de grãos apresentou efeito significativo para todas as interações triplas (Local x N x Genótipo, Local x N x Genitor, Local x N x  $F_1$  e Local x N x Recíproco). Como a produtividade de grãos é a principal variável utilizada para a seleção de genótipos eficientes, tem-se que a diferença produtiva entre os

genótipos deve ser levada em conta na interação entre as três fontes de variação (G x N x L), visto que em cada local existe uma série de fatores diferentes, inclusive a disponibilidade de nitrogênio para as plantas.

**Tabela 14.** Resumo da análise de variância conjunta para as variáveis, florescimento feminino (FF), intervalo entre o florescimento masculino e feminino (IF), teor de clorofila (SPAD), altura planta (AP), altura espiga (AE) e prolificidade (PROL) de 100 genótipos de milho-pipoca avaliados em baixa e ideal disponibilidade de nitrogênio.

Fonte de Variação	GL	FF	IF	SPAD	AP	AE	PROL
Bloco/Rep/N/L	108	4,70	6,0	45,0	141,0	88,0	0,11
Rep/N/Local	8	13,80	7,0	58,0	780,0	1.217,0	1,53
Local (L)	1	975,6**	3,485**	8,36**	791637**	155,5**	60,9**
Nitrogênio (N)	1	3,20	67,0**	1,524**	3,60**	172,0	0,24
L x N	1	29,5**	67,0**	83,0	1,321**	419,0**	0,62*
Genótipo (G)	99	76,10**	16,0**	153,0**	1,927**	851,0**	0,75**
Genitor	9	205,2**	32,45**	185,4**	3,299**	845,0**	1,54**
F <sub>1</sub>	44	48,56**	13,2**	114,0**	515,0**	456,0**	0,34**
Recíproco (R)	44	44,20**	16,1**	87,0**	452,0**	451,0**	0,36**
L x Genótipo	99	7,10**	8,0**	36,0	170,0**	63,0	0,20**
L x Genitor	9	9,96	9,79	34,9*	290,0	43,0	0,29*
Local x F <sub>1</sub>	44	6,0*	7,10**	38,0	127,0**	65,0	0,19**
L x R	44	7,20**	7,10**	34,0	102,0	62,0	0,14
N x Genótipo	99	6,0**	4,0**	42,0*	137,0**	59,0	0,11
N x Genitor	9	5,15	6,74	17,6*	269,0	73,0	0,10
N x F <sub>1</sub>	44	7,25**	3,80**	44,0*	128,0**	55,0	0,11
N x R	44	4,40**	4,40*	45,0*	93,0	57,0	0,12
L x N x G	99	4,90*	5,00**	32,0	96,0**	65,0	0,11
L x N x Genitor	9	14,0	17,85**	6,6	86,0	84,0	0,18
L x N x F <sub>1</sub>	44	3,90	3,20	36,0	92,0	62,0	0,09
L x N x R	44	3,90*	3,90	34,0	84,0	58,0	0,13
Erro	684	3,50	3,00	33,0	86,0	55,0	0,11
Acurácia	-	0,98	0,90	0,89	0,98	0,97	0,92

\*\* , \*\*: Significativo em Pp<0,01, e significativo em P<0,05), respectivamente, pelo teste F.



**Tabela 15.** Resumo da análise de variância conjunta para as variáveis, comprimento de espiga (CPE), diâmetro de espiga (DE), massa de 100 grãos (M100), produtividade de grãos (PG) e capacidade de expansão (CE) de 100 genótipos de milho-pipoca avaliados em baixa e ideal disponibilidade de nitrogênio.

Fonte de Variação	GL	CPE	DE	M100	PG	CE
Bloco/Rep /N/L	108	0,85	2,70	1,50	38064	14,40
Rep/N/Local	8	2,99	10,80	11,20	50007	20,10
Local (L)	1	254,63**	2805**	1208**	573474302**	2965**
Nitrogênio (N)	1	3,20	7,80	1,80	60203318**	2,50
L x N	1	37,67**	185,40**	122,10**	23313283**	404,70**
Genótipo	99	19,61**	58,90**	11,00**	6881863**	119,80**
Genitor	9	29,18**	103,20**	20,05**	5789083**	103,64**
F <sub>1</sub>	44	5,14**	27,90**	9,10**	3631350**	118,10**
Recíproco (R)	44	5,20**	37,80**	7,90**	3737964**	89,20**
Local x Genótipo	99	1,37*	5,30**	2,60**	1797332**	28,20**
Local x Genitor	9	1,16	10,90*	4,35**	526527**	101,29
Local x F <sub>1</sub>	44	1,50**	4,70*	2,00*	1469090**	11,40
L x Recíproco	44	1,19	4,80*	2,80**	1663624**	26,80**
N x Genótipo	99	1,12	3,60	2,00*	611104**	20,70**
N x Genitor	9	2,67	5,10	3,27*	136973**	75,71**
N x F <sub>1</sub>	44	0,96	3,70	2,00*	442161**	10,80
N x Recíproco	44	0,96	3,20	1,80	808183**	19,20*
L x N x Genótipo	99	1,49**	3,90	2,10*	559158**	13,60
L x N x Genitor	9	5,08	3,50	1,44	172612**	26,27
Local x N x F <sub>1</sub>	44	0,92	4,90**	2,30**	403260**	10,90
L x N x R	44	1,35*	3,00	2,10	716389**	13,90
Erro	684	1,03	3,40	1,50	35163	13,10
Acurácia	-	0,97	0,97	0,93	1,00	0,94

\*\*, \*\*: Significativo em  $P < 0,01$ , e significativo em  $P < 0,05$ , respectivamente, pelo teste F.

De forma geral, pode-se notar redução em todas as médias das variáveis no ambiente com baixa disponibilidade de nitrogênio (Tabela 16), mesmo que para algumas a redução foi não-significativa. A redução dessas variáveis pode estar relacionada, dentre outros fatores, à diminuição da taxa fotossintética corroborada pela redução do teor de clorofila em baixo N, pois o nitrogênio é um elemento essencial na estrutura da molécula de clorofila e é um constituinte dos aminoácidos; e, deste modo, a sua ausência pode prejudicar as unidades de montagem das proteínas, das quais muitas têm funções enzimáticas e regulatórias importantíssimas para o metabolismo da planta (Taiz e Zeiger, 2013).

Nos ambientes com estresse, o intervalo entre florescimento masculino e feminino foi maior para os dois locais. Em condições de estresse, as plantas de milho apresentam aumento para IF, prejudicando a polinização e, por conseguinte, redução na produtividade de grãos. Este fato ocorre em decorrência da escassez de pólen durante a fase de emissão dos estilo-estigmas, reduzindo o número de óvulos fertilizados, como também ao abortamento, logo após a fertilização, suprimindo o poder de demanda da espiga durante o enchimento de grãos (Sangoi e Salvador, 1998; Rajcan e Tollenaar, 1999). Deste modo, o menor intervalo entre florescimentos masculino e feminino proporcionará maior tolerância ao estresse abiótico e, conseqüentemente, acarretará em maior produção de grãos.

**Tabela 16.** Médias e porcentagem de redução relativa entre os níveis de nitrogênio das variáveis, florescimento feminino (FF), intervalo entre o florescimento masculino e feminino (IF), teor de clorofila (SPAD), altura planta (AP), altura de espiga (AE), prolificidade (PROL), comprimento de espiga (CPE), diâmetro de espiga (DE), massa de 100 grãos (M100), produtividade de grãos (PG) e capacidade de expansão (CE) avaliadas em 90 híbridos de milho-pipoca.

