

**MELHORAMENTO DO MILHO-PIPOCA: EFICIÊNCIA DA
ADAPTAÇÃO A SOLOS POBRES EM FÓSFORO**

ISMAEL FERNANDO SCHEGOSCHESKI GERHARDT

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

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

MELHORAMENTO DO MILHO-PIPOCA: EFICIÊNCIA DA
ADAPTAÇÃO A SOLOS POBRES EM FÓSFORO

ISMAEL FERNANDO SCHEGOSCHESKI GERHARDT

“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

049/2018

G368 Gerhardt, Ismael Fernando Schegoscheski.

Melhoramento do milho-pipoca : eficiência da adaptação a solos pobres em fósforo / Ismael Fernando Schegoscheski Gerhardt. – Campos dos Goytacazes, RJ, 2018.

113 f. : il.

Bibliografia: 83 – 100.

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. Divergência Genética. 3. Análise Dialética. 4. Efeitos Gênicos. 5. Estresses Abióticos. I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. II. Título.

CDD – 633.1523

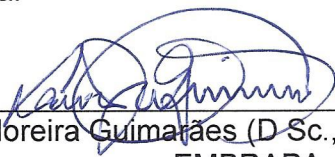
MELHORAMENTO DO MILHO-PIPOCA: EFICIÊNCIA DA
ADAPTAÇÃO A SOLOS POBRES EM FÓSFORO

ISMAEL FERNANDO SCHEGOSCHESKI GERHARDT

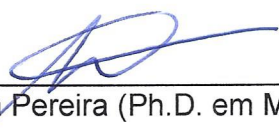
“Tese apresentada ao Centro de Ciências e
Tecnologias Agropecuárias da Universidade
Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro,
como parte das exigências para obtenção do
título de Doutor em Genética e Melhoramento
de Plantas.”

Aprovada em 26 de Fevereiro de 2018.

Comissão Examinadora:



Dr. Lauro José Moreira Guimarães (D.Sc., Genética e Melhoramento) -
EMBRAPA



Prof. Messias Gonzaga Pereira (Ph.D. em Melhoramento de Plantas) - UENF



Prof. Marcelo Vivas (D.Sc., Genética e Melhoramento de Plantas) - UENF



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

Ao meu querido e eternamente lembrado Avô, **Albino Schegoscheski** (*in memoriam*), que apesar de nunca ter tido oportunidade de estudar, sempre foi um grande incentivador à educação.

À minha querida e estimada Mãe, **Olli Schegoscheski**, que nunca mediu esforços para dar o melhor a mim e à minha irmã.

DEDICO ESTA CONQUISTA!

AGRADECIMENTOS

Ao nosso Pai Celestial, pelo dom da vida e por todas as bênçãos derramadas sobre a minha vida. Sem Ele, nada seria possível. Obrigado meu Deus!

À minha querida Família, que é meu verdadeiro alicerce, estando sempre ao meu lado durante a minha trajetória, nos momentos de alegria e de dificuldades. Obrigado, pelo amor incondicional, por não medirem esforços em me apoiar e por sempre acreditar em mim. Agradeço pela educação e exemplo de vida que eu tive dentro de casa. Obrigado à minha Mãe, Olli Schegoscheski, à minha querida irmã, Aline Michelly Schegoscheski e à minha pequena e sapeca sobrinha Milena Schegoscheski. Eu não poderia ter tido uma Família melhor!

À minha querida e amada Noiva, Angie Paola Lagos Carvajal, meu amor e minha melhor amiga. Obrigado por ser minha companheira de estrada e minha fonte de sorriso diário. Obrigado por ter feito a diferença na minha vida para melhor, demonstrando todo o amor, carinho, amizade, apoio e respeito, que tem sido fundamental para realização dos nossos sonhos. Aqui estamos celebrando mais uma conquista juntos, de muitas que ainda estão por vir!

À minha querida Avó, Alzira Schegoscheski; aos meus Tios Rudi e Helena Schegoscheski; aos meus primos Roberth Tcharles Schegoscheski e Karl Heinz Schegoscheski; e demais familiares, que mesmo de longe, sempre se mostraram presentes em minha vida!

Ao meu Professor Orientador, Dr. Antônio Teixeira do Amaral Júnior, por ter me acolhido de maneira muito hospitaleira no seu grupo de pesquisa. Obrigado

pela credibilidade e confiança depositada em mim; por compartilhar da sua experiência e aprendizado de alto nível, e pela prontidão em atender qualquer solicitação, seja profissional ou pessoal. Foi um grande privilégio acadêmico ter a sua orientação!

Ao meu Conselheiro, Dr. Lauro José Moreira Guimarães, por compartilhar da sua experiência e por fazer jus ao papel de conselheiro e ter me recomendado e direcionado às metodologias mais apropriadas para o desenvolvimento da minha pesquisa acadêmica!

À Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF) e ao Programa de Pós-Graduação de Genética e Melhoramento de Plantas (PGMP), juntamente com todo seu corpo docente e quadro de funcionários, pela contribuição na minha formação acadêmica, e pela oportunidade de realizar meu doutoramento em uma das instituições mais bem conceituadas do Brasil.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão de bolsa de estudos.

Ao Mestre Geraldo de Carvalho, pelo apoio na condução dos experimentos de campo; pelos ensinamentos e experiências compartilhadas; e por sempre estar disposto em ajudar!

Aos amigos e colegas de toda Equipe do Milho-Pipoca e demais laboratórios do LMGV, por todo apoio nas conduções experimentais de campo, pelos grupos de estudos e pela convivência diária e saudável, em especial ao: Guilherme Pena, Janeo Eustáquio, Pedro Diniz, Rodrigo Moreira, Marcelo Vivas, Samuel Kamphorst, Yure Pequeno, Fábio Tomaz, Valter Lima, Gabrielle Mafra, Juliana Saltires, Shahid Khan, Divino Júnior, Jhean Torres, José Arantes, Nayara Norrene, Jocarla Ambrosin, Gabriel Moreno, Valdinei Azeredo, Luzimara Pereira, Durval Felix, Amanda Guimarães, Cássio Vittorazzi, Julio Vettorazzi, Fernando Higino, Odimar Almeida, Diego Marmolejo, Thâmara Figueiredo, Maria Socorro, Katia Schmitt, Renato Santa Catarina, Derivaldo Cruz, Paulo Ricardo, Sandra Presigke, Lorraine Fonseca, Nádia Fernandes, Lígia Almeida, Luciano Vespoli, Tathianne Pastana, Carlos Misael, Natan Cavalcante e Tales Borsoi.

O meu agradecimento especial também aos amigos e companheiros, Ismael Schwantes, pela grande amizade construída ao longo destes anos dentro e fora do meio acadêmico e pelas parcerias de churrasco; Andreia Knod, pela amizade fora da UENF e pelos mates e almoços de domingo; Adriano dos Santos,

pela grande amizade desde o começo do doutorado e convivência de república; e Railan Kurosawa, pela amizade sincera e pelas deliciosas tapiocas paraenses!

À Louisiana State University (LSU), por ter proporcionado meu intercâmbio como parte do meu doutorado e pela proveitosa experiência acadêmica e profissional!

Aos Professores Stephen Harrison e Gerald Oval Myers por abrirem as portas para mim, permitindo meu intercâmbio acadêmico e por toda supervisão no exterior e todo suporte em Baton Rouge – LA.

Aos meus grandes amigos de graduação: Diego Gheller, Adriano Busnello, Bruno Marcolin, Eder Oelke, Walter Basso e Michel Bordignon, pela amizade e parceria de sempre!

A todos que de uma forma direta ou indireta contribuíram para a realização deste grande trabalho.

Muito Obrigado!

SUMÁRIO

RESUMO	viii
ABSTRACT	x
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	4
3. CAPÍTULOS	5
3.1. VARIABILIDADE DE LINHAGENS S ₇ DE MILHO-PIPOCA PARA EFICIÊNCIA AO FÓSFORO NO SOLO.....	5
3.1.1 INTRODUÇÃO.....	5
3.1.2. REVISÃO.....	7
3.1.3. MATERIAL E MÉTODOS	14
3.1.4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	19
3.1.5. CONCLUSÕES.....	31
3.2. EFEITOS GÊNICOS DA EFICIÊNCIA E RESPONSABILIDADE NO USO DO FÓSFORO EM MILHO-PIPOCA ESTIMADOS POR ANÁLISE DIALÉLICA.....	32
3.2.1. INTRODUÇÃO.....	32
3.2.2. REVISÃO.....	34
3.2.3. MATERIAL E MÉTODOS	41
3.2.4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	48

3.2.5. CONCLUSÕES.....	81
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	83

RESUMO

GERHARDT, Ismael Fernando Schegoscheski; D.Sc.; Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Fevereiro, 2018. Melhoramento do milho-pipoca: Eficiência da adaptação a solos pobres em fósforo. Orientador: Antônio Teixeira do Amaral Júnior. Conselheiros: Lauro José Moreira Guimarães e Alexandre Pio Viana.

A expansão agrícola aliada à necessidade de cultivo de forma sustentável é um dos grandes desafios para a comunidade científica que atua na geração de novas cultivares adaptadas a condições de estresses abióticos. E o conhecimento dos efeitos genéticos de características relativas à eficiência e responsividade no uso do fósforo é um dos aspectos importantes que devem ser levados em consideração na escolha adequada de método de melhoramento a ser implementado para obtenção de genótipos superiores. Este trabalho teve por objetivo caracterizar e selecionar linhagens contrastantes de milho-pipoca quanto à sua eficiência e responsividade no uso do fósforo, bem como estimar as capacidades combinatórias e seus efeitos genéticos por meio de uma análise dialéctica, como passo inicial para a implementação de programas de melhoramento de interesse à prática de agricultura sustentável. Primeiramente, foram avaliadas 25 linhagens de milho-pipoca em dois locais e dois níveis de fósforo (baixo e alto fósforo), utilizando o delineamento em blocos ao acaso com quatro repetições. Foi realizada a análise de variância conjunta e o teste de médias, bem como a classificação das linhagens quanto a eficiência e responsividade no uso do fósforo, de acordo com o desempenho produtivo nos ambientes contrastantes. Estimou-se a divergência

genética entre as linhagens pelos métodos de Tocher e UPGMA, utilizando a distância generalizada de Mahalanobis. Das 25 linhagens avaliadas, foram selecionadas oito linhagens contrastantes quanto à eficiência e responsividade no uso do fósforo para obtenção dos híbridos simples para estudo da análise dialélica, das quais três foram eficientes e responsivas, três ineficientes e não-responsivas e duas intermediárias. Posteriormente, foram avaliados os 28 híbridos dialélicos mais os parentais de milho-pipoca em dois locais com diferentes níveis de fósforo, em delineamento látice 6 x 6. As características mensuradas foram: altura de planta, altura de espiga, florescimento masculino, florescimento feminino, intervalo de florescimento masculino e feminino, comprimento de espiga, diâmetro de espiga, peso de 100 grãos, produtividade de grãos, capacidade de expansão e volume de pipoca expandida por hectare. Foi realizada a análise de variância conjunta e o teste de médias, bem como a classificação e utilização do índice de eficiência no uso do fósforo, de acordo com o desempenho produtivo dos híbridos nos ambientes contrastantes. Pelo modelo 2 do Método de análise dialélica de Griffing, foram estimadas as capacidades geral (CGC) e específica de combinação (CEC), bem como suas interações com os ambientes. A melhor estratégia para obtenção de genótipos eficientes e responsivos no uso do fósforo consiste na exploração de híbridos de milho-pipoca, com o uso de genitores que proporcionem um acúmulo de genes aditivos para a capacidade de expansão. Os híbridos P7 x L80, P7 x L59, P7 x L76 e P6 x L80 apresentaram-se como promissores, podendo ser avaliados como opções de cultivo em solos que apresentam deficiência para o fósforo.

ABSTRACT

GERHARDT, Ismael Fernando Schegoscheski; D.Sc.; State University of Northern Rio de Janeiro. February, 2018. Popcorn breeding: Efficiency of adaptation to phosphorus-poor soils. Advisor: Antônio Teixeira do Amaral Júnior. Committee Members: Lauro José Moreira Guimarães and Alexandre Pio Viana.

The expansion of agriculture, coupled with the need for sustainable cropping, is one of the greatest challenges to the scientific community working on the generation of new cultivars adapted to abiotic stress conditions. Knowledge regarding the genetic effects of the characteristics related to phosphorus use efficiency and responsiveness is one of the most important aspects that must be taken into account when choosing a breeding method to obtain superior genotypes. This study aimed to compare contrasting popcorn lines and use selection to increase phosphorus use efficiency and responsiveness, as well as to estimate the combining ability and genetic effects through a diallel analysis, as a first step towards the implementation of a breeding program focused on the practice of sustainable agriculture. Twenty-five popcorn lines were evaluated at two locations, each using two (high and low) different phosphorus levels in the soil, using a randomized block design. A combined analysis of variance and test of means were performed, and the lines were classified as to their phosphorus use efficiency, according to their production performance in the different environments. The genetic diversity between the lines was estimated by Tocher's and UPGMA clustering methods, using generalized Mahalanobis distance. From twenty-five lines evaluated, eight contrasting lines were selected to

obtain the hybrids for diallel analysis study, which three were efficient and responsive for phosphorus, three were inefficient and non-responsive for phosphorus and two were intermediates. Subsequently, twenty-eight hybrids plus the parents were again evaluated at two locations with two different phosphorus levels in the soil, in a 6 x 6 lattice design. The following traits were measured: plant height, ear height, female flowering date, male flowering date, male female flowering interval, ear diameter, ear length, 100-grain weight, grain yield, popping expansion, and expanded popcorn volume per hectare. A combined analysis of variance and test of means were performed, as well as the classification and index phosphorus use efficiency application, according to hybrid yield performance in contrasting environments. Using model 2 of the Griffing, general (GCA) and specific combining ability (SCA), and the interactions were estimated. The best strategy to obtain responsive and efficient genotypes for phosphorus is the exploitation of popcorn hybrids, using parents that provide an accumulation of additive genetic effects for popping expansion. The hybrids P7 x L80, P7 x L59, P7 x L76 and P6 x L80 presented as promising and could be evaluated as crop options in phosphorus-poor soils.

1. INTRODUÇÃO

Há previsões de que a população mundial chegue a 9,6 bilhões até o ano de 2050, impondo às lideranças globais o desafio de aumentar em até 60 % a produção agrícola de maneira sustentável para suprir a demanda por alimentos (FAO, 2015). Novas concepções de pesquisas científicas na área agrícola vêm se tornando necessárias, principalmente no aumento da produção de alimentos para a sustentabilidade do sistema produtivo, de forma a permitir benefícios à humanidade, sem agredir o meio ambiente. O Melhoramento Genético, enquanto Ciência inovadora não deve estar alijada deste propósito, entretanto, deve-se considerar que, dentre os estresses abióticos que mais limitam a produção de grãos em ambientes tropicais está à deficiência de fósforo nos solos.

O fósforo (P) tem grande importância para a maioria das espécies cultivadas, pois participa de funções vitais no metabolismo das plantas. Além disso, é o segundo nutriente mais consumido na agricultura, superado apenas pelo nitrogênio (N) (Batten, 1992). Segundo Murrel e Fixen (2006), as reservas não-renováveis de fosfato no mundo, que poderiam ser exploradas comercialmente em valores de 40 dólares por tonelada, deverão se esgotar na segunda metade deste século. Isso implicaria na necessidade da concepção de pesquisa para o desenvolvimento de cultivares capazes de utilizar de maneira mais eficiente o fósforo aplicado, bem como de gerar cultivares adaptadas a ambientes com baixos níveis do nutriente no solo, principalmente nas regiões tropicais, onde há problemas

de acidez, baixos níveis de fertilidade e alta capacidade de adsorção de fósforo (March et al., 2016; Rowe et al., 2016).

Para compor os fundamentos de um programa de seleção de genótipos eficientes no uso do fósforo, alguns aspectos importantes devem ser levados em consideração. Primeiramente, deve-se ter conhecimento do grau de variabilidade genética quanto à eficiência e responsividade dentro de um banco de germoplasma. A base genética da eficiência no uso de fósforo em plantas pode ter variação entre e dentro das espécies, pois diferentes estratégias ou mecanismos relacionados à eficiência ao baixo fósforo podem ter diferentes tipos de controle gênico (Duncan, 1994). Outro aspecto importante é o conhecimento do tipo de herança das características relacionadas à eficiência no uso do fósforo. O conhecimento do tipo de ação gênica predominante para tais características auxilia na escolha de estratégias de melhoramento mais adequadas (Parentoni et al., 2011). Para a estimação de componentes de variância que proporcionam conhecimento sobre tipo de ação gênica, há variados procedimentos biométricos, sendo que a análise dialélica tem sido recomendada como uma opção exequível (Cruz et al., 2012).

Alguns estudos têm sido realizados sobre seleção de genótipos de milho para eficiência no uso de fósforo (Machado et al., 2001; Fernandes e Muraoka, 2002; Fidélis et al., 2008; Fritsche Netto et al., 2010). No entanto, diversas dessas pesquisas, as cultivares desenvolvidas pelos programas de melhoramento, em sua maioria, são obtidas por seleção para altas produtividades em ambientes favoráveis, requerendo altas dosagens de adubos, sendo que geralmente utilizam o fósforo de forma ineficiente (Parentoni e Souza Junior, 2008).

O milho-pipoca (*Zea mays* L. *everta*) é um alimento muito apreciado no mundo todo para momentos de lazer e descontração e, também, pelo seu valor nutricional. A pipoca é um alimento com baixa quantidade de calorias e reúne certos antioxidantes que agem contra os radicais livres causadores do envelhecimento precoce e do câncer, além de fortalecer o sistema imunológico. Ademais, a pipoca contém ácido fólico, uma importante vitamina para as mulheres em idade fértil e que ajuda a proteger o coração (Ijarotimi e Keshinro, 2011).

No que concerne aos parcos trabalhos correlatos mundialmente disponíveis, Mundim et al. (2013) realizaram um estudo de avaliação precoce em linhagens de milho-pipoca para eficiência no uso do fósforo em condições de casa

de vegetação, porém não foram encontradas pesquisas inerentes à nutrição mineral em milho-pipoca e à seleção de linhagens para maior eficiência no uso de fósforo em condições de campo.

Isso torna ainda mais oportuno o desenvolvimento de pesquisas que contribuam com a geração de cultivares de milho-pipoca mais adaptadas às condições limitantes e/ou para sistemas de cultivo com baixa aplicação de insumos, aumentando a sustentabilidade agrícola. Dentre essas vertentes de pesquisas, o Programa de Melhoramento de Milho-pipoca vinculado ao Laboratório de Melhoramento Genético Vegetal da UENF tem atuado em colaboração com a EMBRAPA-Milho e Sorgo no intento de compreender os mecanismos genético-biométricos envolvidos na expressão da eficiência do fósforo em milho-pipoca, visando à seleção de cultivares eficientes no uso do nutriente.

2. OBJETIVOS

As pesquisas relacionadas à tolerância a estresses abióticos em milho-pipoca ainda são severamente restritas, por isso um dos objetivos do programa de melhoramento de milho-pipoca da UENF, para os próximos anos, é melhorar o aproveitamento do fósforo de cultivares por meio do desenvolvimento de genótipos mais eficientes no uso do mesmo. E os objetivos específicos deste trabalho foram:

- 1) Identificar linhagens de milho-pipoca contrastantes quanto à eficiência no uso do fósforo;
- 2) Estimar a divergência genética entre 25 linhagens endogâmicas (S_7) de milho-pipoca por meio da avaliação de características morfoagronômicas;
- 3) Determinar os padrões de herança da eficiência e responsividade no uso do fósforo quanto às capacidades gerais e específicas de combinação; e
- 4) Identificar a estratégia de melhoramento mais efetiva para a obtenção de progênies de milho-pipoca superiores quanto à eficiência no uso do fósforo.

3. CAPÍTULOS

3.1. VARIABILIDADE DE LINHAGENS S₇ DE MILHO-PIPOCA PARA EFICIÊNCIA AO FÓSFORO NO SOLO

3.1.1 INTRODUÇÃO

Na busca por maiores produtividades, a agricultura atual tornou-se altamente dependente de fertilizantes químicos (Cordell et al., 2009). No Brasil, isso se torna ainda mais impactante, pois a maioria dos solos apresentam baixa disponibilidade de nutrientes, alta acidez e alta capacidade de adsorção de fósforo (Cock et al., 2002; Barros Filho e Comerford, 2005; Fageria et al., 2011). O fósforo é um dos nutrientes de maior importância agrícola para a maioria das espécies cultivadas, desempenhando importantes funções no metabolismo das plantas, na transferência de energia na célula, na respiração e, mesmo, na fotossíntese (Baligar et al., 2001). É, também, componente estrutural dos ácidos nucleicos de genes e cromossomos, assim como de muitas coenzimas, fosfoproteínas e fosfolipídeos (Fukuda et al., 2007).

Existem várias razões básicas para o investimento em pesquisa pela busca de cultivares mais eficientes e responsivas no uso do fósforo. Uma delas se justifica pelo fato dos fertilizantes químicos serem componentes de produção de elevado

custo para a agricultura (Tenkorang e Lowenberg-Deboer, 2009; Savary et al., 2014). A obtenção de cultivares eficientes no uso do fósforo - EUP – pode diminuir os custos de produção, com redução do uso dos fertilizantes que, também, causam impactos ambientais deletérios, como a contaminação de mananciais hídricos (Parentoni et al., 2011). E, por último, o fósforo é o segundo elemento mais utilizado na agricultura e as fontes de fosfato são recursos naturais não-renováveis, cujas reservas tendem a se esgotar nos próximos 50 anos (Cordell et al., 2009).

O conhecimento da variabilidade genética quanto à eficiência e responsividade de genótipos ao fósforo, é um passo fundamental para o estudo da herança e implementação de programa de melhoramento apropriado para a obtenção de genótipos superiores (Cock et al., 2002; Colins et al., 2008). Existem diversas pesquisas referentes à variabilidade dentro e entre espécies para as características que estão relacionadas à eficiência no uso do fósforo e o seu controle genético (Whiteaker et al., 1976; Brasil et al., 2007; Boutraa, 2009; Zhang et al., 2009; Marcante et al., 2016; Missaoui e Young, 2016). Essas variações genotípicas permitem melhor entendimento da adaptação de genótipos às diversas condições de estresse ambiental e constituem a base genética para a implementação de programas de melhoramento.

Para tanto, o uso de técnicas de análises multivariadas constituem opção exequível para os estudos de variabilidade e caracterização de genótipos submetidos a diferentes condições ambientais, pois permitem ao melhorista prever as melhores combinações em relação às características de importância econômica (Hallauer et al., 2010; Cruz et al., 2012). Pesquisas relacionadas à divergência genética quanto à eficiência no uso do fósforo em diversas culturas, utilizando técnicas multivariadas, têm sido realizadas, com obtenção de resultados bastante promissores (Cock et al., 2002; Mundim et al., 2013; Reina et al., 2014; Santos et al., 2017); porém, não há trabalhos na literatura correlatos com a nutrição mineral relacionada à cultura do milho-pipoca em condições de campo.

Diante do atual cenário agrícola, o desenvolvimento e o uso de cultivares mais adaptadas a solos pobres em fósforo traz uma perspectiva interessante para aumentar a eficiência no uso de adubos fosfatados e da sustentabilidade do sistema produtivo.

Esse trabalho teve por objetivo identificar linhagens de milho-pipoca eficientes e ineficientes no uso do fósforo, bem como estimar a divergência genética

sob cultivos em ambientes contrastantes quanto à disponibilidade deste nutriente, como passo inicial para avaliação da capacidade combinatória e obtenção de genótipos superiores.

3.1.2. REVISÃO

Aspectos gerais da cultura do milho-pipoca

O milho-pipoca (*Zea mays* L. *everta*) pertence à família das *Poaceae*, sub-família *Panicoideae*, tribo *Maydeae* ($2n=20$), se diferencia dos demais tipos de milho em razão da capacidade de expansão apresentada pelos grãos quando submetidos ao calor. Comparado ao milho comum, o milho-pipoca geralmente apresenta grãos menores, maior prolificidade, menor vigor, e maior suscetibilidade ao ataque de pragas e doenças (Zinsly e Machado, 1987). O seu sistema radicular é fasciculado e superficial, conferindo pouca tolerância à seca (Goodman e Smith, 1987). De modo geral, as plantas de milho-pipoca apresentam maior suscetibilidade ao acamamento, quebramento dos colmos e à podridão de grãos, sendo necessária uma atenção especial no período da colheita e secagem dos grãos, para evitar danos no pericarpo e no endosperma (Sawazaki, 2001).

Os grãos apresentam alta variabilidade quanto à cor, formato, e tamanho (Sawazaki, 2001). Os tipos pérolas, redondos e de cor alaranjadas são os que possuem maior aceitação de mercado (Ziegler e Ashman, 1994; Sawazaki, 2001). O sistema radicular possui raízes primárias e adventícias. O caule tem formato cilíndrico, tipo colmo, possuindo nós e entrenós mais curtos na base. Suas folhas são lanceoladas, possuem limbo e bainha e são do tipo alternadas. São plantas monoicas, sendo que a inflorescência masculina, o pendão, é constituído de um eixo central com ramificações e espiguetas, podendo produzir de dois a cinco milhões de grãos de pólen; e a inflorescência feminina quando bem desenvolvida, pode apresentar de 700 a 1.000 estilo-estigmas (Moll et al., 1965; Geraldi et al., 1985; Paterniani e Campos, 2005). Sobre a sua arquitetura e fisiologia, o milho-pipoca é mais prolífico, superprecoce na maturação e na secagem dos grãos, além de produzir perfilhos com maior frequência (Fantin et al., 1991).

Com relação à origem geográfica do milho, os que consideram o teosinto como o seu mais próximo ancestral ou como um dos ancestrais, creditam a origem da espécie ao México e à América Central, onde o teosinto cresce, sendo considerados o centro geográfico de origem (Mangelsdorf, 1974). Goodman (1987) tem um posicionamento semelhante, afirmando que o provável centro de origem do milho seja o México ou a Guatemala.

Segundo Galinat (1977), dentre as hipóteses levantadas até então sobre a origem do milho, somente três eram admissíveis. A primeira hipótese é a de que o teosinto atual é o ancestral do milho. A segunda hipótese é a de que um teosinto silvestre primitivo seria o antepassado comum tanto do milho quanto do teosinto atual. E a terceira hipótese diz que uma forma extinta de milho tunicado foi o ancestral do milho moderno, sendo que o teosinto surgiu como uma mutação deste milho tunicado.

O exemplar de milho mais primitivo descoberto foi descrito por Mangelsdorf e Smith Jr. (1949), sendo do tipo pipoca, e estimado que seja do ano de 2.500 a.C., achado no sítio arqueológico de Bat Cave, Novo México.

Erwin (1949), afirma que o milho-pipoca teve origem recente através de uma mutação do milho "Flint". Porém, essa hipótese é pouco aceitável pelo fato da capacidade de expansão ser uma característica governada por vários genes.

A principal característica que difere o milho-pipoca dos demais tipos de milho é capacidade de expansão (Kantety et al., 1995; Larish e Brewbaker, 1999; Sawazaki, 2001), que equivale à razão entre o volume de pipoca expandida e o volume ou peso inicial dos grãos submetidos ao pipocamento (Lira, 1983; Guadagnin, 1996). O milho-pipoca é capaz de estourar em consequência do conteúdo de óleo e umidade no grão. O pericarpo, quando submetido a uma determinada temperatura (177^o C), se rompe e expõe o endosperma (Machado, 1980; Zinsly e Machado, 1987). A comercialização dos grãos é feita por peso e uma proporção do produto final é vendida pelo volume expandido (pipoca), por isso a capacidade de expansão é um dos fatores de maior importância na cultura do milho-pipoca, quando se diz respeito à qualidade, sendo o valor mínimo de 30 mL.g⁻¹ para lançamento de nova cultivar (Matta e Viana, 2001; Sawazaki, 2001).

Programa de melhoramento genético de milho-pipoca da UENF

O melhoramento do milho-pipoca na Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF) teve início no ano de 1993, quando o então Professor Joachim Friedrich Wilhelm von Bülow do Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias (CCTA) recebeu uma amostra de uma população selecionada de um Composto Indígena doado à Universidade de Brasília, denominada de UNB-1. Essa população foi cruzada com a variedade “Americana”, e a geração filial foi selecionada e cruzada com outra variedade com características de resistência à helmintosporiose (*Exserohilum turcicum*). A partir daí, foi realizado dois ciclos de seleção massal, e em seguida três retrocruzamentos com a população “Americana”, originando-se a população UNB-2U.

Com o objetivo de definir estratégias de melhoramento para maximizar ganhos genéticos nessa população, Pereira e Amaral (2001), avaliaram 92 famílias de irmãos-completos em dois ambientes, e estimaram os componentes genéticos dessa população-base por meio do Delineamento I, de Comstock e Robinson (1948). Os autores chegaram à conclusão de que nessa população havia variabilidade genética satisfatória para produtividade e capacidade de expansão a ser explorada em programas de melhoramento, e que tanto para produtividade quanto para capacidade de expansão, os maiores ganhos seriam possíveis com a seleção recorrente entre famílias de irmãos-completos. Tais resultados indicaram a perspectiva de sucesso no melhoramento intrapopulacional para capacidade de expansão em milho-pipoca, antevendo-se ganhos genéticos satisfatórios para o Norte Fluminense.

O primeiro ciclo de seleção recorrente na população UNB-2U foi realizado por Daros et al. (2002), que predizeram ganhos genéticos de 10,39 % para capacidade de expansão e 4,69 % para produtividade. O segundo ciclo da seleção recorrente também foi realizado pelos mesmos autores, os quais estimaram ganhos preditos de 17,8 % para capacidade de expansão e de 26,95% para produtividade (Daros et al., 2004a). Já o terceiro ciclo de seleção recorrente foi realizado por meio de famílias de meios-irmãos, em que foram estimados ganhos genéticos preditos de 7,16 % para capacidade de expansão e 10,00 % para produtividade (Santos et al., 2007). O quarto ciclo de seleção recorrente foi implementado com a utilização de estrutura de famílias de irmãos-completos e, naquele momento, Freitas Júnior et al. (2009) obtiveram ganhos preditos de 8,50 % para capacidade de expansão e

10,55 % para produtividade. O quinto ciclo de seleção recorrente foi realizado por Rangel et al. (2011), que obtiveram ganhos genéticos preditos de 6,01 % para capacidade de expansão e 8,53 % para produtividade. No sexto ciclo de seleção recorrente, implementado por Ribeiro et al. (2012) foram obtidos ganhos de 15,30 % para rendimento de grãos e 10,97% para capacidade de expansão. Naquele momento, a população atingiu nível satisfatório de melhoramento com estimativas de 31,13 mL.g⁻¹ para capacidade de expansão e de 2.987,84 kg.ha⁻¹ para produtividade de grãos, o que permitiu o lançamento da primeira cultivar do programa de melhoramento de milho-pipoca da UENF, denominada UENF-14, nome atribuído aos 14 anos de ciclos seleção recorrente intrapopulacional (Amaral Junior et al., 2013).

No sétimo ciclo, Freitas et al. (2014) obtiveram estimativas médias de ganhos preditos para o ciclo C7 de 3.503,20 kg.ha⁻¹ para RG e de 35,73 mL.g⁻¹ para CE, sendo os ganhos percentuais de 7,78 % e 5,11 %, respectivamente.

O oitavo ciclo de seleção recorrente, obtido por Guimarães et al. (2018) com famílias de irmãos-completos, proporcionou ganhos genéticos estimados de 4,60 % para produtividade de grãos e de 3,61 % para capacidade de expansão.

Em sequência, o nono ciclo, implementado por Guimarães et al. (2018), com a obtenção de 200 famílias S₁ do ciclo C8, projetou ganhos de 20,73 % para volume de pipoca expandida por hectare, que se refere ao produto da capacidade de expansão pelo rendimento de grãos (Amaral Júnior et al., 2016).

Atualmente, o programa de melhoramento de milho-pipoca da UENF é consolidado e tem sido alicerce de diversas pesquisas. O programa tem aberto outras linhas de investigação e interagido com outras áreas de pesquisa, como a fitopatologia, no intuito de obtenção de cultivares resistentes às principais doenças; nutrição mineral, para implementar a proposta que vise a investigar a herança da eficiência no uso do nitrogênio e do fósforo; fisiologia vegetal, que propõe o estudo de investigação do tipo de controle genético para eficiência no uso da água; e recentemente foi proposta nova linha de pesquisa relacionada com a análise genômica junto com um grupo de pesquisadores do Laboratório de Biotecnologia do Centro de Biociências e Biotecnologia da UENF, visando maximizar a eficiência do melhoramento genético, baseada exclusivamente em marcadores moleculares, após a estimação dos efeitos genéticos a partir de dados fenotípicos em uma amostra da população de seleção.

Perspectivas do melhoramento para eficiência no uso do fósforo

Segundo o relatório da FAO (2015), a expectativa de crescimento populacional até o ano de 2050 é de aproximadamente 34 %, com a população chegando aos 9,6 bilhões de pessoas. Isso resultaria na necessidade de aumento de cerca de 60 % da produção mundial de alimentos para atender esta demanda populacional. Diante desse cenário, aumentos em produtividades serão necessários no setor agrícola, além de aumento da expansão agrícola, principalmente em áreas do Continente Americano e Africano, onde se estima que há cerca de 120 milhões de hectares que deverão ser integrados aos sistemas produtivos. Os solos nessas regiões desses países tropicais, geralmente são altamente intemperizados, possuem de média à alta acidez, apresentam níveis tóxicos de alumínio e baixa fertilidade, principalmente de fósforo (Parentoni et al., 2011).

Norman Ernest Borlaug, o responsável pela “Revolução Verde” e ganhador do prêmio Nobel da Paz de 1970, afirmou que o melhoramento genético convencional junto com a biotecnologia terão papéis importantes para atender a demanda na produção mundial de alimentos, principalmente para superação de estresses abióticos. Além disso, melhorias nas práticas agrícolas como calagem, adubação, irrigação, manejo de pragas e doenças, controle de plantas daninhas, plantio direto, rotação de culturas, dentre outros, também serão determinantes para aumentos na produção agrícola (Borlaug, 2000).

O fósforo (P) é um dos macronutrientes primários essenciais no desenvolvimento e crescimento das plantas, pois participa nos processos de produção de energia e ativação enzimática, além de ser um elemento estrutural dos ácidos nucleicos e fosfolipídeos. A deficiência de fósforo pode causar alterações na morfologia, na fisiologia e no transporte e utilização interna de outros nutrientes na planta, resultando em perda no potencial produtivo. O suprimento de fósforo na agricultura é realizado por meio de adubos químicos, cujas doses exigidas normalmente são altas. Pesquisas sobre eficiência média de uso de fósforo pelas plantas têm revelado que os valores são inferiores a 10 %, e isto está relacionada à alta capacidade de adsorção do fósforo aplicado ao solo, tornando-o indisponível às plantas, bem como aos mecanismos de aquisição e eficiência de utilização interna do nutriente pelas plantas (Baligar et al., 2001).

Diante deste cenário, fica evidente a necessidade da obtenção de cultivares mais eficientes no uso do fósforo, pois os fertilizantes químicos constituem um dos componentes de produção de maior custo na agricultura. Além disso, o uso indiscriminado desses fertilizantes causa impactos ambientais, como contaminação de lençóis freáticos. E por último, os fosfatos são recursos naturais não-renováveis, cujas reservas tendem a se esgotar ainda neste século (Murrel e Fixen, 2006).

Em programas de melhoramento, para qualquer característica, é necessário que haja variabilidade genética para a prática de seleção, possibilitando a identificação de indivíduos com maiores frequências de alelos favoráveis. No contexto de eficiência no uso de P, que é uma característica quantitativa, deve-se lançar mão de técnicas multivariadas para a caracterização de genitores e o levantamento da divergência genética no germoplasma disponível, capacidade combinatória e outras informações que possibilitem a obtenção de cultivares superiores.

Divergência genética por análise de agrupamento

A divergência genética é definida como a distância genética entre populações, indivíduos ou organismos, baseadas na avaliação de características morfo-agronômicas, fisiológicas, polimorfismos de DNA, dentre outras, de acordo com o interesse do pesquisador (Cruz et al., 2014). O estudo de divergência genética pode ter várias aplicabilidades dentro do melhoramento de plantas, tais como estudos evolutivos, monitoramento de combinações híbridas de maior efeito heterótico, avaliação da amplitude genética, e até mesmo pela importância do conhecimento da variabilidade genética, devido à preocupação atual com erosão genética, proporcionando um melhor monitoramento de bancos de germoplasma (Cruz et al., 2012).

O que causa a divergência genética de um indivíduo em relação a outro é a diferença nas frequências alélicas (Falconer, 1987), e pode ser quantificada por meio de técnicas biométricas, baseadas na quantificação da heterose ou por processos preditivos. Dentre os métodos que se destinam à avaliação da distância entre genitores, podem ser citadas as análises dialélicas, que avaliam a capacidade específica de combinação, bem como o grau de heterose manifestada nos híbridos. Do rol de processos preditivos, citam-se os métodos multivariados, que são geralmente quantificados por uma medida de dissimilaridade (Distância Euclidiana

ou de Mahalanobis). Dentre os métodos multivariados, citam-se a análise por componentes principais, por variáveis canônicas e os métodos aglomerativos. O método escolhido dependerá da precisão desejada do pesquisador bem como da facilidade de análise e da forma como os dados foram obtidos. Os métodos aglomerativos diferem dos demais por dependerem das medidas de dissimilaridade, ao passo que o método dos componentes principais e das variáveis canônicas a similaridade dos progenitores é avaliada por meio de uma dispersão gráfica, considerando dois eixos cartesianos (Cruz et al., 2012).

A finalidade da análise de agrupamento é reunir os genitores similares por algum critério de classificação em vários grupos, de tal forma que dentro de um mesmo grupo exista maior homogeneidade entre os indivíduos e entre os grupos exista heterogeneidade. O processo de agrupamento basicamente envolve duas etapas: a estimação de uma medida de dissimilaridade entre os progenitores e o emprego de uma técnica de agrupamento para formação dos grupos. Os métodos hierárquicos e os de otimização são os mais comumente utilizados no melhoramento de plantas (Cruz et al., 2012).

Nos métodos hierárquicos, os genitores são agrupados por um processo que se repete em vários níveis até estabelecer um dendrograma. O ponto de corte nos dendrogramas e a definição do número de grupos tem fundamento estatístico, baseado no tamanho relativo dos níveis de fusões, ou seja, nos pontos de alta mudança de nível no dendrograma. São exemplos: o método do vizinho mais próximo, do vizinho mais distante, o da ligação média e o proposto por Ward (1963); ao passo que os métodos divisivos o mais conhecido é o de Edwards e Cavalli-Sforza (1965) (Cruz et al., 2012).

Por último, os métodos de agrupamento por otimização são realizadas pela partição do conjunto de progenitores em subgrupos não vazios e mutuamente exclusivos por meio da maximização ou minimização de alguma medida pré-estabelecida. O método de Tocher (Rao, 1952) é o mais comumente empregado no melhoramento de plantas. O critério do método de Tocher parte da premissa de que a média das medidas de dissimilaridade dentro de cada grupo deve ser menor que as distâncias médias entre quaisquer grupos. Primeiramente é identificado o par de progenitores mais similar pela matriz de dissimilaridade, e esse par formará o primeiro grupo; a partir daí é avaliada a possibilidade de inclusão de novos genitores, dentro do critério citado anteriormente (Cruz et al., 2012).

3.1.3. MATERIAL E MÉTODOS

Condições experimentais e germoplasma utilizado

Os experimentos foram conduzidos no verão 2014/2015, em dois locais e em dois ambientes contrastantes quanto à disponibilidade de fósforo, a saber: Colégio Agrícola Estadual Antônio Sarlo, localizado no município de Campos dos Goytacazes – RJ (Latitude 21° 42' 48" S, Longitude 41° 20' 38" O), com altitude de 14 m; e Estação Experimental do município de Itaocara – RJ (Latitude 21° 38' 50" S, Longitude 42° 03' 46" O), com altitude de 58 m. O clima que caracteriza os municípios de Campos dos Goytacazes e Itaocara é classificado como Tropical (Aw), apresentando verões quentes e invernos amenos, com tendência de concentração de chuvas nos meses de verão.