Características	Campos dos Goytacazes			Itaocara		
	Alto N	Baixo N	%Redução	Alto N	Baixo N	%Redução
FF	54,84	54,60	0,43	52,81	53,07	-0,50
IF	-0,70	-0,72	2,86	-3,84	-4,77	-24,11
SPAD	52,18	49,22	5,66	56,56	54,98	2,79
AP	166,52	165,13	0,84	220,81	216,03	2,17
AE	94,66	92,70	2,06	118,34	117,24	0,93
PROL	1,69	1,68	0,60	1,18	1,15	2,58
CPE	13,62	13,08	3,94	13,93	13,71	1,52
DE	28,20	27,35	2,99	30,22	29,55	2,23
M100	9,88	9,47	4,12	11,59	10,84	6,44
PG	2296,48	1827,34	20,43	3855,16	3058,29	20,67
CE	27,74	26,85	3,22	30,30	29,11	3,92

Observa-se que, em média, ocorreu redução de 5,66 e 2,79% do índice SPAD em Campos e Itaocara, respectivamente (Tabela 16), assim como o efeito significativo para interação dos níveis de disponibilidade de nitrogênio com os genitores, F<sub>1</sub> e recíprocos (Tabela 14). O SPAD é usado para quantificar o teor relativo de clorofila nas folhas das plantas e é efetivamente usado para diagnosticar o estado de N e estimar potencial de produção de grãos de milho (Vetsch e Randall,

2004). De acordo com Miranda et al. (2005), as leituras de SPAD permitem a eliminação de genótipos pouco eficientes no uso de N, sendo falhos para seleção de genótipos mais eficientes.

Todavia, Bullock e Anderson (1998) não relataram associação entre o rendimento de grãos de milho e as leituras de SPAD, mas concluíram que essa leitura pode ajudar na recomendação de N para a cultura do milho. Soares et al. (2011) observaram correlação genética significativa e positiva entre o teor de clorofila e produção de grãos em baixo N. Os autores sugeriram que a avaliação desta variável pode auxiliar na eliminação de linhagens pouco produtivas em baixo N. Ainda nesse contexto, Udo et al. (2017) relataram que a concentração de clorofila foliar medida pelo SPAD foi uma das variáveis fisiológicas mais associada ao rendimento de grãos sob baixo teor de nitrogênio no solo, sugerindo que esta avaliação pode ser usada isoladamente ou em combinação com outras avaliações agronômicas desejáveis para construir um índice de seleção na cultura do milho para tolerância ao baixo teor de nitrogênio do solo.

Verifica-se que nos ambientes com baixa disponibilidade de nitrogênio ocorreu redução de 20,43 e 20,67% na média da produtividade de grãos em Campos dos Goytacazes e Itaocara, respectivamente. Essa redução na média de produtividade de grãos, observada nos ambientes com estresse em relação à obtida na ausência do estresse está em consonância com o proposto por Bolaños e Edmeades (1996) para caracterizar o estresse. Os autores sugeriram que a média expressa em estresse abiótico esteja entre 20 e 30% inferior à alcançada pelo mesmo conjunto genético no ambiente sem estresse abiótico, considerando os ensaios em um mesmo ano e local. Vale ressaltar, ainda, que a diferença de produção de grãos foi de 469 kg ha<sup>-1</sup> e 796 kg ha<sup>-1</sup> em Campos e em Itaocara, respectivamente, e que a diferença de N aplicado foi de 90 kg ha<sup>-1</sup>, ou seja, a resposta média de kg de grãos produzidos por kg de N aplicado foi de 5,21 e 8,84 kg, respectivamente.

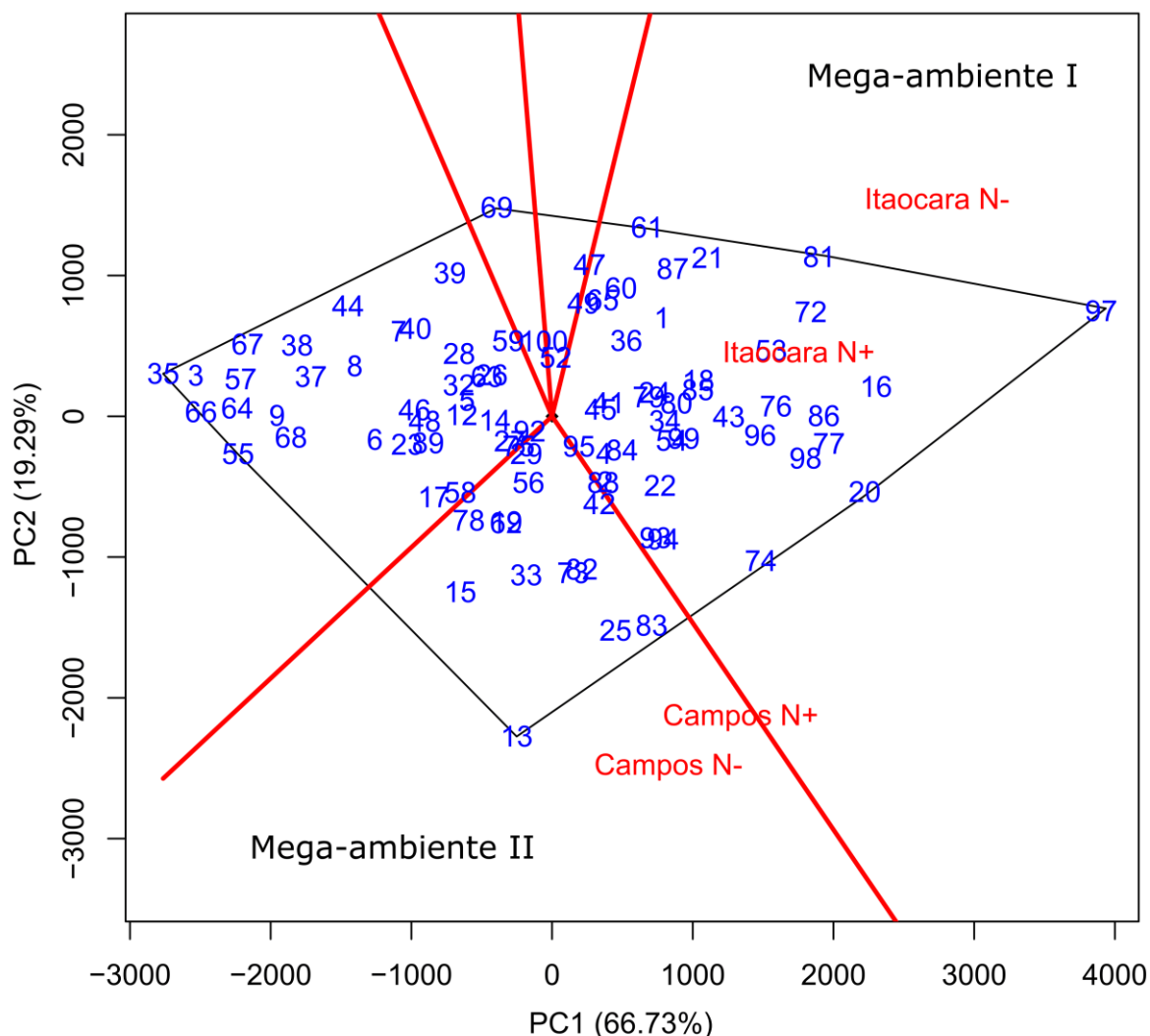
Com relação do desempenho produtivo dos híbridos avaliados por meio da análise GGE *Biplot*, pode-se perceber que os dois primeiros componentes principais explicaram 86,02 % da variação total existente. Este valor explica a maior proporção da soma de quadrados da interação GxA, indicando que há alta confiabilidade nos resultados obtidos pela análise GGE *Biplot*. De acordo com Yan e Tinker (2006) qualquer componente principal com um valor de RI

substancialmente menor do que 1,0 exerce pouca informação, ao passo que um componente principal com um valor de RI superior a 1,0, como pode ser observado para o CP1, possui padrões importantes. Portanto, o gráfico *Biplot* utilizado é adequado para representar os padrões relacionados à interação (Tabela 17), possibilitando uma fidedigna seleção dos híbridos com melhor *performance* nos ambientes contrastantes quanto à disponibilidade de nitrogênio.