Antes da implantação dos experimentos, foi realizada a análise química dos solos para caracterização dos ambientes de alta e baixa disponibilidade de fósforo, a partir de amostras coletadas nas camadas de 0-10 e de 10-20 cm, intercaladas em linhas e entrelinhas, formando uma amostra composta a partir de 10 sub-amostras, conforme Tabela 1, sendo que os níveis de disponibilidade de fósforo de acordo com os teores de argila dos solos de Campos dos Goytacazes e de Itaocara foram classificados como baixos.

Tabela 1. Análise química e granulométrica do solo nos locais de Campos dos Goytacazes e Itaocara, RJ.

Local	pH	P	K	Ca	Mg	Al	Na	C	MO	CTC	SB	V	Argila
	H ₂ O	mg/dm ³		mmol c/dm ³				g/dm ³		mmol c/dm ³		%	g/dm ³
Campos	6,1	8,0	3,7	16,6	11,7	0,0	1,5	11,8	20,3	57,2	36,2	63,0	305,0
Itaocara	5,9	11,0	4,0	22,1	20,2	0,0	1,6	11,5	19,8	79,7	61,0	77,0	140,0

Foram utilizados como tratamentos 25 linhagens S₇ de milho-pipoca provenientes do Banco Ativo de Germoplasma da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF). Dessas linhagens, três provieram da população 'Beija-Flor'; sete, da população 'BRS-Angela'; cinco, da população 'Viçosa'; uma, do híbrido comercial 'Zélia'; duas, do Composto 'CMS-42'; uma, de Raças Sul-

Americanas; três, do híbrido comercial 'Zaeli'; e três, do híbrido comercial 'IAC-112', descritas na Tabela 2.

O delineamento experimental utilizado foi blocos ao acaso com quatro repetições. A semeadura foi realizada no sistema de plantio convencional. Cada parcela experimental constituiu-se por uma linha de cinco metros, espaçadas a 0,20 m entre plantas e 0,90 m entre linhas, totalizando 25 plantas por parcela.

Tabela 2. Linhagens S₇ de milho-pipoca com as suas respectivas genealogias e adaptações climáticas.

Linhagem	População de origem	Adaptação climática
L53	Beija-flor: UFV	Temperado/ Tropical
L54	Beija-flor: UFV	Temperado/ Tropical
L59	Beija-flor: UFV	Temperado/ Tropical
L61	BRS Angela: EMBRAPA	Tropical
L63	BRS Angela: EMBRAPA	Tropical
L65	BRS Angela: EMBRAPA	Tropical
L66	BRS Angela: EMBRAPA	Tropical
L69	BRS Angela: EMBRAPA	Tropical
L70	BRS Angela: EMBRAPA	Tropical
L71	BRS Angela: EMBRAPA	Tropical
L75	Viçosa: UFV	Temperado/ Tropical
L76	Viçosa: UFV	Temperado/ Tropical
L77	Viçosa: UFV	Temperado/ Tropical
L80	Viçosa: UFV	Temperado/ Tropical
L88	Viçosa: UFV	Temperado/ Tropical
P1	Híbrido Zélia	Temperado/ Tropical
P2	Composto CMS-42: EMBRAPA	Temperado/ Tropical
P3	Composto CMS-42: EMBRAPA	Temperado/ Tropical
P4	Raças Sul-Americanas	Temperado/ Tropical
P5	Híbrido Zaeli	Temperado/ Tropical
P6	Híbrido Zaeli	Temperado/ Tropical
P7	Híbrido Zaeli	Temperado/ Tropical
P8	Híbrido IAC-112	Temperado/ Tropical
P9	Híbrido IAC-112	Temperado/ Tropical
P10	Híbrido IAC-112	Temperado/ Tropical

Caracterização dos ambientes avaliados em relação à disponibilidade de fósforo

A adubação de plantio para o ambiente de alta disponibilidade de fósforo constituiu-se de 30 kg ha⁻¹ de N, 70 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 40 kg ha⁻¹ de K₂O. Para o

ambiente sob baixa disponibilidade de fósforo, a adubação de plantio constituiu-se de 30 kg ha⁻¹ de N, 0 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 40 kg ha⁻¹ de K₂O. A adubação de cobertura foi realizada nos dois ambientes, quando as plantas atingiram o estágio fenológico V6, na dosagem de 100 kg ha⁻¹ de N.

A capacidade de suprimento dos macronutrientes primários nas áreas experimentais foi obtida conforme a recomendação de adubação para a cultura do milho-pipoca, considerando a quantidade de nutrientes no solo na camada de 0 a 20 cm, fornecida pela análise química, com exceção ao fósforo no ambiente de baixo P, que foi zero.

Os demais tratamentos culturais foram realizados de acordo com a recomendação para a cultura na região. Os experimentos receberam irrigação suplementar sempre que necessário para evitar a ocorrência de estresse hídrico.

Fenotipagem

Foram avaliadas as seguintes características: i) altura de planta (AP) – expressa em cm, quantificada com o auxílio de uma régua graduada do solo até a inserção da folha bandeira; ii) altura de inserção de espiga (AE) – expressa em cm, quantificada com o auxílio de uma régua graduada do solo até a inserção da primeira espiga; iii) florescimento masculino (FM), expresso pelo número de dias no momento em que 50 % das plantas da unidade experimental começaram a abrir as anteras do pendão; iv) florescimento feminino (FF), expresso pelo número de dias no momento em que 50 % das plantas da unidade experimental começaram a soltar os estilo-estigmas da espiga; v) intervalo de florescimento (IF) – determinado pela diferença entre o número de dias do florescimento masculino e feminino; vi) tamanho de espiga (TE) – estimado pela média do comprimento de 5 espigas despalhadas, expresso em cm; vii) diâmetro da espiga (DE) – quantificado pela média do diâmetro de 5 espigas despalhadas, expresso em mm; viii) peso de 100 grãos (P100) – obtido pela média do peso de duas amostras aleatórias de 100 grãos; ix) produtividade (PROD) – expressa pela média da produção de grãos da unidade experimental em gramas por parcela, corrigida para 13 % de umidade, e extrapolada para kg ha⁻¹; x) capacidade de expansão (CE) – obtida pela relação entre o volume de pipoca expandida e a massa de 30 g, expressa em mL g⁻¹, utilizando-se a média de duas amostras por parcela; e xi) volume de pipoca

expandida por hectare (VP) – obtido pelo produto entre produtividade e capacidade de expansão, e o valor obtido foi dividido por 1000, expresso em $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$.

Classificação das linhagens quanto à EUP

As avaliações das linhagens quanto à eficiência e responsividade ao fósforo (EUP) foram realizadas a partir dos desvios das médias de produtividade de grãos de cada linhagem em relação à média de produtividade de grãos de cada ambiente. Esses valores foram plotados em gráfico de dispersão, sendo que o eixo das abcissas representou os desvios em alto nível fósforo (responsividade no uso do fósforo), e o eixo das ordenadas os desvios em baixo nível de fósforo (eficiência no uso do fósforo).

A expressão utilizada para classificação das linhagens quanto à eficiência no uso do fósforo foi:

$$E_{\text{uso}} = Y_{\text{IL}} - Y_{\text{EL}} ,$$

Em que:

Y_{IL} = produtividade média de grãos da linhagem 'i' no ambiente de baixa disponibilidade de fósforo; e

Y_{EL} = produtividade média de grãos do ambiente de baixa disponibilidade de fósforo.

Para a classificação das linhagens quanto à responsividade no uso do fósforo, considerou-se:

$$R_{\text{uso}} = Y_{\text{IH}} - Y_{\text{EH}} ,$$

Em que:

Y_{IH} = produtividade média de grãos da linhagem 'i' no ambiente com alta disponibilidade de fósforo; e

Y_{EH} = produtividade média de grãos no ambiente com alta disponibilidade de fósforo.

Assim, as linhagens foram distribuídas em quatro quadrantes no gráfico de dispersão, dependendo do desempenho produtivo nos ambientes contrastantes quanto à disponibilidade de fósforo: eficientes e não-responsivas (ENR); eficientes

e responsivas (ER); ineficientes e responsivas (IR); ineficientes e não-responsivas (INR).

Estatística aplicada

Realizou-se análise de variância individual para os ambientes com alto e baixo fósforo, a análise conjunta dos dois ambientes, bem como o teste de agrupamento de médias de Scott e Knott (1974) a 5 % de probabilidade para as características PROD, CE e VP. As análises foram realizadas utilizando os recursos computacionais do Programa Genes (Cruz, 2013).

As análises de variância foram realizadas de acordo com o seguinte modelo estatístico:

$$Y_{ij} = \mu + g_i + b_j + \varepsilon_{ij},$$

Em que:

Y_{ij} : valor observado do i-ésimo genótipo no j-ésimo bloco;

μ : constante geral;

g_i : efeito fixo atribuído ao i-ésimo genótipo;

b_j : efeito do bloco j; e

ε_{ij} : erro aleatório associado à observação Y_{ij} , NID (0, σ^2).

Também foi realizada a análise de variância conjunta para os genótipos e ambientes, sendo os ambientes formados pela combinação de locais e cada nível de fósforo (baixo e alto), tendo como principal objetivo determinar possíveis interações de genótipos com ambientes, de acordo com o seguinte modelo estatístico:

$$Y_{ijk} = \mu + (B/P)/L_{jk} + G_i + L_j + P_k + GL_{ij} + GP_{ik} + LP_{jk} + GLP_{ijk} + \varepsilon_{ijk}$$

Em que:

Y_{ijk} : observação do i-ésimo genótipo no j-ésimo ambiente no k-ésimo bloco;

μ : constante geral;

G_i : efeito fixo do i-ésimo genótipo;

L_j : efeito fixo do j-ésimo local;

P_k : efeito fixo do k-ésimo nível de fósforo;

GL_{ij} : efeito fixo da interação entre o i-ésimo genótipo com o j-ésimo local;

GP_{ik} : efeito fixo da interação entre i-ésimo genótipo com k-ésimo nível de fósforo;

LP_{jk} : efeito fixo da interação entre j-ésimo local com k-ésimo nível de fósforo;

GLP_{ijk} : efeito fixo da interação entre i-ésimo genótipo com j-ésimo local com k-ésimo nível de fósforo;

ε_{ijk} : erro aleatório experimental médio associado à observação Y_{ijk} , NID $(0, \sigma^2)$.

A dissimilaridade genética entre as linhagens foi estimada pelo uso da distância generalizada de Mahalanobis (D^2), a partir das médias de dez características avaliadas nas linhagens de milho-pipoca, excluindo-se VP em razão de colinearidade e da matriz de covariância residual (Cruz et al., 2014). No agrupamento das linhagens de milho-pipoca, foram empregados os métodos de Tocher (Rao, 1952) e de ligação média entre grupo (UPGMA), com auxílio do programa computacional Genes (Cruz, 2013). O ponto de corte nos dendrogramas e definição do número de grupos foi estabelecido pelo método de Mojena (1977), baseado no tamanho relativo dos níveis de fusões (distâncias) no dendrograma.

3.1.4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Houve diferença significativa entre as linhagens ($P < 0,01$) para todas as características avaliadas na análise conjunta, indicando a existência de variabilidade genética, o que é imprescindível para a identificação de germoplasma contrastante na eficiência e responsividade ao uso do fósforo, visando à implementação de programa de melhoramento de interesse à prática de agricultura sustentável. O efeito significativo do nível de fósforo para a produtividade demonstra que as dosagens de P utilizadas foram suficientes para discriminar as linhagens eficientes das ineficientes (Tabela 3).

Tabela 3. Análise de variância conjunta para onze características avaliadas em 25 linhagens S₇ de milho-pipoca em ambientes contrastantes quanto ao nível de fósforo no solo. Campos dos Goytacazes e Itaocara, RJ.

FV	Quadrados Médios						
	GL	AP	AE	FF	FM	IF	DE
(B/P)/L	12	409,69	198,84	9,80	9,32	2,07	4,96
Genótipo (G)	24	4862,86 **	1967,32 **	176,77 **	175,41 **	4,06 **	179,33 **
Local (L)	1	152302,86 **	73630,82 **	260,02 **	215,35 **	2,10 ns	4040,08 **
Nível (P)	1	91,77 ns	342,62 ns	502,88 **	59,68 *	216,09 **	50,03 **
G x L	24	233,39 **	125,78 **	1,64 ns	1,57 ns	1,05 ns	11,66 **
G x P	24	95,89 ns	92,54 ns	5,38 **	5,83 **	2,56 **	4,48 *
L x P	1	4558,95 **	5439,06 **	6,89 ns	0,11 ns	5,29 ns	3,34 ns
G x L x P	24	68,28 ns	52,82 ns	1,49 ns	1,68 ns	0,89 ns	3,29 ns
Erro	28 8	95,65	60,43	2,42	1,75	0,91	2,46
Média		147,81	76,04	61,22	59,83	1,40	26,31
CV (%)		6,62	10,22	2,54	2,21	68,25	5,96

FV	Quadrados Médios					
	GL	TE	P100	PROD	CE	VP
(B/P)/L	12	0,76	0,70	150381,77	10,69	159,92
Genótipo (G)	24	42,15 **	26,90 **	10947166,74 **	322,79 **	7308,90**
Local (L)	1	169,60 **	309,61 **	13569969,03 **	2,58 ns	8671,00**
Nível (P)	1	0,61 ns	0,69 ns	764743,05 *	162,35 **	1501,76**
G x L	24	2,05 **	5,99 **	331994,65 **	19,73 **	335,61**
G x P	24	0,93 ns	0,62 ns	53541,69 ns	8,09 ns	83,46*
L x P	1	4,05 *	0,15 ns	166869,88 ns	212,91 **	946,22*
G x L x P	24	0,88 ns	0,59 ns	106709,84 **	15,57 **	125,13**
Erro	28 8	0,78	0,71	37649,67	8,02	48,02
Média		12,28	11,25	1284,13	26,18	33,54
CV (%)		7,18	7,51	15,11	10,82	20,66

ns: não-significativo; *, **: significativo no nível de 5 % e 1 % de probabilidade, respectivamente, pelo teste F. AP: altura de planta; AE: altura de espiga; FF: florescimento feminino; FM: florescimento masculino; IF: intervalo de florescimento masculino e feminino; DE: diâmetro de espiga; TE: comprimento de espiga; P100: peso de 100 grãos; PROD: produtividade de grãos; CE: capacidade de expansão; e VP: volume de pipoca por hectare.

A não-significância para a interação genótipo por nível de fósforo (G x P) para as características produtividade de grãos e capacidade de expansão revela que a classificação das linhagens não foi alterada, na comparação entre os experimentos de alta e baixa disponibilidade de fósforo, demonstrando que a

seleção de linhagens de milho-pipoca para eficiência no uso do fósforo com base na produtividade, ou na capacidade de expansão pode ser praticada tanto em ambientes de baixa quanto de alta disponibilidade de fósforo. O contrário ocorre para com a característica volume de pipoca expandida por hectare – VP – que, apesar da redundância para com a produtividade de grãos e a capacidade de expansão, revelou significância na interação. Esse fato evidencia que a classificação das linhagens com base nas médias de volume de pipoca é distinta para as condições contrastantes de disponibilidade de P, sendo que a seleção de linhagens de milho-pipoca eficientes no uso do fósforo com base na característica VP deve ser específica para cada ambiente de disponibilidade nutricional (Tabela 3).

Com exceção da característica IF, os valores dos coeficientes de variação foram de baixa magnitude, variando de 2,21 a 15,11 % para FM e PROD, respectivamente, indicando boa precisão experimental (Tabela 3). Em estudos de melhoramento vegetal para estresses abióticos é aceitável a obtenção de CVs de maiores magnitudes, comparados aos ambientes sem estresse nutricional, vez que sob estresse as médias das características geralmente são menores e os quadrados médios dos resíduos são maiores. As pesquisas de Bänziger et al. (1997), Santos et al. (1998) e Soares et al. (2011) foram exemplos de obtenção de CVs de maiores magnitudes nos ambientes com estresse nutricional ao nitrogênio, quando avaliaram a variabilidade genotípica de milho em ambientes de alto e baixo nitrogênio no solo.

Foi observada uma redução de 7,05 % na média geral da produtividade no ambiente de baixo nível de fósforo quando comparada ao ambiente com alto nível de fósforo (Tabela 4). Essa redução na produtividade pode ter ocorrido devido à redução da respiração ou da taxa fotossintética que a deficiência de fósforo causa nas plantas. A deficiência de fósforo também pode reduzir a síntese de ácido nucléico e de proteína, induzindo a acumulação de compostos nitrogenados solúveis no tecido, retardando o crescimento celular e, conseqüentemente, causando atraso na emergência das folhas e redução na brotação e desenvolvimento de raízes secundárias, bem como na produção de matéria seca e na produtividade (Grant et al., 2001). Barreto e Fernandes (2002), avaliando a produtividade de milho em função do acréscimo das dosagens de fósforo aplicadas ao solo, observaram aumentos de mais de 50 % na produtividade de grãos.

No ambiente com alto nível de fósforo, a estimativa da produtividade foi de 1.327,86 kg ha⁻¹ (Tabela 4), havendo a formação de dez grupos distintos de médias; enquanto no ambiente com baixo nível de fósforo, em que a média geral foi de 1.240,41 kg ha⁻¹, houve a formação de oito grupos, pelo algoritmo de Scott e Knott (1974), o que revela uma considerável variabilidade a ser explorada em programas de melhoramento. Ainda que as produtividades sejam mais baixas no ambiente com baixo nível de fósforo, o menor custo de produção nesse sistema pode compensar a desvantagem, tornando-se viável, principalmente para pequenos produtores de baixo poder aquisitivo.

Para a capacidade de expansão, as estimativas de médias foram próximas nos ambientes com alto e baixo nível de fósforo – 26,82 e 25,54 mL.g⁻¹, respectivamente – (Tabela 4). A menor formação de grupos de linhagens para a capacidade de expansão, em relação à produtividade, possivelmente está vinculada ao fato da CE ser característica qualitativa oligogênica, conforme propalado por Doffing et al. (1991). Ainda que oligogênica, a herdabilidade da capacidade de expansão varia de 70 a 90 % (Pereira e Amaral Júnior, 2001; Arnhold et al., 2009), sendo uma característica em que os efeitos aditivos são os principais componentes da variância genética (Larish e Brewbaker, 1999; Pereira e Amaral Junior, 2001; Moterle et al., 2012). De todo modo, de acordo com Lu et al. (2003), a capacidade de expansão é pouco influenciada pelo ambiente, determinando que a *performance per se* é imperativa na expressão da característica. Esses mesmos autores identificaram quatro QTLs nos cromossomos 1S, 3S, 5S e 5L que, em conjunto, explicaram 45 % da variação fenotípica da capacidade de expansão.

Tabela 4. Estimativas de médias de produtividade de grãos (PROD), capacidade de expansão (CE) e volume de pipoca por hectare (VP) de 25 linhagens de milho-pipoca cultivadas em ambientes com alta e baixa disponibilidade de fósforo.

Linhagem	PROD (Kg.ha ⁻¹)		CE (mL.g ⁻¹)		VP (m ³ .ha ⁻¹)	
	Baixo P	Alto P	Baixo P	Alto P	Baixo P	Alto P
L53	585,58 g	620,20 i	23,83 c	27,12 c	13,90 f	17,16 f
L54	538,05 g	615,83 i	21,91 c	21,83 e	11,84 g	13,11 g
L59	2774,07 a	2940,26 a	20,79 d	21,50 e	57,70 b	63,06 b
L61	347,91 h	407,5 j	30,33 a	32,25 b	10,51 g	13,16 g
L63	405,69 h	500,64 j	23,75 c	25,16 d	9,57 g	12,61 g
L65	385,81 h	466,90 j	19,79 d	20,54 e	7,69 g	9,73 g
L66	1650,55 d	1598,61 e	29,50 a	31,83 b	48,98 c	51,46 c
L69	1542,36 d	1645,55 e	28,83 a	29,00 c	44,48 d	48,00 c
L70	1652,22 d	1591,11 e	25,04 b	27,29 c	41,43 d	42,41 d
L71	573,49 g	905,23 h	31,29 a	33,62 a	17,39 f	30,55 e
L75	258,90 h	388,78 j	18,66 d	18,41 f	4,91 g	7,19 g
L76	1274,76 f	1191,11 g	26,20 b	25,08 d	33,02 e	28,66 e
L77	383,74 h	441,66 j	22,91 c	26,83 c	8,83 g	12,08 g
L80	267,14 h	361,66 j	27,20 b	28,54 c	7,53 g	10,45 g
L88	660,55 g	460,00 j	26,20 b	26,04 c	18,23 f	12,13 g
P1	386,38 h	626,94 i	29,16 a	30,12 b	11,66 g	19,22 f
P2	2460,70 b	2611,94 b	20,29 d	20,62 e	49,98 c	53,21 c
P3	2304,44 b	2231,38 c	18,66 d	22,00 e	43,10 d	48,06 c
P4	1930,55 c	2075,79 c	18,87 d	18,50 f	36,43 e	38,33 d
P5	1476,94 e	1562,50 e	30,27 a	29,70 b	46,22 d	46,31 c
P6	1224,44 f	1329,89 f	26,20 b	26,79 c	32,10 e	35,97 d
P7	2733,88 a	2917,18 a	27,37 b	30,33 b	75,44 a	88,83 a
P8	1861,70 c	1961,66 d	31,16 a	31,45 b	57,56 b	62,29 b
P9	1586,94 d	1800,94 d	31,58 a	34,37 a	50,86 c	61,74 b
P10	1743,33 d	1943,11 d	28,66 a	31,41 b	50,53 c	61,05 b

Médias seguidas pela mesma letra na coluna pertencem ao mesmo grupo pelo algoritmo de Scott-Knott (1974), ao nível de 5 % de probabilidade.

Considerando que volume de pipoca expandida por hectare (VP) é um super-caráter que reúne produtividade de grãos (PROD) e capacidade de expansão (CE), torna-se uma opção vantajosa a utilização de VP para a obtenção de ganhos simultâneos nas duas principais características de interesse econômico da cultura – PROD e CE. Com base em VP, sobressaíram-se as linhagens P7, L59, P8, P9, P10, P2 e L66 no ambiente com baixa disponibilidade de fósforo, por constituírem as estimativas de médias mais expressivas variando de 75,44 a 48,98 m³ ha⁻¹. Inobstante, apesar da significância da interação genótipo por nível de fósforo, as linhagens que se sobressaíram na classificação pelo algoritmo de Scott e Knott

(1974) no ambiente com alta disponibilidade de fósforo, foram às mesmas do ambiente com baixa disponibilidade de fósforo, porém, com médias superiores em até 12 % no volume de pipoca expandida por hectare (Tabela 4), o que possibilita concluir que: i) VP sobrepuja a correlação negativa entre PROD e CE; e ii) VP favorece a seleção concomitante de genótipos eficientes e responsivos. É, pois, uma característica de interesse para ser introduzida nas avaliações para a seleção de genótipos superiores em programas de melhoramento com milho-pipoca.

O gráfico de dispersão das linhagens quanto à eficiência e responsividade, revelou que as linhagens L59, P7, P2, P3, P4, P8, P10, P9, L66, L70, L69 e P5 se distribuíram no quadrante de classificação das eficientes e responsivas (ER), ou seja, trata-se de genótipos que expressaram produtividade média superior às médias dos ambientes em alto e baixo nível de fósforo (Figura 1). Essas linhagens ER exibiram produtividades que variaram de 200,00 a 1.600,00 kg ha⁻¹ a mais que a média nos ambientes com alto e baixo nível de fósforo.

Por sua vez, as linhagens L75, L80, L61, L77, L63, L65, P1, L54, L53, L88 e L71 foram classificadas como ineficientes e não-responsivas (Figura 1), isto é, possuem produtividades médias inferiores nos ambientes com baixo e alto nível de fósforo, cujas estimativas negativas variaram, respectivamente, de 500,00 a 1.000,00 kg ha⁻¹. Situação particular, que necessita ser referenciada, a linhagem L76 expressou produtividade um pouco acima da média geral dos ambientes com estresse nutricional; e a linhagem P6 foi indiferente aos ambientes contrastantes, não expressando inferioridade ou superioridade para a estimativa da média de produtividade. Uma hipótese levantada é que poderia tratar-se de genótipos com simetria alélica para genes responsáveis pela eficiência e responsividade ao fósforo, portanto, de interesse para estudos de herança.

Essa identificação de linhagens contrastantes à eficiência e responsividade no uso do fósforo é primordial para estudos de controle genético e o conhecimento do tipo de ação gênica predominante para a escolha do método de melhoramento mais adequado que possibilite a obtenção de genótipos superiores de milho-pipoca como novas opções de cultivos sustentáveis em fronteiras agrícolas com baixa disponibilidade de fósforo, bem como para o incremento da produção em ambientes com suprimento do nutriente.

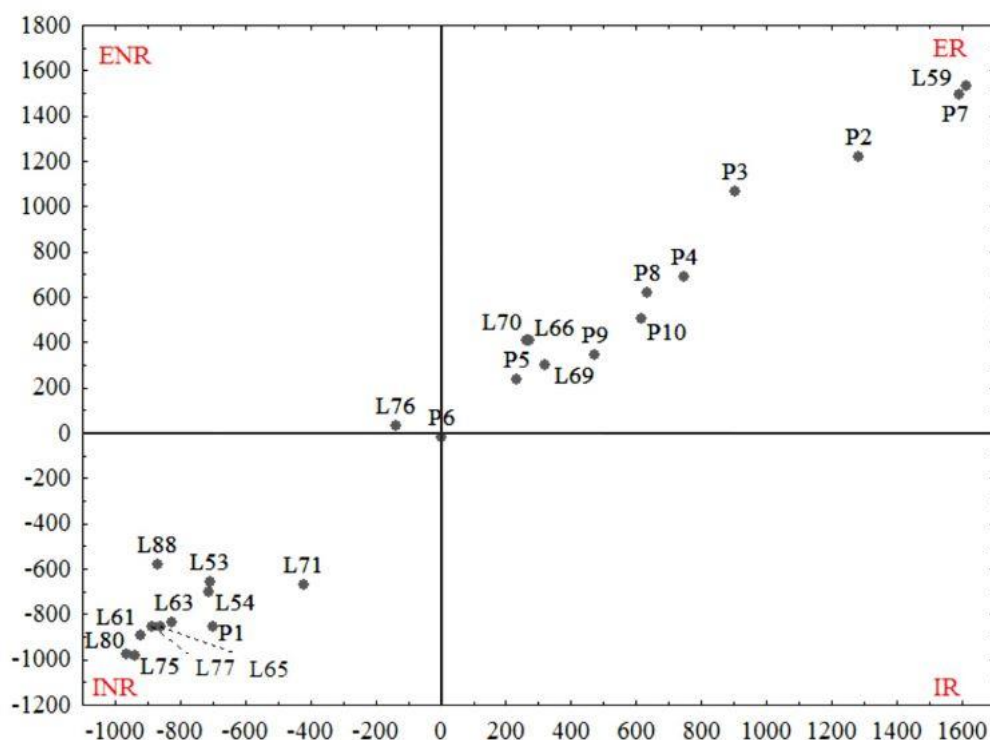


Figura 1. Distribuição de 25 linhagens de milho-pipoca quanto à eficiência no uso do fósforo. ER = eficiente e responsiva; ENR = eficiente e não-responsiva; IR = ineficiente e responsiva; e INR = ineficiente e não-responsiva.

Alguns estudos têm sido realizados com o objetivo de entender e explorar a variabilidade das características relacionadas à EUP em plantas, porém, essa tarefa tem se mostrado bastante complexa, pelo fato do controle genético dessas características em geral ser poligênico e, portanto, fortemente influenciado pelo ambiente. Parte dos trabalhos relata que o controle genético para EUP são baseados na avaliação da absorção e acumulação de fósforo na fase de plântulas (Gorz et al., 1987; Ahsan et al., 1996; Furlani et al., 1998). Tais estudos, realizados em solução nutritiva, evidenciam que tanto efeitos aditivos quanto dominantes são importantes no controle da eficiência ao fósforo. Contudo, deve-se ressaltar que resultados obtidos em solução nutritiva podem não se correlacionar com resultados obtidos em condições de campo. Nesse sentido, para culturas graníferas, experimentos conduzidos em condições de campo com a avaliação do seu “produto final” – produtividade de grãos – são necessários para maior entendimento dos efeitos gênicos das características relacionadas à eficiência no uso do fósforo.

Dentre as linhagens que se classificam como eficientes ao uso do fósforo, P9, P8, P10, P5 e P7 detiveram as maiores médias para CE, com estimativas que variaram entre 27,37 e 34,37 mL g⁻¹, sendo opções interessantes para obtenção de

segregantes não só para eficiência ao fósforo, mas também para capacidade de expansão, que é a característica de qualidade de maior interesse agrônomo e comercial para a cultura do milho-pipoca. Essas linhagens foram extraídas dos híbridos “Zaeli” e “IAC-112”, demonstrando que populações segregantes derivadas destas cultivares possuem genes de interesse não apenas para eficiência e responsividade ao fósforo em relação à produtividade de grãos, como também para elevada expressão da capacidade de expansão. A eficiência ao uso do fósforo está diretamente relacionada ao desempenho produtivo, característica que possui correlação negativa com a capacidade de expansão, dificultando a obtenção de cultivares que associem essas duas características simultaneamente, conforme já reportado por alguns autores (Dofing et al., 1991; Daros et al., 2004b; Amaral Júnior et al., 2010; Scapim et al., 2010). Desse modo, a partir de uma análise de contexto genealógico, as linhagens P9, P8, P10, P5 e P7, que possuem genes favoráveis para eficiência ao fósforo em relação à produtividade de grãos e capacidade de expansão, podem ser opções para obtenção de híbridos superiores, para cultivos em ambientes com baixa disponibilidade do nutriente no solo, possibilitando a expressão conjunta das duas principais características de interesse econômico para a cultura – PROD e CE.

As medidas de dissimilaridade genética entre as linhagens de milho-pipoca estimadas pela distância generalizada de Mahalanobis revelaram L70 e L69 como as mais similares, geneticamente, tanto no ambiente com alto, quanto no de baixo nível de fósforo, ao passo que L61 e L59 foram as mais divergentes para o ambiente com alto nível de fósforo; e L63 e P7, para o ambiente com estresse ao fósforo (Tabela 5).

A amplitude dos valores das distâncias genéticas entre as linhagens de milho-pipoca evidenciam a existência de variabilidade genética, favorecendo, assim, a possibilidade de êxito em estudos de herança da característica eficiência, como também na obtenção de híbridos superiores, nesse caso, utilizando a estimativa da distância genética – juntamente com os desvios de dominância – para estimativa da heterose (Falconer, 1987; Hallauer et al., 2010; Cruz et al., 2012).

O agrupamento pelo Método de Otimização de Tocher permitiu a formação de seis grupos distintos para o ambiente com alto nível de fósforo no solo, e de oito grupos para o ambiente que foi induzido o estresse nutricional (Tabela 6). O grupo I do ambiente com alto nível de fósforo conteve o maior número de linhagens, no

total de doze, representando 48 % das linhagens. Os grupos II, III e IV foram representados por cinco, duas e quatro linhagens, respectivamente. Os grupos V e VI contiveram uma única linhagem cada – L65 e L77 –, nesta ordem. De acordo com Cruz et al. (2012), os grupos formados por apenas um representante, indicam tratar-se de genótipos com pronunciada divergência em relação aos demais.

Tabela 5. Estimativas de dissimilaridade genética entre 25 linhagens de milho-pipoca para dez características morfoagronômicas, sob cultivo em ambientes contrastantes para o fósforo no solo.

Linhage m	Alto Fósforo				Baixo Fósforo				
	Distâncias D ² entre as linhagens								
	Menores		Maiores		Menores		Maiores		
L53	17,7	(L80)	192,3	(L59)	30,5	(L54)	191,0	(L88)	
L54	23,3	(L75)	196,5	(L59)	30,5	(L53)	218,8	(L88)	
L59	17,4	(P2)	268,0	(L61)	16,4	(P2)	305,3	(L61)	
L61	23,7	(L63)	268,0	(L59)	17,2	(L63)	370,0	(P7)	
L63	23,7	(L61)	227,6	(L59)	17,2	(L61)	374,8	(P7)	
L65	25,4	(L75)	267,0	(P7)	8,3	(L75)	288,3	(P7)	
L66	13,6	(L70)	122,9	(L65)	22,8	(L76)	195,9	(L88)	
L69	3,6	(L70)	105,6	(P1)	1,7	(L70)	151,1	(P7)	
L70	3,6	(L69)	111,2	(L65)	1,7	(L69)	155,3	(P7)	
L71	31,6	(L76)	195,5	(L59)	21,7	(L75)	235,3	(P7)	
L75	23,3	(L54)	225,5	(P7)	8,3	(L65)	269,0	(P7)	
L76	29,3	(L69)	116,8	(L59)	22,8	(L66)	156,9	(L88)	
L77	54,5	(L70)	229,7	(L59)	40,7	(L71)	203,6	(P7)	
L80	10,8	(P1)	242,6	(L59)	8,0	(P1)	255,5	(P7)	
L88	25,4	(L63)	226,6	(L59)	26,3	(L63)	334,9	(P7)	
P1	10,8	(L80)	221,8	(L59)	8,0	(L80)	225,3	(P7)	
P2	15,2	(P3)	246,0	(L61)	14,2	(P4)	277,5	(L63)	
P3	12,3	(P4)	216,5	(L61)	16,8	(P2)	351,8	(L61)	
P4	12,3	(P3)	217,6	(L61)	14,2	(P2)	241,1	(L61)	
P5	5,3	(P6)	145,6	(L88)	2,8	(P9)	239,6	(L63)	
P6	5,3	(P5)	107,4	(L88)	11,7	(P5)	263,4	(L63)	
P7	21,0	(L59)	267,0	(L65)	17,8	(P3)	374,8	(L63)	
P8	3,7	(P9)	176,3	(L65)	7,1	(P9)	287,7	(L63)	
P9	3,7	(P8)	176,4	(L65)	2,4	(P10)	258,8	(L63)	
P10	6,0	(P8)	147,9	(L77)	2,4	(P9)	256,4	(L63)	
Menor distância geral: 3,6(L70 e L69)					Menor distância geral: 1,7(L70 e L69)				
Maior distância geral: 268,0(L61 e L59)					Maior distância geral: 374,8(L63 e P7)				

Já, no ambiente com baixo nível de fósforo, houve uma maior distribuição das linhagens nos oito grupos formados, revelando que o ambiente com estresse

nutricional proporcionou maior expressão da variabilidade genética entre as linhagens de milho-pipoca (Tabela 5). Diversos autores, em trabalhos de investigação da divergência genética de várias culturas em condições de estresse nutricional, demonstraram que em ambientes estressantes, os genótipos tendem a expressar maior variabilidade genética entre os indivíduos (Moura et al., 1999; Sávio et al., 2008; Silva et al., 2015; Santos et al., 2017).

A maior variabilidade genética encontrada no ambiente com baixo nível de fósforo (maior número de grupos) pode estar relacionada ao fato da maioria dessas linhagens já terem sido obtidas e adaptadas a ambientes com adequadas condições nutricionais, desde o início do seu processo de melhoramento. Ao serem cultivadas em ambientes estressantes, a tendência é que essas linhagens expressem de maneira diferente a sua variabilidade, pois os genes que controlam a eficiência ao fósforo não estão presentes em todas as linhagens, ou estão em menor número, fazendo com que haja essa discriminação da *performance* entre as linhagens nos ambientes com baixo nível de fósforo, ou seja, indivíduos geneticamente idênticos podem se desenvolver desigualmente em ambientes diferentes.

Tabela 6. Agrupamento de 25 linhagens de milho-pipoca conforme método de otimização de Tocher nos ambientes de alto e baixo nível de fósforo no solo.

Grupo	Baixo Fósforo Linhagens	Grupo	Alto Fósforo Linhagens
I	L70, L69, L66, L76	I	L70, L69, L66, L76, P6, P5,
II	P10, P9, P5, P8, P6, P3, P4, P2, P7		P8, P9, P10, P3, P4, P2
III	L80, P1, L71, L75, L65	II	L80, P1, L53, L75, L54
IV	L63, L61	III	L59, P7
V	L53, L54	IV	L63, L61, L88, L71
VI	L77	V	L65
VII	L59	VI	L77
VIII	L88	-	-

Assim como o método de Tocher, o agrupamento UPGMA revelou maior número de grupos no ambiente com baixo nível de fósforo, com a formação de quatro grupos de linhagens, em detrimento de três grupos formados para o nível de alto fósforo, com estimativas de coeficientes de correlação cofenética de 0,68 e 0,69, respectivamente (Figuras 2 e 3). Houve, pois, consonância praticamente similar na confiabilidade de formação dos grupos, seja para o alto ou para o baixo

nível do nutriente. No ambiente com alto nível de fósforo, o grupo I foi constituído pelas linhagens L66, L69, L70, P10, P9, P8, P5, P6, P7, L59, P2, P3 e P4; o grupo II, apenas por L77; e o grupo III, por L76, L71, L54, L75, L65, L88, L61, L63, P1, L80 e L53. No ambiente com baixo nível de fósforo, o grupo I reuniu as linhagens P1, L80, L71, L75, L65, L88, L61 e L63, coincidindo com as mesmas linhagens que foram compostas no grupo III do ambiente com alto nível de fósforo. O segundo grupo para o ambiente com baixo nível de fósforo no solo, foi composto pelas linhagens P8, P9, P10, P5, P6, L59, P7, P3, P2 e P4, cuja totalidade esteve presente no grupo I para o ambiente com elevado nível de fósforo. O terceiro grupo foi composto pelas linhagens L76, L66, L69 e L70; e o grupo IV, por L77, L54 e L53.

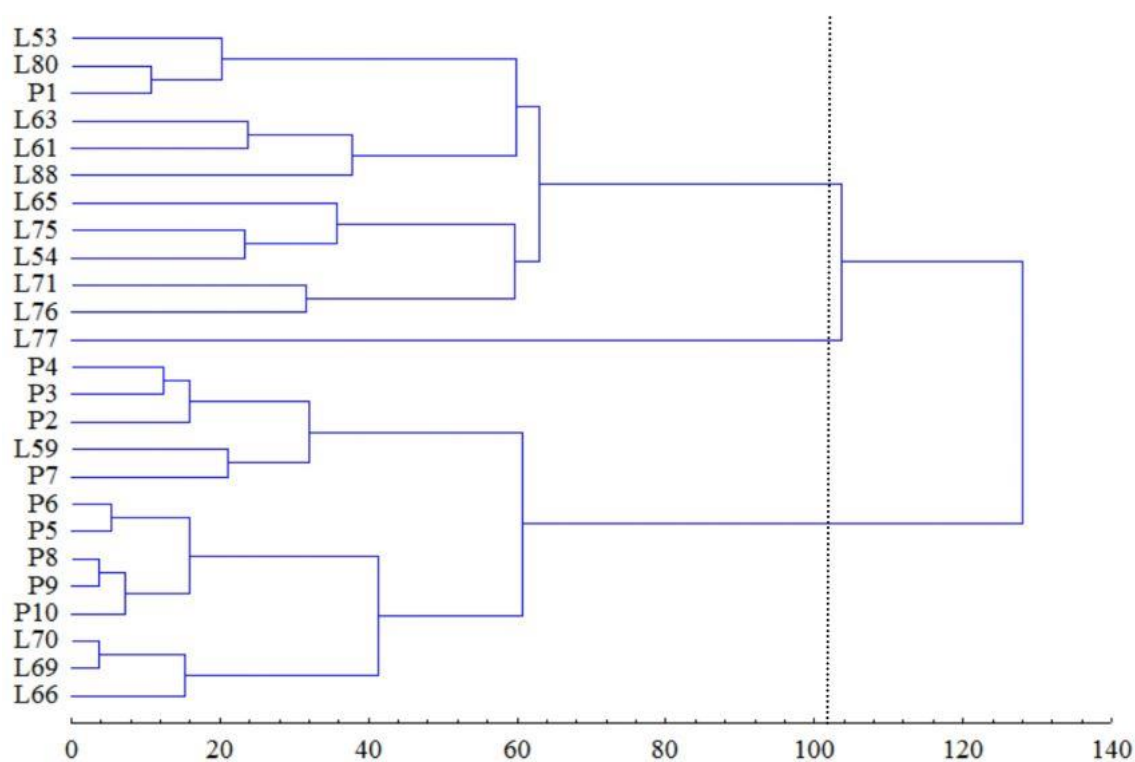


Figura 2. Dendrograma ilustrativo do método UPGMA, para 25 linhagens de milho-pipoca avaliadas em ambiente com alto nível de fósforo no solo.