**Tabela 17.** Valor singular, variação explicada, proporção acumulada e relação da informação (RI) dos quatro componentes principais (PC) da análise GGE *Biplot*.

Componente Principal	Valor singular	% acumulada	% explicada	RI
1	16756,03	66,73	66,73	2,67
2	4843,76	86,02	19,29	0,77
3	2249,87	94,98	8,96	0,36
4	1260,53	100,00	5,02	0,20

Na análise GGE *Biplot*, a visualização do gráfico “quem-venceu-onde” (Figura 6), possibilita identificar possíveis mega-ambientes, fazendo um resumo dos padrões da interação GA de um conjunto de informações extraídas das parcelas experimentais. Este gráfico consiste em um polígono com linhas perpendiculares, denominadas linhas de igualdade, desenhadas em seus lados. Essas linhas dividem o polígono em vários setores. Os genótipos localizados nos vértices do polígono têm a maior distância da origem que todos os genótipos dentro do setor delimitado por ele, sendo classificados como os mais responsivos. Estes podem ser os superiores ou inferiores em alguns ou em todos os ambientes e podem ser utilizados para identificar possíveis mega-ambientes.



**Figura 6.** GGE *Biplot* representando o gráfico "quem venceu onde" (*which won where*) para a produtividade de grãos de milho-pipoca avaliados em ambientes com baixa e ideal disponibilidade nitrogênio.\* A identificação dos híbridos consta na Tabela 3.

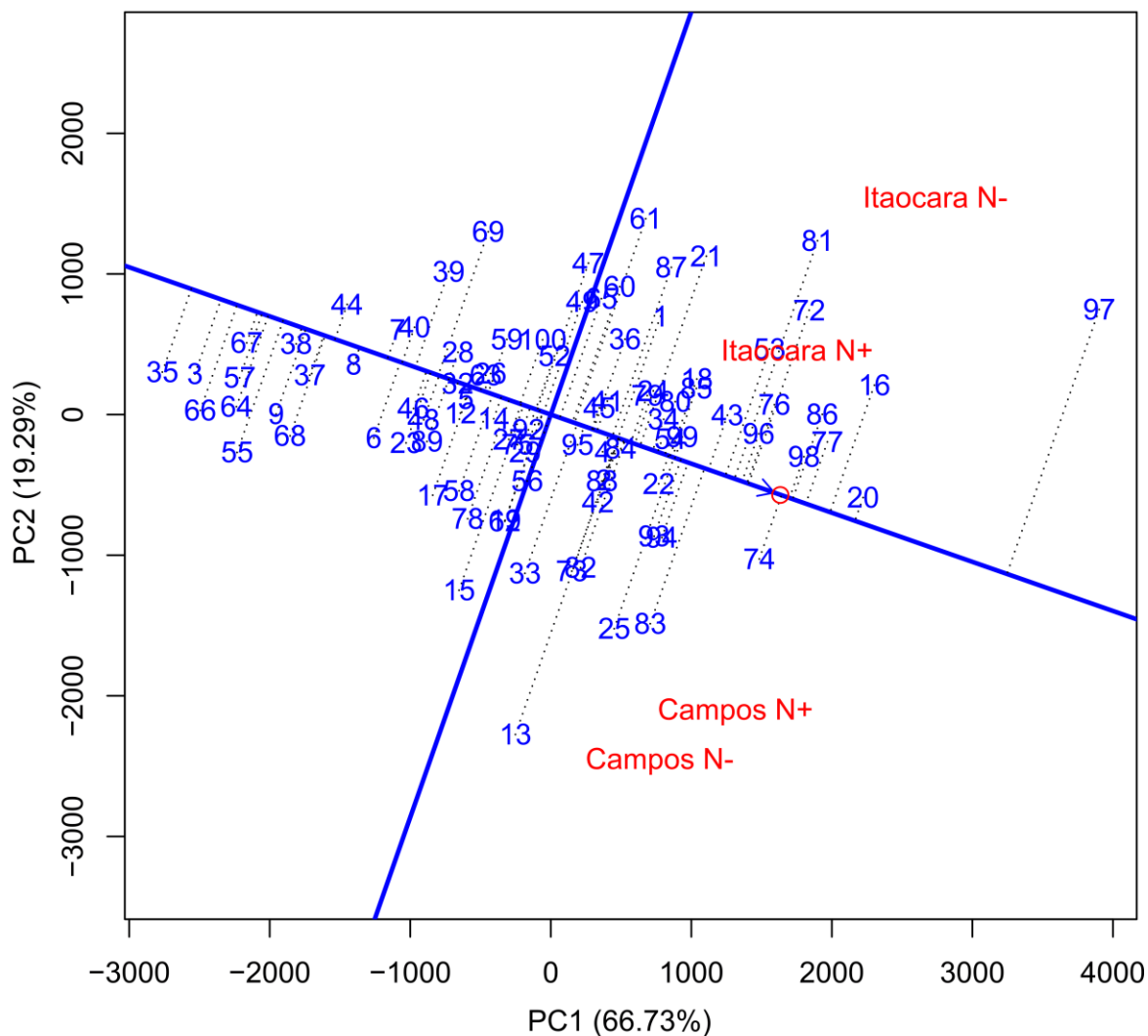
Ao conectar os marcadores dos genótipos com as cinco linhas de igualdade, conforme ilustrado, percebe-se que enquanto o *Biplot* produz cinco setores, os ambientes se dividem em dois deles, de modo que o vértice dos genótipos nos setores pode ter maior ou menor rendimento em comparação com outras partes em todos os ambientes (Yan e Rajcan, 2002). Assim sendo, os ambientes agrupados dentro desses setores são considerados similares em relação à influência ambiental gerada sobre os genótipos. O híbrido 97 (P7xL77) localizado em um dos vértices do polígono no mega-ambiente 1, foi o mais favorável para aquele grupo de ambientes, assim como o híbrido 13 (L59 x L61) no mega-ambiente 2. Deste modo, pode-se inferir que estes genótipos possuem o maior rendimento em pelo

menos um dos ambientes e estão entre os híbridos com desempenho superior nos outros ambientes do grupo (Yan e Rajcan, 2002).

Observa-se ainda que os híbridos 16 (L59 x L77), 20 (L59 x P7), 72 (P2 x L54), 77 (P2 x L77), 81 (P6 x L54), 86 (P6 x L77), 98 (P7 x L80) e 15 (L59 x L76), 25 (L61 x L77), 33 (L75 x L59), 73 (P2 x L59), 82 (P6 x L59), 83 (P6 x L61) apresentaram superioridade aos demais híbridos no mega-ambiente 1 e 2, excetuando os híbridos 97 (P7 x L77) e 13 (L59 x L61), respectivamente. Como ambos mega-ambientes foram formados por ambientes com baixa e ideal disponibilidade de nitrogênio, pode-se dizer então que estes híbridos são os mais eficientes e responsivos no uso do nitrogênio. Este resultado é interessante, pois ambos os híbridos são derivados de cruzamento no qual um dos genitores é eficiente e responsivo ao uso do nitrogênio ou pelo menos intermediário (Santos et al., 2017), ou seja, para obtenção de híbridos eficientes no uso do nitrogênio é necessária a utilização de genitores contrastantes quanto a eficiência e responsividade do mesmo.