No agrupamento das linhagens em ambiente com alto nível de fósforo no solo, pelo método UPGMA (Figura 2) constata-se que houve coincidência das treze linhagens que foram alocadas no primeiro grupo, com as que ficaram distribuídas no quadrante correspondente às linhagens eficientes e responsivas (ER), com exceção da linhagem P6, que ficou exatamente no ponto intermediário do gráfico (Figura 1). Inobstante, com exceção de L76, todas as demais linhagens que

constituíram o segundo e o terceiro grupos, estiveram dispostas no quadrante das ineficientes e não-responsivas (INR) (Figura 1). No dendrograma do agrupamento das linhagens no ambiente com baixo nível de fósforo (Figura 3), o primeiro e o quarto grupos, coincidiram com a constituição das linhagens classificadas no quadrante das ineficientes e não-responsivas (INR) (Figura 1). E o segundo e o terceiro grupos ficaram distribuídos no quadrante das eficientes e responsivas (ER) (Figura 1), com exceção de L76 e P6.

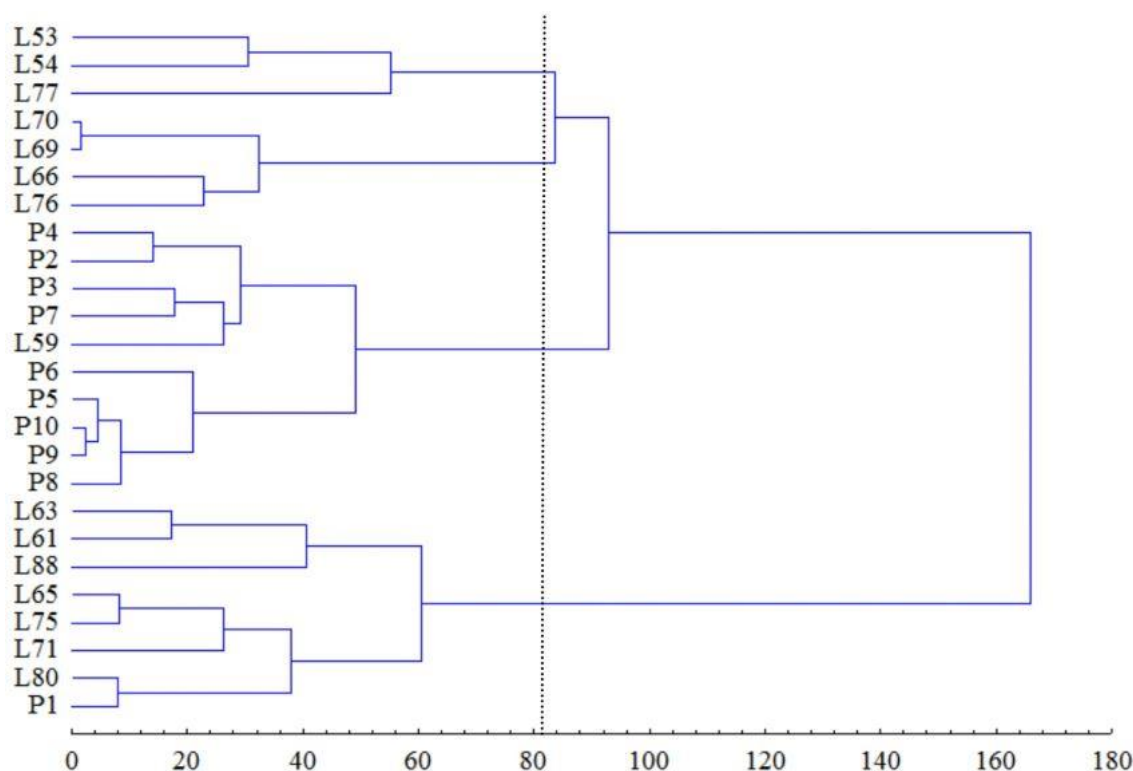


Figura 3. Dendrograma ilustrativo do método UPGMA, para 25 linhagens de milho-pipoca avaliadas em ambiente com baixo nível de fósforo no solo.

Dentre as populações de origem das 25 linhagens de milho-pipoca avaliadas, observou-se uma similaridade genética entre as linhagens procedentes das populações do Composto CMS-42, Raças Sul-Americanas, Híbrido Zaeli e Híbrido IAC-112, pois a maioria das linhagens dessas populações ficou ordenada no mesmo grupo, tanto no ambiente com alto quanto no ambiente com baixo fósforo, pelos métodos de agrupamento de Tocher e UPGMA. As linhagens procedentes das outras populações ficaram aleatoriamente ordenadas nos demais grupos formados.

3.1.5. CONCLUSÕES

Existe variabilidade genética entre as linhagens de milho-pipoca avaliadas, para ser explorada em programas de melhoramento visando seleção para diversas características agronômicas, bem como para capacidade de expansão.

As linhagens L59, P7, P2, P3, P4, P8, P10, P9, L66, L70, L69, e P5 foram eficientes e responsivas no uso do fósforo.

As linhagens L75, L80, L61, L77, L63, L65, P1, L54, L53, L88 e L71 foram ineficientes e não-responsivas no uso do fósforo.

O ambiente com baixa disponibilidade de fósforo proporciona maior oportunidade de expressão da variabilidade genética entre linhagens de milho-pipoca.

3.2. EFEITOS GÊNICOS DA EFICIÊNCIA E RESPONSABILIDADE NO USO DO FÓSFORO EM MILHO-PIPOCA ESTIMADOS POR ANÁLISE DIALÉLICA

3.2.1. INTRODUÇÃO

Com as recentes mudanças climáticas que vêm ocorrendo nos últimos anos, à busca por uma agricultura mais sustentável e adaptada aos mais diversos tipos de adversidades abióticas tem se tornado imperiosa (Helgadóttir et al., 2016). Dentre esses desafios, está a obtenção de cultivares mais adaptadas e eficientes aos solos de baixa fertilidade, no intuito de mitigar o uso de insumos agrícolas e, conseqüentemente, reduzir a poluição ambiental e os custos de produção (Heuer et al., 2017).

O fósforo é um dos macronutrientes primários de maior importância para a maioria das espécies cultivadas, devido à sua participação em funções vitais na planta (Buchanan et al., 2001; Taiz e Zeiger, 2009). Para atender à crescente demanda por fertilizantes, a mineração praticamente quintuplicou a extração de rochas fosfatadas entre a década de 60 até o ano de 2011 (Scholz et al., 2013), e a produção global de fertilizantes fosfatados tem aumentado constantemente à uma taxa de 4 % ao ano (Cordell et al., 2009 e 2012). Sabendo que se trata de um recurso natural não renovável, cujas reservas tendem a se findar nos próximos 50 anos (March et al., 2016), o melhoramento de plantas voltado à eficiência e a responsividade no uso do fósforo tem uma função importante nesse processo e traz consigo uma perspectiva interessante sobre a sustentabilidade do sistema

produtivo, principalmente nas regiões tropicais, onde os solos têm baixa fertilidade e problemas de acidez e alta capacidade de adsorção de fósforo (Rowe et al., 2016).

O conhecimento do controle genético da eficiência no uso do fósforo e os tipos de ações gênicas predominantes na expressão da característica é primordial para uma escolha adequada de método de melhoramento a ser implementado para obtenção de genótipos superiores (Cruz et al., 2012). Diversas pesquisas com várias culturas têm sido realizadas visando entender o controle genético, identificação de regiões genômicas, mapeamento de QTL's e genes candidatos para eficiência no uso do fósforo, cuja tarefa tem se mostrado difícil, devido à herança ser poligênica e bastante influenciada pelo ambiente (Parentoni et al., 2010; Mendes et al., 2014; Gong et al., 2016; Li et al., 2016; Gu et al., 2016; James et al., 2016; Uzokwe et al., 2017). Porém, escassos são os trabalhos sobre o estudo do controle genético da eficiência no uso do fósforo na cultura do milho-pipoca.

Nesse contexto, a análise dialélica é um recurso bastante utilizado em estudos de herança e controle genético de características importantes em diversas culturas agrícolas. É uma metodologia que utiliza a estimação de parâmetros genéticos relativos ao controle de caráter, inferindo-se aos efeitos aditivos e não-aditivos, para auxiliar na escolha de um método de seleção mais eficiente e também indicar os melhores genitores para hibridação e que tenham boa complementação gênica para características de interesse econômico (Vencovsky e Barriga, 1992; Hallauer et al., 2010; Cruz et al., 2012). A análise dialélica entre linhagens contrastantes à eficiência e responsividade no uso do fósforo é uma estratégia que pode auxiliar na escolha de genitores eficientes nas áreas de baixa fertilidade e responsivos à aplicação do nutriente, para desenvolvimento de híbridos, bem como para indicação de híbridos heteróticos que apresentam produtividades satisfatórias em áreas com baixa fertilidade.

Isto posto, este trabalho teve por objetivo avaliar a eficiência e responsividade no uso de fósforo de um conjunto de híbridos de milho-pipoca, bem como estimar as capacidades gerais e específicas de combinação de suas linhagens parentais, para inferir sobre seus efeitos genéticos aditivos e não-aditivos para características relacionadas a eficiência e responsividade no uso do fósforo, em ensaio dialélico conduzido em ambientes contrastantes quanto a disponibilidade deste nutriente no solo.

3.2.2. REVISÃO

Eficiência no uso do fósforo em plantas

Na literatura, existem várias definições de eficiência nutricional em plantas; por exemplo, Clark e Brown (1974) definem como eficiente, o genótipo que tem capacidade de acumular maior quantidade de fósforo em um ambiente em que há baixa disponibilidade. O conceito de eficiência segundo a definição de Moll et al. (1982), se refere a quantidade de grãos produzidos pela quantidade do nutriente suprido, decompostos em dois componentes principais: “eficiência de aquisição”, definida como a porção do nutriente absorvido pela planta, dividida pela porção do nutriente disponível à planta; e “eficiência de utilização interna”, definida como a massa de grãos produzidos, pela unidade de nutriente absorvida pela planta. A eficiência de utilização interna ainda pode ser subdividida em dois componentes: a capacidade da planta em levar o nutriente da parte aérea para os grãos, que é o índice de colheita do nutriente; e sua capacidade de produzir grãos por unidade do nutriente nos grãos, que é o quociente de utilização.

Uma maior eficiência no uso de fósforo pode ser obtida pelo aumento na aquisição e na utilização interna do nutriente pelas plantas (Hammond et al., 2004; Parentoni e Souza Junior, 2008). A melhoria da eficiência no uso de fósforo pelo aumento na aquisição de fósforo é resultante da morfologia e arquitetura da raiz e está relacionada ao aumento do volume e área radicular. Maior eficiência no uso de fósforo proporciona aumento da produtividade de grãos por unidade de fósforo translocada, segundo Baligar et al. (2001).

No âmbito da fisiologia vegetal, eficiência para o fósforo está associada à capacidade da planta em absorver o nutriente (Lindegren et al., 1977) e no grau de redistribuição aos tecidos vegetais para seu uso interno (Whiteaker et al., 1976). Em algumas plantas, como sorgo e trigo, por exemplo, eficiência no uso de fósforo tem sido relacionada à sua maior capacidade de redistribuição interna (Wieneke, 1990; Horst et al., 1993). Já para o capim-colonião, o que tem sido o diferencial de genótipos eficientes em fósforo é o transporte do elemento para a parte aérea (Furlani e Usberti Filho, 1990).

Segundo Mendes et al. (2012), como um meio de sobrevivência em solos com deficiência de fósforo, as plantas desenvolvem uma série de estratégias

morfológicas, bioquímicas e simbióticas que são capazes de aumentar a capacidade de aquisição de fósforo, e melhoram a eficiência do seu uso interno.

Dentre essas estratégias, podem-se citar as alterações radiculares no tamanho, densidade, diâmetro e formação de pelos; as simbioses com microrganismos; as mudanças do microambiente na rizosfera; a distribuição e remobilização do nutriente na parte aérea, compreendendo remobilização de partes maduras, como folhas velhas, para meristemas de crescimento vegetativo e reprodutivo, e ainda, a capacidade do genótipo em manter o metabolismo normal com concentrações reduzidas do nutriente no tecido (Parentoni et al., 2011). Alguns autores têm relatado a formação de aerênquimas como uma das alterações na anatomia radicular de algumas culturas induzidas ao estresse nutricional de nitrogênio (He et al., 1997), de fósforo (Fan et al., 2003; Ma et al., 2003; Coelho et al., 2010) e de sulfato (Bouranis et al., 2006).

O melhor método para avaliar diferentes genótipos eficientes na absorção e uso de um determinado nutriente, é a submissão dos mesmos em condições de baixo nível do nutriente (seja em solução nutritiva ou em condições de campo), observando se tais diferenças são em razão dos mecanismos de absorção e/ou de utilização do nutriente para produção de matéria seca (Gerloff, 1976; Whiteaker et al., 1976; Lindgren et al., 1977; Gabelman e Gerloff et al., 1983; Furlani et al., 1984; Furlani et al., 1985).

O estudo de Furlani et al. (1985) revelou que houve diferenciação entre genótipos de milho submetidos a estresse de fósforo em um nível de 8 mg dm^{-3} de concentração, e com efeito já depressivo sobre alguns deles, consideraram importante observar a resposta desses genótipos nos baixos níveis do nutriente.

Dinâmica do fósforo no solo

O fósforo presente no solo é classificado em dois grupos: fósforo inorgânico, forma na qual as plantas são aptas para absorvê-lo; e fósforo orgânico, quando o nutriente deve ser mineralizado primeiramente para que as plantas sejam capazes de absorvê-lo (Dechen e Nachtigall, 2007).

O fósforo inorgânico é dividido ainda em duas frações: o fósforo dos minerais primários e o fósforo adsorvido. Normalmente nos solos tropicais, o fósforo inorgânico se encontra de forma adsorvida, conseqüentemente, não disponível para absorção das plantas (Collins et al., 2008). O pH do solo tem grande influência

na adsorção do fósforo, pois solos com pH abaixo de 7, aumentam a concentração do ânion H_2PO_4^- , que é a forma preferencialmente absorvida pelas plantas. No entanto, em solos muito ácidos, aumentam também as concentrações de ferro e de alumínio na sua solução, provocando a precipitação do fósforo inorgânico como fosfatos de ferro e alumínio. À medida que o pH do solo aumenta, as cargas das partículas superficiais tornam-se cada vez mais negativas, elevando a repulsão entre o fosfato e a superfície adsorvente, diminuindo, assim, a adsorção. Porém, em solos muito alcalinos, grande parte do fósforo inorgânico está na forma de PO_4^{3-} - configuração não absorvida pelas plantas -, ou ainda podendo ser precipitado como hidroxiapatita ou carbonatoapatita (Dechen e Nachtigall, 2007).

A proporção do fósforo orgânico pode estar constituída entre 5 - 80 % do fósforo total do solo. As principais formas do fósforo orgânico encontrados são os fosfatos inositol, compondo de 10 – 80 %; os fosfolipídios, em proporções de 0,5 – 7 %; os ácidos nucleicos, com de 3 %; e outros ésteres-fosfato, em fração maior que 5 %. O fósforo orgânico é originado a partir da decomposição da matéria orgânica presente e/ou adicionada ao solo (Santos et al., 2008). Estes compostos são usados como fonte de carbono pelos microrganismos, em que o resultado é a sua mineralização e disponibilização do fósforo para as plantas (Parentoni et al., 2011).

Os compostos, como os ácidos nucleicos e fosfolipídios com ligação diéster, são mineralizados de maneira mais simples, devido à sua estrutura química que facilita sua decomposição; por este motivo, as quantidades acumuladas no solo são pequenas. Já os fosfatos monoésteres, como os fosfatos de inositol, possuem alta energia de ligação e alta carga residual, conferindo-lhes uma maior facilidade de interação com os constituintes inorgânicos do solo. Isso dificulta a mineralização e favorece o acúmulo no solo, sendo, então, de baixa disponibilidade para as plantas (Santos et al., 2008).

A conservação da matéria orgânica no solo em quantidades satisfatórias e a calagem têm sido práticas de papel fundamental no desenvolvimento das plantas, pois a mineralização da matéria orgânica resulta na liberação de fósforo de maneira lenta, de modo que o nutriente esteja mais disponível para as plantas. Em sistemas de plantio direto, por exemplo, constata-se maior relação entre proporção de fósforo na forma orgânica e inorgânica comparada ao sistema de plantio convencional (Anghinoni, 2006).

Análise dialélica no melhoramento de milho-pipoca e parâmetros genéticos

O conhecimento da variação devido a causas genéticas e ambientais para uma determinada característica é de extrema importância ao melhorista, pois essas informações lhe dão suporte para escolher com mais segurança o método de melhoramento mais apropriado para seleção (Ramalho et al., 1993).

No entanto, este objetivo se torna mais complexo quando se trata de características poligênicas, por serem bastante influenciadas pelo ambiente. A aplicação de métodos biométricos apropriados faz-se necessária para assegurar a melhor estratégia para a exploração da capacidade genotípica para eficiência ao fósforo.

As metodologias de análise dialélica têm por finalidade possibilitar a análise do delineamento genético, provendo estimativas de parâmetros úteis na seleção de progenitores para hibridação e no entendimento dos efeitos genéticos envolvidos na determinação dos caracteres. Dentre as metodologias mais comumente utilizadas, citam-se a proposta por Griffing (1956), pela qual são estimados os efeitos e as somas de quadrados de efeitos da capacidade geral e específica de combinação; a metodologia proposta por Gardner e Eberhart (1966), na qual são avaliados os efeitos de variedades e heterose varietal; e a proposta por Hayman (1954), que fornece informações sobre o mecanismo básico de herança do caráter em estudo, dos valores genéticos dos genitores utilizados e do limite da seleção (Cruz et al., 2012).

Para a estimação dos efeitos da capacidade combinatória, a CGC proporciona informações sobre a concentração de genes predominantemente aditivos em seus efeitos e tem sido útil para a indicação de genitores em programas de melhoramento intrapopulacional. Os efeitos da CEC, estimados como desvio do comportamento em relação ao que seria esperado com base na CGC, são medidas dos efeitos gênicos não-aditivos. Geralmente é de interesse do melhorista as combinações híbridas que apresentem as estimativas da CEC mais favoráveis envolvendo um dos progenitores com estimativa de CGC favorável, também (Cruz et al., 2012).

A quantificação dos efeitos gênicos torna possível conhecer a influência das interações intra e inter-alélicas, bem como a herdabilidade com que a característica é transmitida aos descendentes, o que é fundamental para a adoção

de técnicas de seleção que tornem mais eficientes à obtenção de indivíduos superiores em gerações avançadas.

O coeficiente de herdabilidade é um dos parâmetros de maior importância dentro do melhoramento, por ter atribuição preditiva, expressando a confiança do valor fenotípico como um guia para o valor genético (Falconer, 1987). Ou seja, a herdabilidade representa a confiança da transmissão da característica a futuras gerações, implicando diretamente nas estimativas dos ganhos de seleção. Portanto, é um parâmetro-chave na escolha de estratégias de melhoramento, pois as informações obtidas permitem decidir as técnicas de seleção, tornando mais eficiente o processo de obtenção de novas cultivares.

O modelo aditivo-dominante tem sido frequentemente utilizado para estes tipos de estudo, com ausência ou presença de efeitos epistáticos, possibilitando a estimação de parâmetros a partir do Método dos Mínimos Quadrados Ponderados, conforme preconizado por Mather e Jinks (1977) descrito por Cruz et al. (2012), ou por meio de Modelos Misto, para obtenção de variâncias via funções de máxima verossimilhança restrita (Viana e Resende, 2014).

O termo parâmetro é usado para se referir às características de uma dada população, particularmente média e variância, sendo sua estimação um dos principais objetivos da inferência estatística. A obtenção de estimativa de parâmetros genéticos tem grande importância em programas de melhoramento, pois possibilita a tomada de decisões relacionadas com a escolha do método apropriado e, mesmo, sobre as possibilidades de ganhos com a seleção (Cruz et al., 2012). Os parâmetros mais utilizados no melhoramento são os estimadores de variância fenotípica, variância de ambiente, variabilidade genotípica, coeficiente de determinação genotípica, índice de variação e herdabilidade (Falconer, 1987; Cruz et al., 2012), em que os maiores progressos são prováveis quando se dispõe de altas estimativas dos coeficientes de determinação genotípica e quando o índice de variação é superior a unidade.

Genética da eficiência no uso de fósforo em plantas

Ao dar início a um programa de melhoramento de plantas, uma abordagem muito importante que deve ser considerada, é o conhecimento do tipo de controle genético da característica de interesse da cultura. O conhecimento da variabilidade fenotípica herdável e as ações gênicas envolvidas na herança da característica

ajudam o melhorista na escolha dos métodos de melhoramento mais adequados em programas de melhoramento. Em grande relevo, o conhecimento da herança tem sido aplicado ao estudo de características relacionadas à eficiência no uso do fósforo, que por sinal, tem se mostrado complexo pelo fato das características serem tipicamente quantitativas, governadas por vários genes e bastante influenciadas pelo ambiente.

Nos estudos de característica de eficiência no uso de fósforo, culturas como sorgo e trigo têm sido avaliadas quanto à absorção e acúmulo de fósforo nas fases de plântulas (Ahsan et al., 1996; Gorz et al., 1987). Estes estudos revelam a importância dos efeitos aditivos, bem como dos efeitos não-aditivos no controle da característica de eficiência no uso do fósforo. Em outros trabalhos avaliando eficiência no uso de fósforo em plântulas de milho em solução nutritiva foi mostrado que a característica de EUP foi predominantemente controlada por genes de efeito aditivo (Furlani et al., 1998).

No entanto, deve-se destacar que resultados obtidos em fase de plântulas, podem não coincidir com resultados obtidos em experimentos conduzidos até o ciclo final da cultura. Nesse aspecto, experimentos em condições de campo são fundamentais para maior compreensão dos efeitos gênicos das características relacionadas à eficiência no uso de fósforo.

No que se refere a investigações da herança, Parentoni e Souza Jr. (2008), avaliando a cultura do milho em condições de campo, obtiveram resultados sobre as relações entre caracteres de eficiência e resposta ao fósforo, com base nas estimativas de médias e variâncias e concluíram que os efeitos de dominância foram superiores que aos aditivos para a maioria dos caracteres estudados. Parentoni (2000) avaliando um dialelo entre 13 linhagens de milho, constataram que os efeitos não-aditivos foram superiores aos aditivos para a variável gramas de grão produzido por gramas de fósforo no grão, que é o quociente de utilização.

Os estudos demonstrando que as características relacionadas à eficiência no uso do fósforo são do tipo poligênicas revelaram que o mapeamento de QTL's e seleção assistida por marcadores no melhoramento genético, podem auxiliar no entendimento da genética e dos mecanismos envolvidos no controle a na eficiência do uso de fósforo, podendo ser aplicados em programas de melhoramento.

Em uma população de linhagens recombinantes de milho, Zhu et al. (2006) realizaram o mapeamento de QTL's para comprimento e número de raízes

seminais sob baixo fósforo. Os autores detectaram um QTL de grande efeito para comprimento de raiz e três para número de raízes, correspondendo a 11 % e 25,4 % da variância fenotípica, respectivamente. Com o objetivo de determinar QTL's para eficiência no uso de fósforo pela parte aérea (SPUE), eficiência de uso de fósforo pela planta inteira (WPUE) e relação raiz/parte aérea em milho (RSR), Chen et al. (2009) avaliaram 241 famílias $F_{2:3}$ de milho em ambientes contrastantes quanto a disponibilidade de fósforo. Constatou-se que no ambiente de baixo fósforo, a eficiência no uso do nutriente pela parte aérea da planta e, mesmo, pela planta inteira, foi controlada por apenas um QTL. Por sua vez, no ambiente sem estresse ao fósforo, os locos de QTL's foram os mesmos para eficiência no uso de fósforo pela parte aérea da planta e para eficiência de uso de fósforo pela planta inteira. Estes resultados podem ser úteis para programas de melhoramento em seleções assistidas por marcador para identificar genótipos eficientes ao fósforo.

Estratégias e métodos de melhoramento para eficiência no uso do fósforo

Para a implementação de estratégia de melhoramento para eficiência no uso do P, é fundamental a identificação de genótipos superiores, podendo ser linhagens, cultivares comerciais, variedades e até acessos de germoplasma. É aconselhável a preferência na escolha da população-base por genótipos que já sejam adaptados à região de interesse, e que já tenham certo grau de melhoramento, pois problemas devido à falta de adaptação e frequência de alelos deletérios serão evitados, e certamente progressos genéticos mais rápidos poderão ser alcançados (Parentoni et al., 2011).

De acordo com as pesquisas já existentes sobre o tipo de herança para eficiência no uso do fósforo em algumas culturas, sabe-se que tanto os efeitos genéticos aditivos quanto os não-aditivos são importantes no controle desta característica. No entanto, a maioria tem revelado que os efeitos não-aditivos têm sido mais importantes, como ocorre com o milho comum, sorgo, trigo, arroz e feijão (Parentoni e Souza Jr., 2008).

Em plantas autógamas, em que as linhas puras são comercializadas, a formação de populações de melhoramento deve ser baseada em hibridações entre genótipos superiores, que apresentem altas frequências de alelos favoráveis para eficiência no uso do fósforo. Nesse caso, pode-se empregar os métodos de melhoramento para plantas autógamas para conduzir as populações segregantes

e obtenção de genótipos superiores. Dentre os métodos, citam-se o genealógico (*pedigree*), *bulk* segregante (método da população), SSD (*Single Seed Descendent*) e suas variações. Os métodos de seleção recorrente, duplo-haplóide, entre outros também podem ser utilizados (Parentoni et al., 2011).

Em culturas cuja utilização comercial de híbridos é viável, a exploração da heterose é a melhor estratégia (Allard, 1960). Até mesmo em culturas autógamas de importância, como arroz e sorgo, nos últimos anos a exploração da heterose tem-se mostrado bastante promissora, e grande parte das cultivares lançadas destas culturas são híbridos (Xie e Hardy, 2009).

Além dos métodos clássicos de melhoramento, a biotecnologia tem avançado de forma acelerada em suas pesquisas e tem contribuído bastante para a obtenção de genótipos eficientes no uso do fósforo. Como as características relacionadas à eficiência no uso de fósforo tem se mostrado de herança complexa, o mapeamento de regiões cromossômicas de características quantitativas, ou QTL, é uma estratégia molecular que pode contribuir no entendimento dos mecanismos genéticos envolvidos no controle das características. Além disso, podem ser utilizadas em programas de melhoramento via seleção assistida por marcadores moleculares, seleção genômica ou até mesmo transgenia (Parentoni et al., 2011). Inúmeros QTL's para eficiência no uso do fósforo têm sido identificados em diversas culturas (Ochoa et al., 2006; Chen et al., 2009; Zhang et al., 2009; Su et al., 2009). A maioria desses QTL's identificados estão relacionados a características de desenvolvimento radicular e da capacidade das plantas em liberar ácidos orgânicos que solubilizam o fósforo no solo.

3.2.3. MATERIAL E MÉTODOS

Condições experimentais e obtenção dos híbridos

Vinte e cinco linhagens S₇ de milho-pipoca do Programa de Melhoramento da UENF foram selecionadas quanto à eficiência e responsividade ao uso do fósforo; das quais, oito foram utilizadas neste estudo (Gerhardt et al., 2017). Três das linhagens foram classificadas como eficientes e responsivas ao uso do fósforo (ER), outras três linhagens foram classificadas como ineficientes e não-responsivas

ao uso do fósforo (INR) e duas linhagens foram classificadas como intermediárias na eficiência e responsividade ao uso do fósforo. Vale ressaltar que para estudos de herança e tipos de ação gênica predominante para determinado caráter, o uso de genótipos contrastantes e com simetria alélica é primordial nos estudos de análise dialélica. As linhagens ER utilizadas foram: P2, P7 e L59; as linhagens INR utilizadas foram: L77, L75 e L80; e as linhagens intermediárias, foram: P6 e L76.

Para a obtenção dos híbridos, cada uma das linhagens foi semeada em nove linhas de 5,00 m, espaçadas em 1,00 m entre linhas e 0,20 m entre plantas, e semeadas em três intervalos de sete dias para que houvesse sincronização do florescimento masculino e feminino e garantisse o cruzamento entre todas as linhagens. Os cruzamentos controlados seguiram o esquema dialélico completo, compondo 28 híbridos simples, os oito genitores e desconsiderando os híbridos recíprocos, de acordo com a Tabela 7, totalizando 36 tratamentos.

Os ensaios de avaliação foram conduzidos no verão 2015/2016 em dois locais e, em cada local, com dois ambientes contrastantes quanto à disponibilidade de fósforo. Os locais foram: Colégio Agrícola Estadual Antônio Sarlo, localizado no município de Campos dos Goytacazes – RJ (Latitude 21° 42' 48" S, Longitude 41° 20' 38" O), com altitude de 14 m; e Estação Experimental do município de Itaocara – RJ (Latitude 21° 38' 50" S, Longitude 42° 03' 46" O), com altitude de 58 m. O clima que caracteriza os municípios de Campos dos Goytacazes e Itaocara é classificado como clima Tropical (Aw), apresentando verões quentes e invernos amenos, com tendência de concentração de chuvas nos meses de verão.

O delineamento experimental utilizado foi látice triplo 6 x 6. A semeadura foi realizada no sistema de plantio convencional. Cada parcela experimental constituiu-se por uma linha de 5,00 m, espaçada em 0,70 m entre linhas e em 0,20 m entre plantas, totalizando 25 plantas por parcela.

Tabela 7. Esquema de cruzamentos dialélico entre oito linhagens de milho-pipoca contrastantes para eficiência e responsividade no uso do fósforo.

Linhagens		ER			Intermediárias		INR		
♂	♀	P2	P7	L59	P6	L76	L77	L75	L80
		ER	P2	X	X	X	X	X	X
P7			X	X	X	X	X	X	X
L59				X	X	X	X	X	X
Inter.	P6				X	X	X	X	X
	L76					X	X	X	X
INR	L77						X	X	X
	L75							X	X
	L80								X

Caracterização dos ambientes avaliados em relação à disponibilidade de fósforo

Antes da implantação dos ensaios de avaliação, foi realizada a análise química dos solos para caracterização dos ambientes de alta e baixa disponibilidade de fósforo nos solos, a partir de amostras coletadas nas camadas de 0-10 e de 10-20 cm, intercaladas em linhas e entrelinhas formando uma amostra composta a partir de 10 subamostras, conforme Tabela 8, sendo que os níveis de disponibilidade de fósforo de acordo com os teores de argila dos solos de Campos dos Goytacazes e de Itaocara foram classificados como baixos (Novais et al., 2007).

Tabela 8. Análise química e granulométrica do solo nos locais de Campos dos Goytacazes e Itaocara, RJ.

Local	pH	P	K	Ca	Mg	Al	Na	C	MO	CTC	SB	V	Argila
	H ₂ O	mg/dm ³		mmol c/dm ³				g/dm ³		mmol c/dm ³		%	g/dm ³
Campos	6,0	7,0	4,3	17,9	13,5	0,0	1,3	9,7	22,0	61,2	40,9	64,0	305,0
Itaocara	5,8	10,0	3,2	24,9	29,8	0,0	1,4	10,6	18,1	82,1	65,0	79,0	140,0

A adubação de plantio para o ambiente de disponibilidade ideal de fósforo constituiu-se de 30 kg ha⁻¹ de N, 85 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 40 kg ha⁻¹ de K₂O. Para o ambiente sob baixa disponibilidade de fósforo, a adubação de plantio constituiu-se de 30 kg ha⁻¹ de N, 0 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 40 kg ha⁻¹ de K₂O. A adubação de cobertura foi realizada nos dois ambientes, quando as plantas atingiram o estágio fenológico V6, na dosagem de 100 kg ha⁻¹ de nitrogênio.

A capacidade de suprimento dos macronutrientes primários nas áreas experimentais foi obtida conforme a recomendação de adubação para a cultura do milho-pipoca, considerando a quantidade de nutrientes no solo na camada de 0 a 20 cm, fornecida pela análise química, com exceção ao fósforo no ambiente de baixo fósforo, que foi zero.

Os demais tratos culturais foram realizados de acordo com a recomendação para a cultura na região. Os experimentos receberam irrigação suplementar sempre que necessária para evitar a ocorrência de estresse hídrico.

Fenotipagem

Foram avaliadas as seguintes características: i) altura de planta (AP) – expressa em cm, quantificada com o auxílio de uma régua graduada do solo até a inserção da folha bandeira; ii) altura de inserção de espiga (AE) – expressa em cm, quantificada com o auxílio de uma régua graduada do solo até a inserção da primeira espiga; iii) florescimento masculino (FM), expresso pelo número de dias no momento em que 50 % das plantas da unidade experimental começaram a abrir as anteras do pendão; iv) florescimento feminino (FF), expresso pelo número de dias no momento em que 50 % das plantas da unidade experimental começaram a soltar os estilo-estigmas da espiga; v) intervalo de florescimento (IF) – determinado pela diferença entre o número de dias do florescimento masculino e feminino; vi) tamanho de espiga (TE) – estimado pela média do comprimento de 5 espigas despalhadas, expresso em cm; vii) diâmetro da espiga (DE) – quantificado pela média do diâmetro de 5 espigas despalhadas, expresso em mm; viii) peso de 100 grãos (P100) – obtido pela média do peso de duas amostras aleatórias de 100 grãos; ix) produtividade (PROD) – expressa pela média da produção de grãos da unidade experimental em gramas por parcela, corrigida para 13 % de umidade e extrapolada para kg ha⁻¹; x) capacidade de expansão (CE) – obtida pela relação entre o volume de pipoca expandida e a massa de 30 g, expressa em mL g⁻¹,

utilizando-se a média de duas amostras por parcela; e xi) volume de pipoca expandida por hectare (VP) – obtido pelo produto entre produtividade e capacidade de expansão, e o valor obtido foi dividido por 1000, expresso em $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$.

Metodologia de classificação e índice de eficiência no uso do fósforo

Foram utilizadas três metodologias para identificar e classificar os híbridos dialélicos quanto à eficiência e responsividade no uso do fósforo. A primeira foi realizada a partir dos desvios das médias do rendimento de grãos de cada híbrido em relação à média de produtividade de grãos de cada ambiente, em que as mesmas foram plotadas em gráfico de dispersão, sendo que o eixo das abcissas representou os desvios em alto nível de fósforo (responsividade no uso do fósforo) e o eixo das ordenadas, os desvios em baixo nível de fósforo (eficiência no uso do fósforo).

A expressão utilizada para classificação dos híbridos quanto à eficiência no uso do fósforo foi:

$$E_{\text{uso}} = Y_{\text{IL}} - Y_{\text{EL}} ,$$

Em que:

Y_{IL} : produtividade média de grãos do híbrido 'i' no ambiente de baixa disponibilidade de fósforo; e

Y_{EL} : produtividade média de grãos do ambiente de baixa disponibilidade de fósforo.

Para a classificação dos híbridos quanto à responsividade no uso do fósforo, considerou-se:

$$R_{\text{uso}} = Y_{\text{IH}} - Y_{\text{EH}} ,$$

Em que:

Y_{IH} : produtividade média de grãos do híbrido 'i' no ambiente com alta disponibilidade de fósforo; e

Y_{EH} : produtividade média de grãos no ambiente com alta disponibilidade de fósforo.

Assim, os híbridos foram distribuídos em quatro quadrantes no gráfico de dispersão, dependendo do desempenho produtivo nos ambientes contrastantes quanto à disponibilidade de fósforo: eficientes e não-responsivos (ENR); eficientes e responsivos (ER); ineficientes e responsivos (IR); e ineficientes e não-responsivos (INR).

A segunda metodologia foi o índice de eficiência proposto por Parentoni et al. (2001). Para este índice, além da PROD, também foram consideradas as características CE e VP nos dois ambientes contrastantes ao fósforo. Nesse índice, é utilizado um ponderador que possibilita a seleção de genótipos com tendência a serem mais eficientes do que responsivos no uso do fósforo. A expressão utilizada para este índice foi a seguinte:

$$IE = [(Y_{iL} \times Y_{iH}) / (E_L \times E_H)] \times (Y_{iL} / E_L) ,$$

Em que:

Y_{iL} : produtividade média do genótipo "i" no ambiente de baixo fósforo;

Y_{iH} : produtividade média do genótipo "i" no ambiente de alto fósforo;

E_L : média geral de produtividade no ambiente de baixo fósforo; e

E_H : média geral de produtividade no ambiente de alto fósforo.

A terceira metodologia utilizada para classificar os híbridos em sua eficiência no uso do fósforo foi implementada pela expressão proposta por Fisher et al. (1983), a qual também é utilizada para realizar seleções simultâneas nos ambientes de baixo e alto nível de fósforo no solo. Por esse estimador, os genótipos são classificados como eficientes quando atingem valores do índice acima da média, uma vez que são utilizadas as médias gerais dos ambientes contrastantes. Para este índice, também foram consideradas as características PROD, CE e VP. A expressão utilizada para este índice foi a seguinte:

$$EUP = (Y_{iL} / Y_{iH}) * (E_L / E_H) ,$$

Em que:

Y_{iL} : produtividade média do genótipo "i" no ambiente de baixo fósforo;

Y_{iH} : produtividade média do genótipo "i" no ambiente de alto fósforo;

EL: média geral de produtividade no ambiente de baixo fósforo; e

EH: média geral de produtividade no ambiente de alto fósforo.

Análises genético-estatísticas

Para a realização das análises genético-estatísticas, foram utilizados os recursos computacionais do *software* Genes (Cruz, 2013). A partir das características mensuradas nos tratamentos, primeiramente foi realizada a análise de variância individual para os ambientes com alto e baixo nível de fósforo e análise conjunta para os dois ambientes. Para as variáveis PROD, CE e VP foi realizado o agrupamento de médias pelo algoritmo de Scott e Knott (1974) a 5 % de probabilidade.

A análise dialélica para determinação da capacidade combinatória foi realizada de acordo com o Método 2 do Modelo de Griffing (1956), em que foram avaliadas $p(p+1)/2$ combinações correspondentes aos genitores e seus híbridos F_1 's, empregando o Modelo B, considerando efeito fixo para genótipos. Foi realizado o desdobramento dos efeitos de tratamentos em capacidade geral de combinação (CGC) e capacidade específica de combinação (CEC), considerando o seguinte modelo estatístico:

$$Y_{ijk} = m + g_i + g_j + s_{ij} + l_k + gl_{ijk} + sl_{ijk} + e_{ijk},$$

Em que:

Y_{ijk} : valor médio da combinação híbrida ($i \neq j$) ou do genitor ($i = j$) no k-ésimo local;

m : média geral;

g_i, g_j : efeitos da capacidade geral de combinação do i -ésimo e j -ésimo genitor, respectivamente;

s_{ij} : efeito da capacidade específica de combinação para os cruzamentos entre os genitores de ordem i e j ; e

l_k : efeito fixo do k-ésimo local;

gl_{ijk} : efeito da interação da capacidade geral de combinação do i -ésimo e j -ésimo genitor com local;

sl_{ijk} : efeito da interação da capacidade específica de combinação para os cruzamentos entre os genitores de ordem i e j com local;

e_{ijk} : erro experimental médio.

Os estimadores dos componentes quadráticos dos efeitos fixos associados a CGC (Φ_g) e CEC (Φ_s) foram:

$$\Phi_g = \frac{QMGxL - QMR}{p + 2}$$

$$\Phi_s = QMSxL - QMR$$

Em que:

p : número de genitores;

$QMGxL$: quadrado médio da interação entre CGC e local;

$QMSxL$: quadrado médio da interação entre CEC e local; e

QMR : quadrado médio do resíduo.

3.2.4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Eficiência e responsividade no uso do fósforo de híbridos de milho-pipoca

Excetuando-se o intervalo de florescimento (IF) no ambiente sem estresse nutricional, houve diferença significativa entre os genótipos em 1 % de probabilidade para as demais características avaliadas nos ambientes de baixo e alto nível de fósforo no solo, o que indica a presença de variabilidade genética entre os genótipos avaliados (Tabelas 9 e 10). Seguramente, estes genótipos poderão ser utilizados como população-base para utilização em programas de melhoramento visando maior eficiência e responsividade no uso de fósforo.

A fonte de variação ambiente (A) que compreende os locais de Campos dos Goytacazes e Itaocara foi significativa para a maioria das características avaliadas, com exceção de CE nos ambientes de baixo fósforo, e para a FF e P100 nos ambientes de alto fósforo no solo. Tem-se, pois, a evidência de que os ambientes em que os genótipos foram submetidos exerceram influência na expressão diferenciada das características em estudo. A capacidade de expansão (CE) tem sido propalada ser oligogênica (Dofing et al., 1991) de alta herdabilidade

(Pereira e Amaral Junior, 2001; Arnholdt et al., 2009) e controlada por três a cinco genes principais (Ziegler, 2001; Lu et al., 2003). Trata-se, por conseguinte, de característica que tem pouca variação genotípica por fatores ambientais. Não por acaso, Yu-Ling et al. (2006), investigando a consistência de QTL's para capacidade de expansão em híbridos avaliados em diferentes ambientes, observaram pouca variação fenotípica entre genótipos, a despeito das épocas diferentes de plantio em que foram cultivados.