Deve-se salientar, ainda, que quando os genótipos originam os vértices do polígono, mas não contêm nenhum ambiente agrupado, são considerados desfavoráveis aos grupos de ambientes testados, revelando baixa responsividade e produtividade. Desse modo, os genótipos localizados nos setores por eles compreendidos também são desfavoráveis à recomendação como genitores para comporem programas de melhoramento objetivando aumentos na expressão da variável em condições de estresse. Assim, dos 90 híbridos avaliados, 36 situam-se nestes setores, podendo ser considerados como não eficientes e não responsivos ao uso do nitrogênio

Como na figura supracitada não é possível fazer inferência sobre a estabilidade dos híbridos, para tal utilizou-se a coordenação do ambiente médio (CAM) (Figura 7). Neste método um ambiente ideal é definido a partir da média dos escores dos componentes principais de todos os ambientes, definido pelo pequeno círculo. A linha que passa pela origem do *Biplot* e pelo ambiente ideal é chamada de eixo do ambiente ideal e representa a CAM abscissa. A CAM ordenada é o eixo que passa pela origem do *Biplot* e é perpendicular a CAM abscissa e indica um maior efeito da interação genótipos x ambientes e menor estabilidade, e ainda separa os genótipos que estão abaixo e acima da média (Yan e Tinker, 2006; Yan et al., 2007).



**Figura 7.** Adaptabilidade e estabilidade quanto à produtividade de grãos de 90 híbridos de milho-pipoca nos ambientes com baixa e ideal disponibilidade nitrogênio. \* A identificação dos híbridos consta na Tabela 3.

Por conseguinte, os híbridos mais produtivos, de forma hierarquicamente decrescente, foram 97 (P7xL77), 20 (L59xP7), 16 (L59xL77), 77 (P2xL77), 86 (P6xL77), 98 (P7xL80) e 74 (P2xL61). O híbrido 97, embora tenha exibido primazia, expressou baixa estabilidade, tendo sido o genótipo que mais contribuiu para interação GA. Este resultado corrobora com os trabalhos de Sharma et al. (2009) e Savemore et al. (2017), nos quais também se observou que os genótipos de maior rendimento nem sempre são os mais estáveis em todos os ambientes. Genótipos instáveis não são desejáveis em um programa de melhoramento genético, pois sua indicação tem um efeito negativo sobre a renda dos agricultores e, no caso das

culturas básicas, pode contribuir para a insegurança alimentar e nutricional, seja em escala doméstica ou nacional.

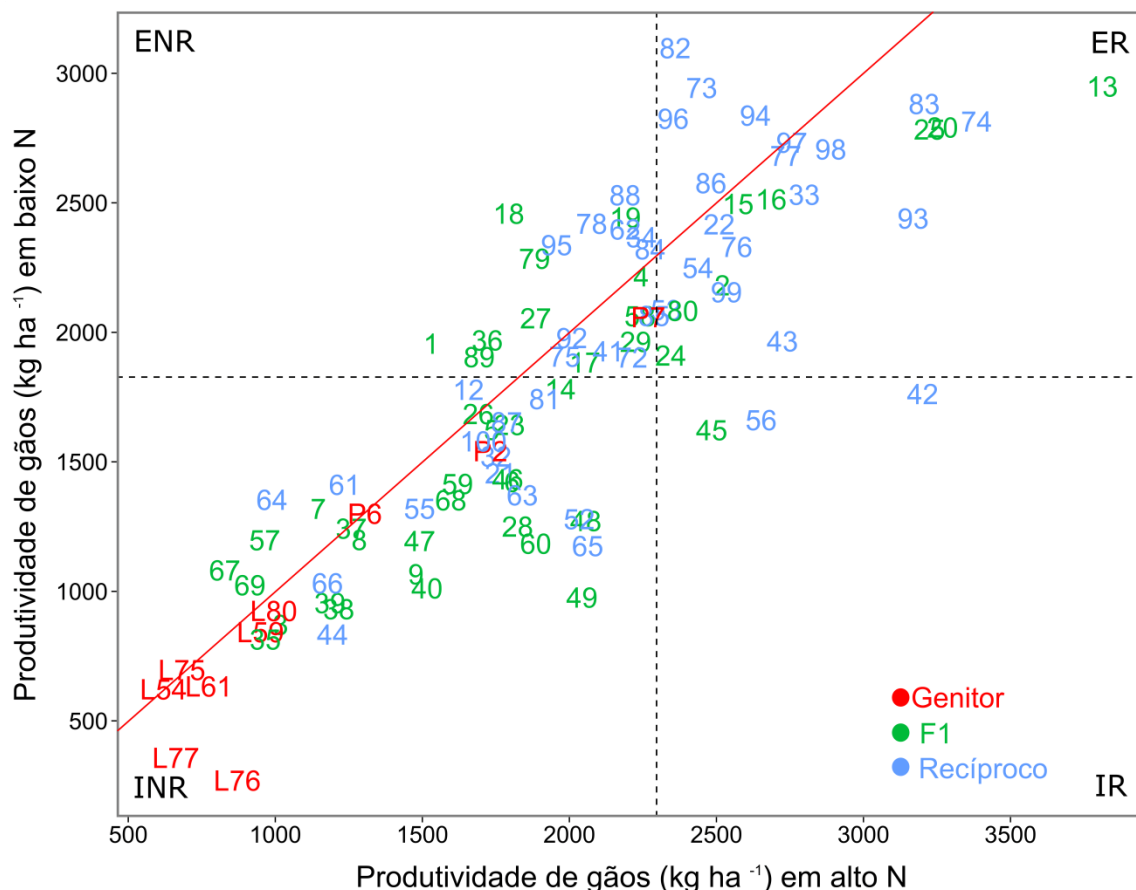
Quanto à eficiência no uso de nutrientes, Gourley et al. (1993) relatam que a atividade metabólica superior em um dado genótipo resultará em maior produtividade, independente da disponibilidade do nutriente existente, e deste modo, identificaria o genótipo superior e não o genótipo eficiente. Assim sendo, para classificar um par de genótipos como eficiente e ineficiente os mesmos teriam que apresentar produtividades semelhantes sob níveis adequados do nutriente e diferentes entre si nos ambientes sob baixa disponibilidade do nutriente.

Sob esta perspectiva, pode-se observar que os híbridos 83 (P6 x L61), 74 (P2 x L61), 25 (L61 x L77), 20 (L59 x P7), 93 (P7 x L59) obtiveram semelhante produtividade de grãos ao híbrido 42 (L77 x L54) no ambiente com ideal disponibilidade de N, no qual ambos os híbridos supracitados foram classificados como responsivos ao uso do N; entretanto, estes se diferenciaram no ambiente com baixa disponibilidade de N (Figura 8). Por conseguinte, pode-se classificar os híbridos 83, 74, 25, 20, 93 como eficientes ao uso do nitrogênio.

Deve-se salientar que a linha vermelha que corta o gráfico na diagonal representa o limite entre a maior eficiência e responsividade, ou seja, os híbridos que se situarem abaixo da linha são mais responsivos do que eficientes no uso do nitrogênio, assim como os híbridos localizados acima da linha apresentam maior eficiência em detrimento da responsividade ao uso do nitrogênio.

Neste contexto, dentre os híbridos classificados como eficientes e responsivos, os híbridos 82 (P6 x L59), 73 (P2 x L59), 96 (P7 x L76), 94 (P7 x L61) e 86 (P6 x L77) apresentam maior eficiência no uso do nitrogênio em relação à responsividade. Fica evidente que estes híbridos possuem maiores médias nos ambientes com estresse de nitrogênio comparados com as médias em ambientes com ideal disponibilidade de nitrogênio. Esses, assim como os híbridos classificados como eficientes e não responsivos, podem ser indicados para produtores que não dispõem de nível de tecnologia elevado.