A significância da interação genótipo por ambiente para PROD e VP em alto fósforo; e de CE em baixo e alto fósforo, aponta que a classificação dos genótipos foi alterada nos ambientes (locais) em que foram avaliados, sendo necessário, nesse caso, segundo Vencovsky e Barriga (1992), realizar a prática da seleção dos genótipos específica para cada ambiente.

A média geral da maioria das características morfoagronômicas – AP, AE, TE, DE, P100, PROD, CE e VP – foram superiores nos ambientes de alto nível de fósforo comparado ao ambiente de baixo fósforo (Tabelas 9 e 10). Claramente pôde-se observar que o fósforo tenha sido a principal razão da ocorrência de menores médias das características avaliadas nos ambientes com baixo nível do nutriente no solo. Isto porque é consabido que o fósforo é um componente vital da célula, exercendo funções no metabolismo das plantas, como o crescimento e o desenvolvimento na fase inicial das plantas, sendo, pois, responsável pelo "arranque" inicial, bem como na maturidade das plantas e na formação das sementes (Fernandes e Muraoka, 2002).

Tabela 9. Análise de variância conjunta para onze características avaliadas em híbridos e parentais de milho-pipoca em ambiente de baixo nível de fósforo no solo. Campos dos Goytacazes e Itaocara, RJ.

FV	GL	Quadrado Médio - Baixo Fósforo										
		AP	AE	FM	FF	IF	TE	DE	P100	PROD	CE	VP
Genótipos (G)	35	1799,52 **	856,23 **	22,48 **	27,26 **	2,13 **	16,01 **	56,27 **	6,58 **	3897128,78 **	40,75 **	3033,20 **
Ambientes (A)	1	405,08 *	602,67 **	17,80 **	15,04 **	65,56 **	241,39 **	465,16 **	50,01 **	4096941,50 **	10,40 _{ns}	2138,34 **
G x A	35	291,92 **	72,44 _{ns}	3,86 **	5,11 **	2,06 **	1,78 **	7,09 **	2,93 **	73196,13 _{ns}	9,21 *	73,77 _{ns}
Erro	110	85,85	52,89	1,51	1,69	0,85	0,92	1,46	0,79	97233,69	6,37	97,63
Média		178,29	100,13	55,00	58,83	3,83	14,30	28,91	11,48	2071,37	25,77	53,69
Eficiência do Látice (%)												
Campos		101,17	102,62	159,07	143,65	97,03	96,62	100,47	104,39	101,14	101,59	101,71
Itaocara		135,05	153,53	95,25	107,20	100,49	117,07	100,31	101,79	89,50	95,95	92,76
C.V. (%)												
Campos		4,26	6,28	2,23	2,39	25,18	5,85	3,85	6,79	15,11	10,22	16,94
Itaocara		6,01	8,18	2,24	2,01	23,13	7,68	4,55	8,74	14,95	9,34	19,43

_{ns}: não-significativo; *, *: significativo ao nível de 5 % e 1 % de probabilidade, respectivamente, pelo teste F. AP: altura de planta; AE: altura de espiga; FF: florescimento feminino; FM: florescimento masculino; IF: intervalo de florescimento masculino e feminino; DE: diâmetro de espiga; TE: comprimento de espiga; P100: peso de 100 grãos; PROD: produtividade de grãos; CE: capacidade de expansão; e VP: volume de pipoca por hectare.

Tabela 10. Análise de variância conjunta para onze características avaliadas em híbridos e parentais de milho-pipoca em ambiente de alto nível de fósforo no solo. Campos dos Goytacazes e Itaocara, RJ.

FV	GL	Quadrado Médio - Alto Fósforo										
		AP	AE	FM	FF	IF	TE	DE	P100	PROD	CE	VP
Genótipos (G)	35	1739,30 **	713,66 **	30,22 **	32,58 **	0,97 ns	10,65 **	38,78 **	7,45 **	4180396,60 **	51,04 **	3387,81 **
Ambientes (A)	1	6976,86 **	2945,95 **	34,24 **	0,17 ns	39,18 **	55,45 **	86,20 **	1,02 ns	2752883,66 **	10,93 *	3184,97 **
G x A	35	157,55 **	78,25 ns	1,99 *	2,37 **	0,74 ns	2,08 **	9,73 **	2,03 **	104633,67 **	11,47 **	160,89 **
Erro	110	64,84	56,47	1,31	1,39	0,74	0,75	0,99	0,55	51494,42	3,01	52,60
Média		192,11	110,20	53,76	54,99	1,23	17,06	29,54	11,97	2315,44	26,56	61,77
Eficiência do Látice (%)												
Campos		143,10	154,51	109,99	102,02	97,71	93,32	98,03	101,36	102,45	93,88	98,93
Itaocara		154,49	151,73	124,33	114,28	93,46	108,88	101,19	108,43	98,75	92,21	100,90
C.V. (%)												
Campos		3,60	5,66	2,11	2,09	81,91	4,82	3,65	6,31	9,36	7,72	12,56
Itaocara		4,65	7,69	2,14	2,05	61,76	5,37	3,05	6,11	10,13	5,13	11,01

ns: não-significativo; *, *: significativo ao nível de 5 % e 1 % de probabilidade, respectivamente, pelo teste F. AP: altura de planta; AE: altura de espiga; FF: florescimento feminino; FM: florescimento masculino; IF: intervalo de florescimento masculino e feminino; DE: diâmetro de espiga; TE: comprimento de espiga; P100: peso de 100 grãos; PROD: produtividade de grãos; CE: capacidade de expansão; e VP: volume de pipoca por hectare.

O ambiente com baixo nível de fósforo promoveu um retardamento na liberação de pólen e do estilo-estigma das plantas e, conseqüentemente, houve um aumento no intervalo entre florescimentos masculino e feminino, na comparação com o ambiente com adequado nível de fósforo (Tabelas 9 e 10). Nesse aspecto, a sincronização do florescimento masculino com o feminino é diretamente vinculada ao rendimento de grãos na cultura do milho. Em condições de estresses abióticos, há um retardo no florescimento feminino em relação ao masculino, resultando numa assincronia e insuficiência de pólen durante a emissão do estilo-estigmas, por conseguinte, ocorre o abortamento de grãos (Mendes et al., 2015). Considerada uma característica de fundamental importância para a produtividade do milho, a sincronia do florescimento tem sido avaliada em experimentos com estresses abióticos, como ocorreu em pesquisas com deficiência hídrica (Ribault et al., 1996; Kamphorst et al., 2017), deficiência de nitrogênio (Laffite e Edmeades, 1994), e até mesmo para tolerância a solos ácidos (Welcker et al., 2005). Bolaños e Edmeades (1993) relataram reduções de 8,70 % no rendimento de grãos de milho para cada dia de intervalo entre florescimentos masculino e feminino em famílias de irmãos-completos quando avaliados em ambientes sob estresse hídrico. O intervalo de florescimento é, portanto, característica fundamental para ser incluída em índices de seleção ou, de forma mais simples, ser utilizada na seleção truncada indireta, no intento de aumentar a eficiência da seleção para ambientes com deficiência de fósforo.

A estrutura de disponibilização dos tratamentos em látice e a conseqüente análise de variância considerando a recuperação da informação interblocos foi mais eficiente que o delineamento em blocos ao acaso para a maioria das características avaliadas nos ambientes de baixo e alto fósforo (Tabelas 9 e 10). Considerando-se a expressão conjunta nos locais, tem-se que apenas IF e TE se repetiram como características em que o látice foi de menor eficiência, tanto no ambiente de alto quanto de baixo fósforo, concomitantemente, para a localidade de Campos dos Goytacazes. Por uma análise idêntica, na localidade de Itaocara, as eficiências de PROD e CE foram as que, em conjunto, expressaram-se de menor proveito na utilização do látice, quando se consideram os dois níveis de fósforo. Conclui-se, assim, que o emprego do látice utilizando as médias ajustadas, foi opção adequada para o delineamento dos tratamentos. Esse procedimento analítico tem sido mais

amplamente propalado no melhoramento de plantas por Ramalho et al. (2000) e, de forma mais generalizada, por Pimentel Gomes (2009).

Os ambientes com estresse nutricional revelaram maiores estimativas do coeficiente de variação experimental (CVs) na comparação com os ambientes sem estresse nutricional (Tabelas 9 e 10), porém, de maneira geral foram de baixa grandeza, indicando boa precisão experimental (Pimentel Gomes e Garcia 2002). Em experimentações com estresses abióticos, são consideradas normais maiores magnitudes de estimativas de coeficientes de variação experimental. Nessas condições, os solos com baixa disponibilidade nutricional são mais heterogêneos e a tendência esperada é que haja uma redução no potencial produtivo, conseqüentemente, nas médias das características, que se tornam menores, ao passo que os quadrados médios do resíduo elevam-se. As pesquisas de Camargo (1984), Santos et al. (2016) e Reis et al. (2017) foram exemplos de obtenção de CVs de maiores magnitudes nos ambientes com estresse nutricional quando avaliaram a variabilidade genotípica de milho e trigo em ambientes contrastantes para o nitrogênio e o fósforo, respectivamente.

Sob o aspecto adaptativo, pode-se supor haver uma pressão de seleção mais imponente nos ambientes estressantes, levando à maior expressão da variação genotípica. Essa pode ser a razão dos estudos de Moura et al. (1999), Sávio et al. (2008), Silva et al. (2015), Santos et al. (2017) e, mesmo no trabalho prévio das linhagens com milho-pipoca (Gerhardt et al., 2017) terem revelado maior variabilidade genotípica para o ambiente estressante. Em específico ao fósforo, aventa-se que uma das razões da maior expressão da variabilidade genética em condição de estresse esteja vinculada à adaptação prévia dos genótipos para se tornarem responsivos apenas a elevadas dosagens do nutriente. Ao longo dos sucessivos ciclos de cultivo, isso pode ter gerado uma evolução desfavorável ao ambiente estressante, implicando em maior desuniformidade genotípica em cultivos conduzidos em solos deficientes no nutriente.

Para as características de maior importância econômica para a cultura do milho-pipoca - PROD, CE e VP -, houve reduções de 12, 3 e 13 %, respectivamente, na média geral do ambiente de baixa disponibilidade de fósforo em relação àquele com alta disponibilidade do nutriente (Tabela 11). Porém, houve híbridos que expressaram reduções de até 49 % no rendimento de grãos no ambiente de baixo fósforo em relação ao ambiente de alto fósforo. A literatura recomenda que a

intensidade do estresse deva ser capaz de reduzir o potencial produtivo entre 40 e 60 %, no entanto, o nível de estresse não deve reduzir drasticamente a variabilidade genética por perda de plantas na parcela, ou por produtividades próximas de zero, pois nesse caso, comprometeria a identificação dos genótipos superiores (Parentoni et al., 2011). Parentoni et al. (2010), investigando a herança das características envolvidas na eficiência do uso do fósforo em milho tropical observaram reduções de até 47 % no rendimento de grãos entre os ambientes contrastantes de fósforo.

A indução do estresse ao fósforo em condições de campo muitas vezes pode ser uma tarefa não tão fácil, pois trata-se de um elemento que não tem mobilidade no solo e é elevado o risco de haver manchas de solo sem a realização prévia da caracterização dos sítios experimentais com base em levantamentos do histórico do solo, fotos aéreas e confecção de mapas de interpolação para o fósforo. Além disso, os solos tropicais têm como característica a alta adsorção do fósforo, tornando-o não disponível para as plantas. Por isso, ao realizar a adubação fosfatada, deve-se ter cuidado para que a quantidade de fósforo adicionada ao solo seja suficiente para discriminar efetivamente os ambientes. Este trabalho de eficiência no uso do fósforo em milho-pipoca em condições de campo foi o pioneiro a ser realizado na UENF, e seguramente servirá como base para futuros trabalhos que almejam discriminar ainda mais os ambientes e os genótipos na disponibilização de fósforo no solo.

No ambiente com estresse induzido, a estimativa da média de produtividade foi de 2.071,37 kg ha⁻¹ (Tabela 11), havendo a formação de sete grupos distintos; por sua vez, no ambiente sem estresse nutricional, a estimativa da média foi de 2.315,44 kg ha⁻¹, com a formação de nove grupos pelo algoritmo de Scott e Knott (1974), revelando uma considerável variabilidade entre os genótipos que pode ser explorada em programas de melhoramento. O híbrido que deteve a maior média no rendimento de grãos em ambos ambientes foi P6 x L75, com 3.862,42 e 3.994,75 kg ha⁻¹, para os ambientes de baixo e alto fósforo, respectivamente. Ora, para a cultura do milho-pipoca, estimativa de rendimento de grãos superior a 3.000,00 kg ha⁻¹ em ambiente com restrição na disponibilidade de fósforo é um resultado absolutamente alvissareiro quando se vislumbra uma agricultura sustentável, quer sob o aspecto ecológico e, ou econômico.

Tabela 11. Estimativas de médias de produtividade de grãos (PROD), da capacidade de expansão (CE) e do volume de pipoca por hectare (VP) de 36 genótipos de milho-pipoca cultivados em ambientes com baixa e alta disponibilidade de fósforo.

Genótipo	PROD (Kg.ha ⁻¹)		CE (mL.g ⁻¹)		VP (m ³ .ha ⁻¹)	
	Baixo P	Alto P	Baixo P	Alto P	Baixo P	Alto P
P2	1437,35 e	1796,83 f	20,96 d	21,80 d	29,98 e	39,45 f
P7	1707,80 d	2127,77 e	27,22 b	30,80 a	46,13 d	65,07 d
L59	1905,77 d	2472,76 d	23,04 c	24,00 c	44,19 d	59,32 d
P6	1552,54 e	1729,02 f	24,01 c	26,70 c	37,69 e	46,47 f
L76	953,71 f	1124,97 g	26,29 b	27,90 b	25,64 f	32,16 g
L77	507,03 g	774,90 h	26,05 b	25,30 c	13,20 g	19,43 h
L75	386,35 g	504,50 i	20,00 d	20,10 d	7,67 g	9,95 h
L80	343,90 g	401,19 i	29,49 a	31,00 a	10,55 g	12,17 h
P2 x P7	2359,40 c	2006,47 e	25,22 b	27,48 b	58,99 c	55,37 e
P2 x L59	1951,18 d	1773,51 f	22,83 c	23,06 d	43,93 d	41,23 f
P2 x P6	1990,21 d	2184,32 e	22,72 c	25,00 c	44,52 d	54,57 e
P2 x L76	1814,20 d	2083,60 e	24,70 c	24,85 c	45,26 d	52,53 e
P2 x L77	2007,60 d	2159,76 e	23,63 c	25,73 c	46,79 d	56,05 e
P2 x L75	2491,73 c	2857,63 c	23,53 c	21,52 d	58,44 c	61,39 d
P2 x L80	1905,39 d	2134,87 e	24,49 c	26,58 c	46,62 d	56,68 e
P7 x L59	2905,84 b	3333,46 b	29,69 a	27,92 b	85,90 a	93,00 a
P7 x P6	2293,87 c	2613,54 d	28,33 a	30,56 a	65,68 b	80,63 c
P7 x L76	2960,35 b	3213,04 b	29,59 a	29,71 a	88,13 a	95,32 a
P7 x L77	2736,51 b	3106,86 b	27,36 b	30,58 a	75,07 b	95,05 a
P7 x L75	3058,55 b	3284,67 b	27,33 b	26,37 c	83,17 a	86,66 b
P7 x L80	3057,82 b	3134,64 b	29,32 a	31,44 a	88,72 a	98,12 a
L59 x P6	2690,12 b	2899,81 c	25,92 b	26,15 c	69,41 b	75,68 c
L59 x L76	1737,63 d	2061,84 e	23,91 c	25,29 c	41,30 d	51,75 e
L59 x L77	1750,21 d	2150,25 e	27,94 a	26,17 c	49,04 d	56,17 e
L59 x L75	2634,36 c	2952,55 c	20,67 d	21,96 d	54,25 d	64,53 d
L59 x L80	1555,62 e	2081,99 e	26,90 b	27,02 b	41,89 d	55,64 e
P6 x L76	2615,98 c	2878,44 c	25,81 b	27,94 b	67,38 b	80,71 c
P6 x L77	2754,53 b	3006,07 c	27,61 a	28,81 b	75,94 b	86,69 b
P6 x L75	3862,42 a	3994,75 a	23,26 c	24,60 c	90,19 a	98,66 a
P6 x L80	2810,30 b	3113,48 b	29,33 a	29,67 a	82,90 a	92,03 a
L76 x L77	1203,27 e	1503,63 f	25,68 b	27,96 b	31,04 e	42,02 f
L76 x L75	2257,84 c	2555,88 d	25,68 b	23,75 c	57,78 c	60,35 d
L76 x L80	1206,70 e	1295,69 g	27,72 a	28,81 b	32,90 e	37,09 g
L77 x L75	2765,39 b	3103,30 b	26,53 b	24,62 c	73,36 b	77,00 c
L77 x L80	1792,40 d	2006,10 e	28,49 a	29,69 a	50,85 d	59,89 d
L75 x L80	2605,31 c	2933,74 c	26,31 b	25,48 c	68,41 b	74,82 c
Média	2071,37	2315,44	25,77	26,56	53,69	61,77

Médias seguidas pela mesma letra na coluna pertencem ao mesmo grupo pelo algoritmo de Scott-Knott (1974), ao nível de 5 % de probabilidade.

As estimativas de médias da capacidade de expansão (CE) nos ambientes contrastantes foram similares, com valores de 25,77 e 26,56 mL.g⁻¹ nos ambientes de baixo e alto fósforo, respectivamente, havendo a formação de quatro grupos pelo algoritmo de Scott e Knott, o que ratifica a reduzida influência ambiental sobre esta característica (Tabela 11). O híbrido que expressou a máxima estimativa de CE no ambiente de baixo fósforo foi P7 x L59, com valor de 29,69 mL.g⁻¹; e, no ambiente sem restrição de fósforo o maior valor ocorreu para o par P7 x L80, com estimativa de 31,44 mL.g⁻¹. Estes resultados apenas reiteram a baixa variação genotípica da capacidade de expansão por fatores ambientais, pois além da ausência de significância entre locais (Tabela 9), os níveis de fósforo exerceram pouca influência na média dos híbridos.

A característica volume de pipoca expandida por hectare (VP) reúne produtividade de grãos e capacidade de expansão, constituindo-se em supercaráter que tem sido utilizado para seleção de segregantes superiores no Programa de Seleção Recorrente Intrapopulacional da UENF (Amaral Junior et al., 2016). No presente trabalho, as estimativas de média de VP nos ambientes de baixo e alto nível de fósforo foram de 53,69 e 61,77 m³ ha⁻¹, havendo a formação de sete e oito grupos, respectivamente. O par P6 x L75, ao expressar a maior estimativa no VP em ambos ambientes - 90,19 e 98,66 m³ ha⁻¹ para baixo e alto P, respectivamente (Tabela 11) - poderia, então, ser uma oportunidade para registro no Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento Agrário. Porém, ao analisar com maior acuidade as expressões fenotípicas deste híbrido, constata-se que a proeminência para VP origina-se, em grande medida, das elevadas estimativas de PROD para o baixo (3.862,42 kg.ha⁻¹) e alto (3.994,75 kg.ha⁻¹) teor de fósforo no solo e não das estimativas de CE para os ambientes com baixo (23,26 mL.g⁻¹) e alto (24,60 mL.g⁻¹) teor de fósforo. Assim, a análise de VP não pode ser concebida *per se*, mas sim, há que ser amparada pelo conhecimento das estimativas de CE e PROD, concomitantemente. Inobstante, tal resultado assevera a necessidade de se desenvolver um algoritmo para maximizar a resposta seletiva para VP, porém, com restrição a valores mínimos aceitáveis de CE e PROD.