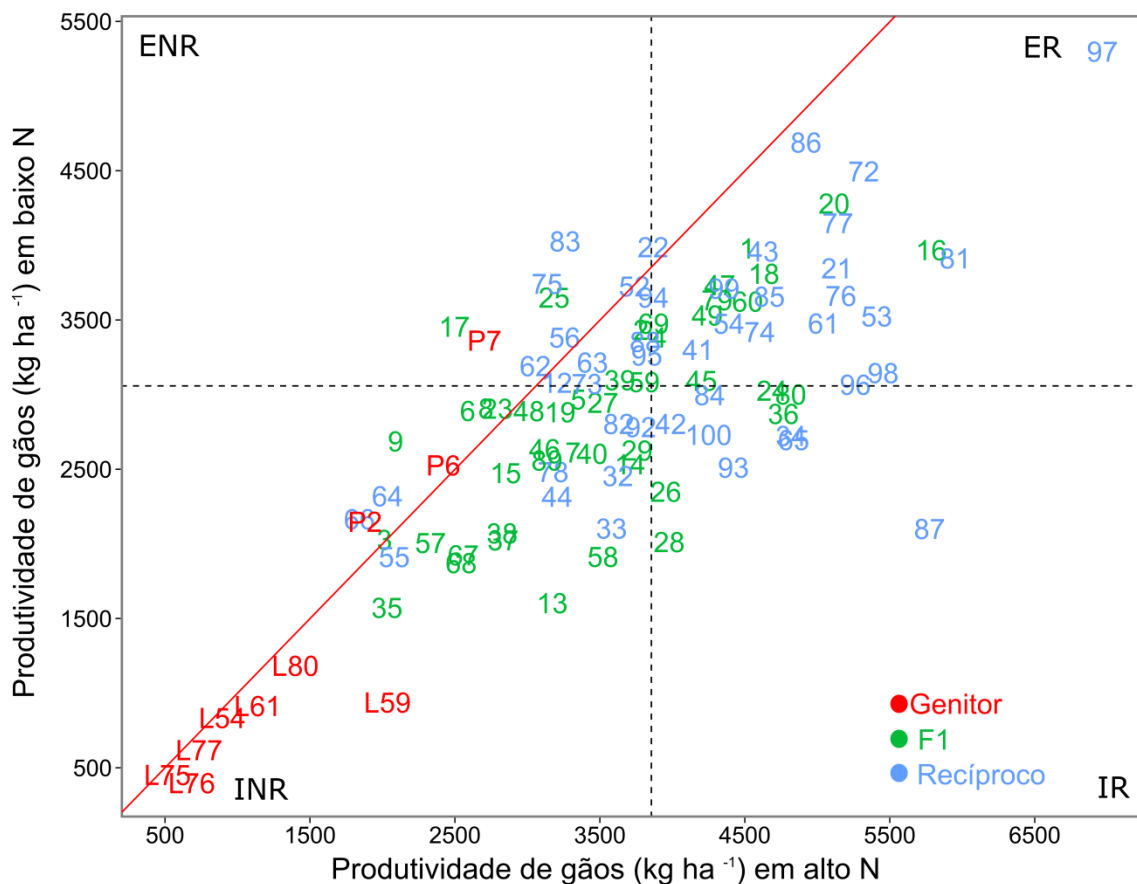




**Figura 8.** Desempenho quanto à eficiência de uso do nitrogênio e resposta a adubação nitrogenada de 100 genótipos de milho-pipoca avaliados em Campos dos Goytacazes, RJ. \* A identificação dos híbridos consta na Tabela 3.

Em Campos dos Goytacazes, observa-se que 25 híbridos foram classificados como eficientes e responsivos ao nitrogênio. Em Itaocara, foram 30 híbridos (Figura 9), sendo que 15 destes foram coincidentes. Deve-se salientar que dentre estes, apenas os híbridos 80 (P2 x P7), 79 (P2 x P6) e 99 (P7 x P2) possuem na genealogia ambos genitores eficientes e responsivos ao uso do nitrogênio. Os demais híbridos são provenientes de cruzamentos no qual estão presentes pelo menos um genitor eficiente ou intermediário quanto à eficiência e responsividade. Este resultado permite inferir que a heterose é maior quando os híbridos são sintetizados entre progênies de grupos heteróticos diferentes quanto ao uso de nitrogênio. Deste modo, houve três grupos distintos, a saber: eficientes e responsivos, ineficientes e não responsivos e intermediários. Foi observado também que nestes híbridos o genitor feminino sempre foi eficiente ou

intermediário, reforçando, a importância da escolha do genitor feminino nos blocos de cruzamento.



**Figura 9.** Desempenho quanto à eficiência de uso do nitrogênio e resposta a adubação nitrogenada dos 100 genótipos de milho-pipoca avaliados em Itaocara, RJ. \* A identificação dos híbridos consta na Tabela 3.

Considerando esse cenário, nota-se uma variação nos resultados em relação ao que era esperado com as combinações envolvendo genitores eficiente e intermediários. É possível atribuir a este resultado os efeitos dos desvios de dominância ou da epistasia. Todavia, devido ao número de híbridos identificados como eficientes e responsivos, a seleção de linhagens eficientes e responsivas ao nitrogênio pelo desempenho *per se*, sob alta e baixa disponibilidade de nitrogênio, torna-se uma boa estratégia de seleção.

A eficiência destes híbridos na absorção e utilização do nitrogênio na produtividade permite inferir que os processos associados a absorção,

translocação, assimilação e redistribuição de nitrogênio são mais eficientes que nos demais híbridos, uma vez que as taxas de absorção do nutriente ao longo do ciclo da cultura, a capacidade de armazenamento de N nas estruturas vegetativas da planta, a eficiência de reciclagem do nitrogênio das frações vegetativas para as estruturas reprodutivas e o poder de demanda dos grãos por compostos nitrogenados e carbonados, são as quatro expressões citadas por Huber et al. (1994) que determinam a resposta do rendimento de grãos de milho à disponibilidade de nitrogênio.

No mesmo contexto, McCullough et al. (1994) demonstraram que a maior eficiência de uso do nitrogênio de um híbrido moderno em comparação com um híbrido antigo está associada às maiores taxas de absorção do nitrogênio e a maior quantidade de N por unidade de área foliar. De acordo com Lithourgidis et al. (2011), para a produtividade de uma tonelada de grãos de milho, a planta necessita absorver aproximadamente  $21 \text{ kg ha}^{-1}$  de N, sendo que cerca de 75% da quantidade absorvida é exportada pela colheita dos grãos, ratificando a superioridade na absorção, translocação, assimilação e redistribuição de nitrogênio dos híbridos eficientes ao uso do nutriente.

## 6. CONCLUSÕES

Tanto os efeitos genéticos aditivos quanto os não-aditivos são importantes para a seleção de genótipos eficientes no uso do nitrogênio.

Houve complementaridade alélica entre as linhagens e efeito recíproco para eficiência no uso do nitrogênio, indicando a importância da escolha dos genitores e serem usados como fêmea ou macho.

Os híbridos superiores quanto a EUN são provenientes de genitores contrastantes quanto à eficiência e responsividade ao nitrogênio.

A interação híbridos x disponibilidade de nitrogênio é menos pronunciada do que a interação linhagens x disponibilidade de nitrogênio.

A seleção para eficiência no uso do nitrogênio é mais eficiente quando realizada nos híbridos.

Os híbridos 82 (P6 x L59), 73 (P2 x L59), 96 (P7 x L76), 94 (P7 x L61) e 86 (P6 x L77) possuem maior eficiência ao uso do nitrogênio em relação à responsividade, sendo ideais para cultivo em baixa tecnologia.

Os híbridos 16 (L59 x L77), 20 (L59 x P7), 43 (L76 x L61), 53 (L77 x L59), 54 (L77 x L61), 74 (P2 x L61), 76 (P2 x L76), 77 (P2 x L77), 86 (P6 x L77), 94 (P7 x L61), 96 (P7 x L76), 97 (P7 x L77), 98 (P7 x 80), e 99 (P7 x P2) possuem alta produtividade e potencial para serem utilizados comercialmente como híbridos eficientes no uso de nitrogênio.

## 7. REFERÊNCIAS

- Abdel-Moneam, M.A., Sultan, M.S., Salama, S.M.G., El-Oraby, A.M. (2014) Evaluation of combining ability and heterosis for yield and its components traits of five maize inbreds under normal and stress nitrogen fertilization. *Asian J. Crop Sci.* 6: 142-149.
- Atlin, G.N., Frey, K.J. (1989) Breeding crop varieties for low-input agriculture. *Am. J. Altern Agric* 4: 53–58.
- Baker, R.J. (1978) Issues in diallel analysis. *Crop Sci* 18: 533–536.
- Banziger, M., Betnin, J., Lafitte, H.R. (1989) Efficiency of High-Nitrogen Selection Environments for Improving Maize for Low-Nitrogen. *Target Environments*. 1109: 1103–1109.
- Bolaños, J., Edmeades, G.O. (1996) The importance of the anthesis - silking interval in breeding for drought tolerance in tropical maize. *F Crop Res* 48: 65–80.
- Brugnera, A., Pinho, R.G. Von., Pacheco, C.A.P., Alvarez, C.G.D. (2003) Resposta de cultivares de milho-pipoca a doses de adubação de semeadura. *Rev Ceres L*: 417–429.
- Bullock, D.G., Anderson, D.S. (1998) Evaluation of the Minolta SPAD-502 chlorophyll meter for nitrogen management in corn. *J Plant Nutr* 21: 741–755.

- Cañas, R.A., Quiller, I., Gallais, A., Hirel, B. (2012) Can genetic variability for nitrogen metabolism in the developing ear of maize be exploited to improve yield? *New Phytol* 194: 440–452.
- Carpentieri-Pípolo, V., Rinaldi, D.A., Lima, V.E.N. (2005) Adaptabilidade e estabilidade de populações de milho-pipoca. *Pesqui Agropecu Brasileira*, 40: 87-90.
- Chen, X., Zhang, J., Chen, Y., Li, Q., Chen, F., Yuan, L., Mi, G. (2014) Changes in root size and distribution in relation to nitrogen accumulation during maize breeding in China. *Plant Soil* 374: 121–130.
- Civardi E.A., Silveira Neto A.N., Ragagnin V.A., Godoy E.R., Brod E. (2011) Ureia de liberação lenta aplicada superficialmente e ureia comum incorporada ao solo no rendimento do milho. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 41: 52-59.
- Cole, L., Buckland, S.M., Bardgett, R.D. (2008) Influence of disturbance and nitrogen addition on plant and soil animal diversity in grassland. *Soil Biol Biochem* 40: 505–514.
- Collins, N.C., Tardieu, F., Tuberosa, R. (2008) Quantitative Trait Loci and Crop Performance under Abiotic Stress: Where Do We Stand?. *Plant Physiol* 147: 469–486.
- Coque, M., Martin, A., Veyrieras, J.B., Hirel, B., Gallais, A. (2008) Genetic variation for N-remobilization and postsilking N-uptake in a set of maize recombinant inbred lines. 3. QTL detection and coincidences. *Theor Appl Genet* 117: 729–747.
- Cordell, D., Drangert, J.O., White, S. (2009) The story of phosphorus: Global food security and food for thought. *Glob Environ Chang* 19: 292–305.
- Cruz, C.D., Regazz, I.A.J., Carneiro, P.C.S. (2012) *Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético*. UFV, Viçosa, 514p.
- De Oliveira, L.R., Miranda, G.V., DeLima, R.O., Fritsche-Neto, R., Galvão, J.C.C. (2013) Eficiência na absorção e utilização de nitrogênio e atividade enzimática em genótipos de milho. *Rev Cienc Agron* 44: 614–621.

- Dofing, S.M., D'Croz-Mason, N., Thomas-Compton, M.A. (1991) Inheritance of Expansion Volume and Yield in Two Popcorn x Dent Corn Crosses. *Crop Sci* 31: 715.
- DoVale, J.C., Fritsche-Neto, R., Bermudez, F., Miranda, G.V. (2012) Efeitos gênicos de caracteres associados à eficiência no uso de nitrogênio em milho. *Pes. Agropecu. Bras* 47: 385–392.
- DoVale, J.C., Maia, C., Fritsche-Neto, R., Miranda, G.V., Cavatte, P.C. (2013) Genetic responses of traits relationship to components of nitrogen and phosphorus use efficiency in maize. *Acta Sci Agron* 35: 31–38.
- Duete, R.R.C., Muraoka, T., Silva, E.C. da., Trivelin, P.C.O., Ambrosano, E.J. (2008) Manejo da adubação nitrogenada e utilização do nitrogênio (15N) pelo milho em Latossolo Vermelho. *Rev Bras Ciência do Solo* 32: 161–171.
- Erwin, A.T. (1950) The origin and history of pop corn. *Econ. Bot* 4: 294–299.
- Fantin, G.M., Sawazaki, E., Barros, B.C. (1991) Avaliação de genótipos de milho-pipoca quanto à resistência a doenças e à qualidade da pipoca. *Summa Phytopathologica*, 17: 91-104.
- Friday, E., Sam, U., Ajala, O., Bolanle, A. (2017) Physiological and morphological changes associated with recurrent selection for low nitrogen tolerance in maize. *Euphytica* 213: 1–13.
- Galinat, W.C (1979) *Ciba-Geigy Agrochemicals: Maize*. Basle, Switzerland: Ciba-Geigy Agrochemicals, 105p.
- Gallais, A., Hirel, B. (2004) An approach to the genetics of nitrogen use efficiency in maize. *J Exp Bot* 55: 295–306.
- Gamboa, J., Perez, G., Blasco, M. (1971) Um modelo para describir los procesos de retención y lixiviation em los suelos. *Turrialba*, 21: 312-316.
- Gaut, B.S., d'Ennequin, M.L.T., Peek, A.S., Sawkins, M.C. (2000) Maize as model for the evolution of plant nuclear genomes. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 97:7008-7015.

- Goodman, M.M., Smith, J.S.C. (1987) *Botânica In: Paterniani, E., Viegas, G. P. (Ed.). Melhoria e produção de milho*. Campinas: Fundação Cargil, 1987, cap.1, 41-78p.
- Goulding, K., Jarvis, S., Whitmore, A. (2008) Optimizing nutrient management for farm systems. *Philos Trans R Soc B Biol Sci* 363: 667–680.
- Gourley, C.J.P., Allan, D.L., Russelle, M.P. (1993) Defining phosphorus efficiency in plants. *Plant and Soil*, 156: 289-292.
- Gowda, K., Kage, U., Lohithaswa, H.C., Shekara, B.G., Shobha, D. (2013) Combining ability studies in maize (*Zea mays* L.). *Mol. Plant Breed.* 3: 116-127.
- Griffing, B. (1956) Concept of General and Specific Combining Ability in Relation to Diallel Crossing Systems. *Aust J Biol Sci* 9: 463.
- Guo, B., Sleper, D.A., Beavis, W.D. (2010) Nested association mapping for identification of functional markers. *Genetics* 186: 373–383.
- Guimarães, L.J.M. (2006) *Caracterização de genótipos de milho desenvolvidos sob estresse de nitrogênio e herança da eficiência de uso deste nutriente*. Tese (Doutorado em Genética e Melhoramento) – Universidade Federal de Viçosa - UFV. 110p.
- Haddad N.M., Brudvig L.A., Clobert J., Davies K.F., Gonzalez A., Holt R.D., Lovejoy T.E., Sexton J.O., Austin M.P., et al. (2015) Habitat fragmentation and its lasting impact on Earth's ecosystems. *Science Advances*, 1: 1-9.
- Hallauer, A.R. (2001). *Specialty corns*. CRC Press 496p.
- Hallauer, A.R., Carena, M.J., Miranda Filho, J.B. (2010) *Quantitative Genetics in Maize Breeding*, 3rd ed. v.6. Springer, New York. 663p.
- Hirel, B., Le Gouis, J., Ney, B., Gallais, A. (2007) The challenge of improving nitrogen use efficiency in crop plants: Towards a more central role for genetic variability and quantitative genetics within integrated approaches. *J Exp Bot* 58: 2369–2387.



- HUBER, D. M., TSAI, C.Y., STROMBERGER, J.A. (1994). Interaction of K with N and their influence on growth and yield potential of maize. *Annual Corn and Sorghum Research Conference* 48: 165-176.
- Inman, D., Khosla, R., Reich, R.M., Westfall, D.G. (2007) Active remote sensing and grain yield in irrigated maize. *Precis Agric* 8: 241–252.
- Kamara, M.M. (2015) Diallel analysis of some yellow maize inbred lines under low and normal nitrogen levels. *Internat Jour. Of Plant Breeding and Genetics*. 9:32-34.
- Kant, S., Bi, Y.-M., Rothstein, S.J. (2011) Understanding plant response to nitrogen limitation for the improvement of crop nitrogen use efficiency. *J Exp Bot* 62: 1499–1509.
- Lee, E.A., Ahmadzadeh, A., Tollenaar, M. (2005) Quantitative genetic analysis of the physiological processes underlying maize grain yield. *Crop Sci* 45: 981–987.
- Li, P., Chen, F., Cai, H., Liu, J., Pan, Q., Liu, Z., Gu, R., Mi, G., Zhang, F., Yuan, L. (2015) A genetic relationship between nitrogen use efficiency and seedling root traits in maize as revealed by QTL analysis. *J Exp Bot* 66: 3175–3188.
- Lithourgidis, A.S., Dordas, C.A., Damalas, C.A., Vlachostergios, D.N. (2011) Annual intercrops: An alternative pathway for sustainable agriculture. *Aust J Crop Sci* 5: 396–410.
- Liu, R., Zhang, H., Zhao, P., Zhang, Z., Liang, W., Tian, Z., Zheng, Y. (2012) Mining of Candidate Maize Genes for Nitrogen Use Efficiency by Integrating Gene Expression and QTL Data. *Plant Mol Biol Report* 30: 297–308.
- Liu, X., Zhang, Y., Han, W., Tang, A., Shen, J., Cui, Z., Vitousek, P., Erisman, J.W., Goulding, K., Christie, P., Fangmeier, A., Zhang, F. (2013) Enhanced nitrogen deposition over China. *Nature* 494: 459–462.
- Lu, H.-J., Bernardo, R., Ohm, H.W. (2003) Mapping QTL for popping expansion volume in popcorn with simple sequence repeat markers. *Theor Appl Genet* 106: 423–427.

- Mangelsdorf, P.C. (1974) *Corn its origin, evolution and improvement*. Cambridge: Harvard University Press, 262p.
- Mangelsdorf, P.C., Smith Junior, C.E. (1949) A discovery of remains of primitive maize in New Mexico. *The Journal of Heredity*. 17: 39-43.
- McCullough, D.E., Mihajlovic, M., Aguilera, A., Tollenaar, M., Girardin, P. (1994) Influence of N supply on development and dry matter accumulation of an old and a new maize hybrid. *Can J Plant Sci* 74: 471–477.
- Beman, M.J., Arrigo, K.R., Matson, P.A. (2005) Agricultural runoff fuels large phytoplankton blooms in vulnerable areas of the ocean. *Nature* 434: 211–214.
- Miranda, G. V., Godoy, C.L., Galvao, J.C.C., Santos, I.C. Dos., Eckert, F.R., Souza, L.V. De. (2005) Selection of discrepant maize genotypes for nitrogen use efficiency by a chlorophyll meter. *Crop Breed Appl Biotechnol* 5: 451–459.
- Moll, R.H., Kamprath, E.J., Jackson, W.A. (1982) Analysis and Interpretation of Factors Which Contribute to Efficiency of Nitrogen Utilization<sup>1</sup>. *Agron J*. 74: 562.
- Mota, M.R., Sangoi, L., Schenatto, D.E., Giordani, W., Boniatti, C.M., Dall'igna, L. (2015) Fontes estabilizadas de nitrogênio como alternativa para aumentar o rendimento de grãos e a eficiência de uso do nitrogênio pelo milho. *Rev Bras Cienc do Solo* 39: 512–522.
- Mukanga, M., Derera, J., Tongoona, P. (2010) Gene action and reciprocal effects for ear rot resistance in crosses derived from five tropical maize populations. *Euphytica* 174: 293–301.
- Mundim, G.B., Viana, J.M.S., Maia, C., Paes, G.P., DeLima, R.O. (2013) Genetic diversity and path analysis for nitrogen use efficiency in popcorn inbred lines. *Euphytica* 191: 291–299.
- Muruli, B.I., Paulsen, G.M. (1981) Improvement of nitrogen use efficiency and its relationship to other traits in maize. *Maydica*, 26: 63-73.

- Okumura, R.S., Mariano, D.D.C., Zaccheo, P.V.C. (2012) Uso de fertilizante nitrogenado na cultura do milho: uma revisão. *Rev Bras Tecnol Apl nas Ciências Agrárias* 4: 226–244.
- Paponov, I.A., Sambo, P., Schulte Auf'm Erley, G., Presterl, T., Geiger, H.H., Engels, C. (2005) Grain yield and kernel weight of two maize genotypes differing in nitrogen use efficiency at various levels of nitrogen and carbohydrate availability during flowering and grain filling. *Plant Soil* 272: 111–123.
- Paterniani, E., Campos, M.S. (2005) Melhoramento de milho. *In: Borém, A. (Ed). Melhoramento de espécies cultivadas*. 2. ed. Viçosa: UFV, p. 491-552.
- Pereira, M.G., Amaral Jr, A.T. (2001) Estimation of Genetic Components in Popcorn Based on the Nested Design. *Crop Breed Appl Biotechnol* 1: 3–10.
- Pimentel, A.J.B., Guimarães, J.F.R., de Souza, M.A., de Resende, M.D.V., Moura, L.M., de Carvalho Rocha, J.R. do A.S., Ribeiro, G. (2014) Estimação de parâmetros genéticos e predição de valor genético aditivo de trigo utilizando modelos mistos. *Pesqui Agropecu Bras* 49: 882–890.
- Pollmer, W.G., Eberhard, D., Klein, D., Dhillon, B.S. (1979) Genetic Control of Nitrogen Uptake and Translocation in Maize. *Crop Sci* 19: 82–86.
- Pswarayi, A., Vivek, B.S. (2008) Combining ability amongst CIMMYT's early maturing maize (*Zea mays* L.) germplasm under stress and non-stress conditions and identification of testers. *Euphytica* 162: 353–362.
- R Development Core Team, 2014. R: a language and environment for statistical computing Vienna: R Foundation for Statistical Computing Vienna.
- Rajcan, I., Tollenaar, M. (1999) Source: Sink ratio and leaf senescence in maize: II. Nitrogen metabolism during grain filling. *F Crop Res* 60: 255–265.
- Ramalho, M.A.P., Abreu, A.F.B., Santos, J.B., Nunes, J.A.R. (2012) *Aplicações da genética quantitativa no melhoramento de plantas autógamas*. Lavras: Ed. UFLA: 522p.

- Rangel, R.M., Amaral Júnior, A.T., Gonçalves, L.S.A., Freitas Júnior, S.P. (2011) Análise biométrica de ganhos por seleção em população de milho pipoca de quinto ciclo de seleção recorrente. *Rev Ciência Agronômica* 42: 473–481.
- Resende, M.D.V. de., Duarte, J.B. (2007) Precisão E Controle De Qualidade Em Experimentos De Avaliação De Cultivares. *Pesqui Agropecuária Trop* 37: 182–194.
- Resende, M.D;V. (2007) *Matemática e estatística na análise de experimentos e no melhoramento genético*. Colombo, 561 p.
- Sangoi, L., Salvador, R.J. (1998) Maize susceptibility to drought at flowering: a new approach to overcome the problem. *Ciência Rural*, 28: 699-706
- Santos, A. dos., Amaral Júnior, A.T. do., Kurosawa, R. do N.F., Gerhardt, I.F.S., Fritsche Neto, R., Santos, A. dos., Amaral Júnior, A.T. do., Kurosawa, R. do N.F., Gerhardt, I.F.S., Fritsche Neto, R. (2017) GGE Biplot projection in discriminating the efficiency of popcorn lines to use nitrogen. *Ciência e Agrotecnologia* 41: 22–31.
- Santos, F.S., do Amaral Júnior, A.T., Freitas Júnior, S.P., Rangel, R.M., Scapim, C.A., Mora, F. (2008) Genetic gain prediction of the third recurrent selection cycle in a popcorn population. *Acta Sci Agron* 30: 651–655.
- Savary, S., Ficke, A., Hollier, C.A. (2014) Impacts of global change on crop production and food security. *Global Environmental Change* 1: 379-387
- Savemore, N.N., Manjeru, P., Ncube, B. (2017) Pod yield stability and adaptation of groundnut (*Arachis hypogaea* L.) genotypes evaluated in multi-environmental trials in Zimbabwe. *African Journal of Plant Science*, 11: 174-184.
- Sawazaki, E. (2001) *A cultura do milho-pipoca no Brasil*. *O Agrônomo* 53: 11–13.
- Schiavinatti, A.F., Andreotti, M., Benett, C.G.S., Pariz, C.M., Lodo, B.N., Buzetti, S. (2011) Influência de fontes e modos de aplicação de nitrogênio nos componentes da produção e produtividade do milho irrigado no cerrado. *Bragantia* 70: 925–930.

- Sharma, R.C., Morgounov, A.I., Braun, H.J., Akin, B., Keser, M., Bedoshvili, D., Bagci, A., Martius, C., van Ginkel, M. (2009) Identifying high yielding stable winter wheat genotypes for irrigated environments in Central and West Asia. *Euphytica* 171: 53–64.
- Silva, V.M.P. e., Carneiro, P.C.S., Júnior, J.Â.N. de M., Carneiro, V.Q., Carneiro, J.E. de S., Cruz, C.D., Borém, A. (2013) Genetic potential of common bean parents for plant architecture improvement. *Sci Agric* 70: 167–175.
- Soares, M.O., Miranda, G.V., Guimarães, L.J.M., Marriel, I.E., Guimarães, C.T. (2011) Parâmetros genéticos de uma população de milho em níveis contrastantes de nitrogênio. *Rev Cienc Agron* 42: 168–174.
- Soratto R.P., Pereira M., Costa T.A.M., Lampert V.N. (2010) Fontes alternativas e doses de nitrogênio no milho safrinha em sucessão à soja. *Revista Ciência Agronômica*, 41: 511-518.
- Souza, L. V., Miranda, G.V., Galvão, J.C.C., Eckert, F.R., Mantovani, É. E., Lima, R.O., Guimarães, L.J.M. (2008) Controle genético da produção de grão e da eficiência de uso do nitrogênio em milho tropical. *Pesqui Agropecu Bras* 43: 1517–1523.
- TAIZ, L., ZEIGER, E. (2013) *Fisiologia vegetal*. 5. ed. Porto Alegre: ArtMed, 954 p.
- Tenaillon, M.J., U'Ren, J., Tenaillon, O., Gaut, B.S. (2004) Selection versus demography: a multilocus investigation of the domestication process in maize. *Molecular Biology and Evolution* 21:1214-1225.
- Tenkorang, F., Lowenberg-Deboer, J. (2009) Forecasting long-term global fertilizer demand. *Nutr Cycl Agroecosystems* 83: 233–247.
- Thanh, N.M., Nguyen, N.H., Ponzoni, R.W., Vu, N.T., Barnes, A.C., Mather, P.B. (2010) Estimates of strain additive and non-additive genetic effects for growth traits in a diallel cross of three strains of giant freshwater prawn (*Macrobrachium rosenbergii*) in Vietnam. *Aquaculture* 299: 30–36.

- Udo, E.F., Ajala, S.O., Olaniyan, A.B. (2017) Physiological and morphological changes associated with recurrent selection for low nitrogen tolerance in maize. *Euphytica* 213:140.
- Uribelarrea, M., Moose, S.P., Below, F.E. (2007) Divergent selection for grain protein affects nitrogen use in maize hybrids. *F Crop Res* 100: 82–90.
- Vetsch, J.A., Randall, G.W. (2004) Corn production as affected by nitrogen application timing and tillage. *Agron J* 96: 502–509.
- Raun, W.R., Johnson, G.V. (1999) Improving Nitrogen Use Efficiency for Cereal Production. *Agron J* 91: 357–363.
- Willier, G. (1927) Factors affecting the popping quality of pop corn. *Journal of Agricultural Research* 35: 615-624.
- Worku, M., Bänziger, M., Friesen, D., Erley, S.A., Horst, W.J., Vivek, B.S. (2008) Relative importance of general combining ability and specific combining ability among tropical maize (*Zea mays* L) inbreds under contrasting nitrogen environments *Maydica* 53: 279-288.
- Wu, H., Matheson, A. (2001) Reciprocal, maternal and nonmaternal effects in radiata pine diallel mating experiment on four Australia sites. *Forest Genetics* 8:205-212.
- Wu, Y., Liu, W., Li, X., Li, M., Zhang, D., Hao, Z., Weng, J. (2011) Low nitrogen stress tolerance and nitrogen agronomic efficiency among maize inbreds: comparison of multiple indices and evaluation of genetic variation. *Euphytica* 180:281–290.
- Yan, W., Holland, J.B. (2009) A heritability-adjusted GGE biplot for test environment evaluation. *Euphytica* 171: 355–369.
- Yan, W., Kang, M.S., Ma, B., Woods, S., Cornelius, P.L. (2007) GGE biplot vs. AMMI analysis of genotype-by-environment data. *Crop Sci* 47: 643–655.
- Yan, W., Rajcan, I. (2002) Biplot analysis of test sites and trait relations of soybean in Ontario. *Crop Sci* 42: 11–20.

- Yan, W., Tinker, N.A. (2006) Biplot analysis of multi-environment trial data: Principles and applications. *Can J Plant Sci* 86: 623–645.
- Zhang, N., Gibon, Y., Gur, A., Chen, C., Lepak, N., Hohne, M., Zhang, Z., Kroon, D., Tschoep, H., Stitt, M., Buckler, E. (2010) Fine Quantitative Trait Loci Mapping of Carbon and Nitrogen Metabolism Enzyme Activities and Seedling Biomass in the Maize IBM Mapping Population. *Plant Physiol* 154: 1753–1765.
- Zinsly, J.R., Machado, J.A. (1978) Milho-pipoca. In: *Fundação Cargil. Melhoramento e produção do milho no Brasil*. Piracicaba, ESALQ, p.339-347.
- Zheng Z, Huang Y, Tian M, Tan Z, 2007. Mapping QTLs and epistasis for plant type traits in maize under two nitrogen levels. *J Maize Sci* 15:14–18.