A dispersão gráfica dos genótipos nos quadrantes quanto à eficiência e responsividade no uso do fósforo, revelou que as combinações P6 x L75, P7 x L75, P7 x L80, P7 x L76, P7 x L59, P6 x L80, P7 x L77, L77 x L75, P6 x L77, L59 x P6, L59 x L75, L75 x L80, P6 x L76 e P2 x L75 foram eficientes e responsivas (ER), ou

seja, trata-se de genótipos que expressaram produtividade média superior às médias dos ambientes com baixo e alto nível de fósforo (Figura 4). Esses híbridos ER exibiram produtividades que variaram de 1.500,00 a 1.400,00 kg ha⁻¹ a mais que a média nos ambientes de baixo e alto nível de fósforo, respectivamente. Dos 14 híbridos classificados como ER, oito contiveram em sua genealogia pelo menos um genitor classificado como eficiente e responsivo *per se*, e os demais foram híbridos de linhagens classificadas como INR ou intermediárias. As linhagens genitoras do híbrido mais produtivo (P6 x L75, que produziu 3.862,42 e 3.994,75 kg ha⁻¹ nos ambientes de baixo e alto fósforo, respectivamente), foram previamente classificadas como intermediária e INR, demonstrando que nem sempre o cruzamento entre os genitores mais produtivos *per se* proporcionarão os melhores híbridos, remetendo à necessidade de reflexão sobre a importância do efeito de complementação alélica devido à presença de dominância, sobretudo quando o intento do programa de melhoramento é a exploração de híbridos heteróticos (Ramalho et al., 2012).

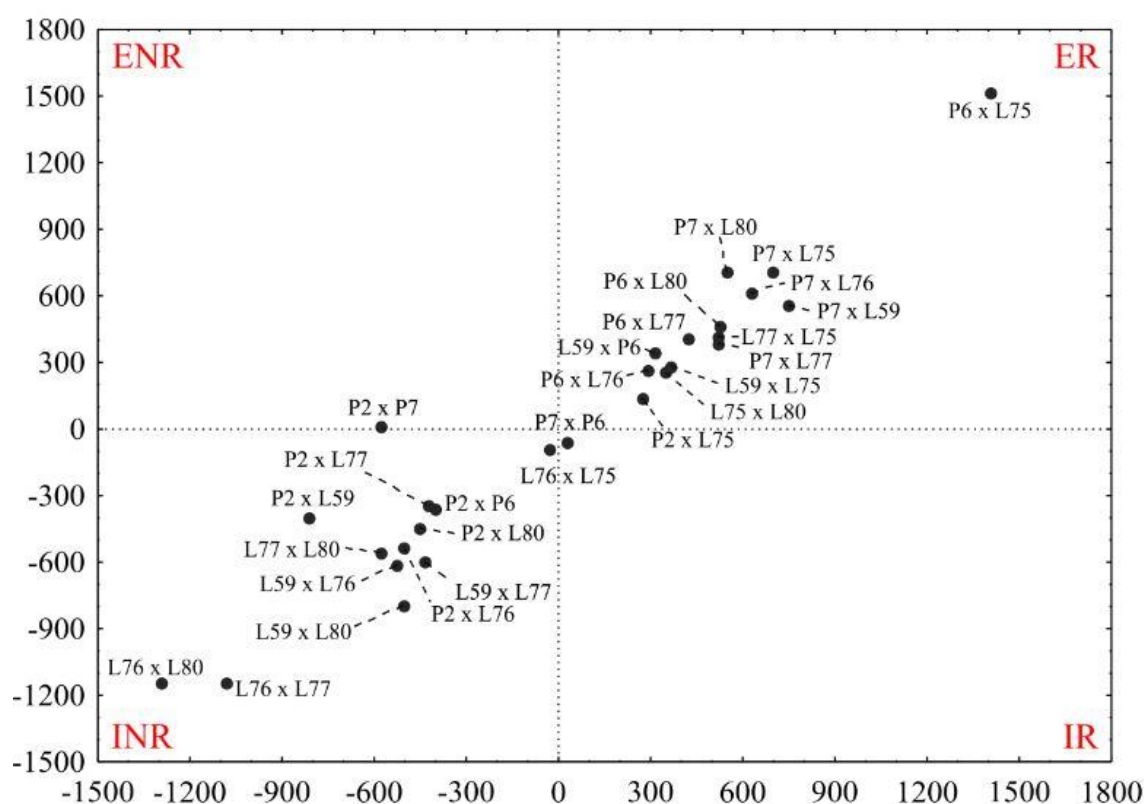


Figura 4. Dispersão gráfica de 28 híbridos de milho-pipoca quanto à eficiência no uso do fósforo. ER = eficiente e responsiva; ENR = eficiente e não-responsiva; IR = ineficiente e responsiva; e INR = ineficiente e não-responsiva.

Em contrapartida, os híbridos L76 x L75, P2 x P6, P2 x L77, P2 x L80, P2 x L59, P2 x L76, L77 x L80, L59 x L77, L59 x L76, L59 x L80, L76 x L77 e L76 x L80 foram classificados como ineficientes e não-responsivos (INR) (Figura 4), isto é, possuem produtividades médias inferiores nos ambientes com e sem estresse nutricional, cujas estimativas negativas variaram, respectivamente, de 1.100,00 a 1.300,00 kg ha⁻¹. Dos doze híbridos classificados como INR, oito contiveram a participação genealógica de pelo menos um genitor classificado como ineficiente e não-responsivo. As linhagens genitoras do híbrido de maior destaque negativo (L76 x L80), assim classificado por expressar a menor estimativa de produtividade média, também foram classificadas como intermediária e INR.

Há que se destacar que o híbrido P2 x P7 foi disposto no quadrante que permitiu sua classificação como eficiente e não-responsivo (ENR), pois expressou produtividade de grãos um pouco acima da média no ambiente com estresse nutricional; porém, não respondeu positivamente ao incremento de fósforo no solo, revelando produtividade bem abaixo da média no ambiente sem estresse nutricional. Inobstante, o par P7 x P6, embora classificado como ineficiente e responsivo, deteve produtividade próxima das médias dos ambientes contrastantes.

No que se refere aos índices de eficiência no uso do fósforo, segundo a metodologia proposta por Parentoni et al. (2001), as estimativas variaram de 0,13 a 4,22 para PROD; 0,53 a 1,49 para CE; e 0,15 a 3,11 para VP (Tabela 12). Considerando a pressão de seleção de 30 % adotada para os índices, os híbridos foram divididos em dois grupos quanto à eficiência no uso do fósforo: o primeiro grupo, contendo nove híbridos que expressaram os maiores valores do índice; e o segundo, reunindo 19 híbridos, que expressaram as menores médias do índice de eficiência. Vale ressaltar que todos os híbridos distribuídos dentro da margem de amplitude do primeiro grupo detiveram estimativas de valores acima da média dos seus respectivos índices de eficiência para as três características utilizadas.

Dentre os doze híbridos que ficaram alocados no primeiro grupo para o índice de eficiência no uso do fósforo para as três características, houve coincidência de seis pares, a saber: P7 x L80, P7 x L76, P7 x L59, P6 x L80, P7 x L77 e P6 x L77 (Tabela 12). Analisando as combinações do primeiro grupo do índice de eficiência utilizando a característica PROD, constata-se que todos os híbridos dispersaram-se no primeiro e no segundo grupo do algoritmo de Scott e Knott

(1974), para os quais as médias no rendimento de grãos variaram de 2.736,51 a 3.994,75 kg ha⁻¹ nos ambientes de baixo e alto fósforo.

Tabela 12. Classificação de 28 híbridos dialélicos de milho-pipoca com base no índice de seleção quanto à eficiência no uso do fósforo para as características PROD, CE e VP, segundo metodologia de Parentoni et al. (2001).

	Híbrido	Índice PROD	Híbrido	Índice CE	Híbrido	Índice VP
Seleção de 30%	P6 x L75	4,22	P7 x L80	1,49	P6 x L75	3,11
	P7 x L75	2,20	P7 x L76	1,45	P7 x L80	2,98
	P7 x L80	2,09	P6 x L80	1,44	P7 x L76	2,86
	P7 x L76	1,97	P7 x P6	1,38	P7 x L59	2,62
	P7 x L59	1,96	P7 x L59	1,37	P6 x L80	2,46
	P6 x L80	1,70	L77 x L80	1,33	P7 x L75	2,40
	P7 x L77	1,67	P7 x L77	1,27	P7 x L77	2,11
	L77 x L75	1,65	P6 x L77	1,23	P6 x L77	1,96
	P6 x L77	1,63	L76 x L80	1,20	L77 x L75	1,56
	L59 x P6	1,49	L59 x L77	1,13	L59 x P6	1,44
	L59 x L75	1,42	P7 x L75	1,09	P7 x P6	1,39
	L75 x L80	1,42	L59 x L80	1,08	P6 x L76	1,37
	P6 x L76	1,37	P6 x L76	1,02	L75 x L80	1,35
	P2 x L75	1,28	L76 x L77	1,02	P2 x L75	0,83
	P7 x P6	0,98	P2 x P7	0,98	L76 x L75	0,80
	L76 x L75	0,93	L59 x P6	0,98	P2 x P7	0,77
	P2 x P7	0,77	L75 x L80	0,97	L59 x L75	0,76
	P2 x P6	0,61	L77 x L75	0,94	L77 x L80	0,61
	P2 x L77	0,61	P2 x L80	0,88	L59 x L77	0,56
	P2 x L80	0,57	L76 x L75	0,86	P2 x L80	0,48
	P2 x L59	0,49	P2 x L76	0,83	P2 x L77	0,46
	P2 x L76	0,48	L59 x L76	0,81	P2 x P6	0,42
	L59 x L77	0,48	P2 x L77	0,78	P2 x L76	0,41
	L77 x L80	0,47	P6 x L75	0,76	L59 x L80	0,39
	L59 x L76	0,45	P2 x P6	0,73	L59 x L76	0,36
	L59 x L80	0,37	P2 x L59	0,68	P2 x L59	0,33
	L76 x L77	0,17	P2 x L75	0,66	L76 x L77	0,17
	L76 x L80	0,13	L59 x L75	0,53	L76 x L80	0,15
Média	1,20		1,03		1,25	

Fazendo uma comparação entre o índice de eficiência, segundo a metodologia de Parentoni et al. (2001), utilizando PROD como característica-alvo da seleção (Tabela 12), com base na dispersão gráfica da eficiência e responsividade dos híbridos no uso do fósforo (Figura 4), pode-se notar que houve acentuada consonância na distribuição dos híbridos classificados como eficientes e ineficientes nos quadrantes com aqueles híbridos que detiveram as maiores

estimativas do índice de eficiência no uso do fósforo, permitindo-se concluir que ambos métodos de classificação de genótipos foram eficientes para discriminá-los quanto à eficiência no uso do fósforo, podendo, pois, serem recomendados fidedignamente para tal fim em programas de melhoramento correlatos.

De forma semelhante ao que ocorreu para PROD, em relação ao índice de eficiência no uso do fósforo utilizando a CE, todos os híbridos com os melhores índices de eficiência ficaram agrupados no primeiro e segundo grupo de Scott e Knott (1974), com amplitude de variação das estimativas variando de 27,36 a 31,44 mL.g⁻¹ entre os ambientes de baixo e alto fósforo no solo, respectivamente, com destaque para o híbrido P7 x L80.

Por fim, a análise do índice de eficiência no uso de fósforo utilizando VP proporcionou a dispersão dos híbridos eficientes no uso do fósforo entre o primeiro e terceiro grupo pelo algoritmo de Scott e Knott (1974), com médias que variaram entre 73,36 e 98,66 m³ ha⁻¹, respectivamente, para os ambientes de baixo e alto fósforo.

Por sua vez, a classificação dos híbridos quanto à eficiência no uso do fósforo utilizando como metodologia o índice proposto por Fischer et al. (1983) (Tabela 13) revelou-se distinto dos outros dois métodos já discutidos, vez que a classificação dos genótipos não levou em consideração os méritos genotípicos dos híbridos, isto é, alguns híbridos classificados como eficientes no uso do fósforo não expressaram as melhores médias para suas características. Comparando o índice de eficiência utilizando a PROD (Tabela 13) com o gráfico de dispersão da eficiência e responsividade ao fósforo (Figura 4), percebe-se que houve consonância parcial na classificação dos híbridos eficientes, como foi o caso dos pares P2 x P7, P7 x L80, P6 x L75, L59 x P6, P7 x L75 e P7 x L76. Porém, houve dissonâncias na classificação desses híbridos para eficiência no uso do fósforo, pois P2 x L59, L76 x L80, P2 x L77 e P2 x P6 embora tenham auferido altos índices de eficiência, ficaram alocados no quadrante INR (ineficiente e não-responsivo) no gráfico de dispersão (Figura 4), com médias de produtividade abaixo da média nos ambientes de baixo e alto fósforo. Situação semelhante ocorreu com vários híbridos agrupados no quadrante dos genótipos ER (eficientes e responsivos), mas que expuseram estimativas de índices de eficiência abaixo da média, como ocorreu com o par P7 x L59. Dentre os híbridos classificados como eficientes, somente quatro estiveram alocados no primeiro ou segundo grupo do algoritmo de Scott e Knott

(1974), em que suas médias no rendimento de grãos variaram de 2.690,12 a 3.994,75 kg ha⁻¹ para os ambientes de baixo e alto fósforo, respectivamente.

Tabela 13. Classificação de 28 híbridos dialélicos de milho-pipoca com base no índice de seleção quanto à eficiência no uso do fósforo para as características PROD, CE e VP, segundo a metodologia de Fischer et al. (1983).

	Híbrido	Índice PROD	Híbrido	Índice CE	Híbrido	Índice VP
Seleção de 30%	P2 x P7	1,14	L77 x L75	1,06	P2 x P7	1,02
	P2 x L59	1,05	L76 x L75	1,06	P2 x L59	1,01
	P7 x L80	0,89	P2 x L75	1,06	L77 x L75	0,86
	L76 x L80	0,88	L59 x L77	1,05	L76 x L75	0,85
	P6 x L75	0,88	P7 x L59	1,04	P2 x L75	0,85
	L59 x P6	0,85	L75 x L80	1,02	P7 x L75	0,85
	P2 x L77	0,85	P7 x L75	1,00	L59 x P6	0,83
	P2 x P6	0,84	P2 x L76	0,98	L75 x L80	0,83
	P7 x L75	0,84	L59 x P6	0,97	P7 x L59	0,83
	P7 x L76	0,84	L59 x L80	0,97	P7 x L76	0,81
	P6 x L77	0,83	P7 x L76	0,97	P6 x L75	0,81
	P6 x L80	0,83	P2 x L59	0,97	P7 x L80	0,81
	L77 x L80	0,82	P6 x L80	0,97	P6 x L80	0,80
	P6 x L76	0,82	L76 x L80	0,95	L76 x L80	0,80
	L59 x L75	0,82	L77 x L80	0,94	P2 x L76	0,79
	P2 x L80	0,81	P6 x L77	0,94	L59 x L77	0,78
	L75 x L80	0,81	L59 x L76	0,93	P6 x L77	0,78
	L76 x L75	0,81	P6 x L75	0,93	L77 x L80	0,77
	L77 x L75	0,81	L59 x L75	0,92	L59 x L75	0,75
	P7 x P6	0,81	L76 x L77	0,91	P6 x L76	0,74
	P7 x L77	0,80	P7 x L80	0,91	P2 x L77	0,74
	P7 x L59	0,80	P2 x L77	0,91	P2 x P6	0,74
	P2 x L75	0,80	P7 x P6	0,91	P7 x P6	0,73
	P2 x L76	0,79	P6 x L76	0,90	L59 x L76	0,73
	L59 x L76	0,78	P2 x P7	0,90	P2 x L80	0,73
	L76 x L77	0,74	P2 x L80	0,90	P7 x L77	0,71
	L59 x L77	0,74	P2 x P6	0,89	L76 x L77	0,69
	L59 x L80	0,68	P7 x L77	0,88	L59 x L80	0,66
Média	0,83		0,96		0,80	

No que se refere ao índice de eficiência no uso do fósforo utilizando a CE como característica-alvo para a seleção, os híbridos com as melhores estimativas expressaram amplitude para com o algoritmo de Scott e Knott (1974) que variou de 21,52 a 29,69 mL.g⁻¹ referente ao ambiente com alto e baixo fósforo no solo, respectivamente, com destaque para o par P7 x L59.

Em relação à VP quando característica utilizada no índice (Tabela 13), apenas dois híbridos - P7 x L75 e P7 x L59 - foram superiores, concomitantemente, por esta metodologia e pelo algoritmo de Scott e Knott (1974), com estimativas respectivas de 83,17 e 93,00 m³ ha⁻¹ entre os ambientes de baixo e alto fósforo.

Dentre os 16 híbridos que ficaram alocados no primeiro grupo para as três características de eficiência no uso do fósforo, houve coincidência de apenas dois - L59 x P6 e P7 x L75 -, com valores estimados de 0,85, 0,87 e 0,83; e de 0,84; 1,00; e 0,85, respectivamente (Tabela 13). Como já mencionado anteriormente, este índice não leva em consideração os méritos genotípicos das características avaliadas, isto é, em um conjunto populacional serão ranqueados os genótipos apenas pela sua eficiência ao uso do fósforo, desconsiderando se os genótipos expressaram ou não as melhores médias para as principais características. Portanto, este índice por ser mais restritivo, não seria o mais adequado para ser empregado para um conjunto populacional em que o intuito seja selecionar genótipos superiores para eficiência no uso de fósforo, bem como para características de interesse econômico.

Capacidade combinatória de linhagens de milho-pipoca quanto à eficiência e responsividade no uso do fósforo

Foi considerado na análise dialélica as interações com o ambiente, por conseguinte, capitalizando as médias acumuladas nos ambientes de Campos dos Goytacazes e Itaocara para os níveis de alto e baixo fósforo no solo. Assim, foi possível realizar o desdobramento das somas de quadrados da fonte de variação genótipo em capacidade geral (CGC) e específica (CEC) de combinação, bem como de suas respectivas interações com o ambiente para as onze características avaliadas no esquema de cruzamento dialélico completo entre as oito linhagens de milho-pipoca utilizadas nesta pesquisa (Tabelas 14 e 15).

Tabela 14. Análise dialélica conjunta de Griffing (1954) para onze características de milho-pipoca avaliadas em baixa disponibilidade de fósforo. Campos dos Goytacazes e Itaocara, RJ.

FV	GL	Quadrado Médio - Ambiente Baixo P										
		AP	AE	FM	FF	IF	TE	DE	P100	PROD	CE	VP
Genótipos (G)	35	1799,51 **	856,22 **	22,48 **	27,25 **	2,13 ns	16,01 **	56,27 **	6,58 **	3897128,83 **	40,74 **	3033,20 **
CGC	7	1283,29 *	123,04 ns	76,06 **	96,97 **	4,54 ns	14,78 *	143,29 **	17,77 *	5047841,13 **	150,97 **	4151,12 **
CEC	28	1928,57 **	1039,52 **	9,08 *	9,82 ns	1,52 ns	16,32 **	34,51 **	3,78 ns	3609450,75 **	13,19 ns	2753,71 **
Ambientes (A)	1	405,07 *	602,66 **	17,79 **	15,04 **	65,56 **	241,39 **	465,16 **	50,00 **	4096940,66 **	10,40 ns	2138,33 **
G x A	35	291,92 **	72,43 ns	3,85 **	5,10 **	2,05 **	1,78 **	7,08 **	2,93 **	73196,13 ns	9,20 *	73,76 ns
CGC x A	7	317,66 **	106,24 *	2,58 ns	0,67 ns	2,30 *	3,85 **	6,35 **	3,33 **	55859,80 ns	8,08 ns	86,93 ns
CEC x A	28	285,48 **	63,98 ns	4,17 **	6,21 **	1,99 **	1,26 ns	7,26 **	2,83 **	77530,21 ns	9,48 *	70,47 ns
Erro	110	85,85	52,89	1,51	1,69	0,85	0,92	1,46	0,79	97233,69	6,37	97,63
Média		178,29	100,13	55,00	58,83	3,83	14,30	28,91	11,48	2071,37	25,77	53,69
Componentes Quadráticos dos Efeitos Fixos												
CGC (Φ_g)		18,53	0,29	1,22	1,56	0,05	0,22	2,34	0,27	80889,56	2,30	65,93
CEC (Φ_s)		292,81	155,62	1,01	1,08	-0,03	2,41	5,26	0,37	569163,90	0,07	426,41

ns: não significativo; * e **: significativo em 5 e 1 % de probabilidade, respectivamente, pelo teste F. CGC: capacidade geral de combinação; CEC: capacidade específica de combinação. AP: altura de planta; AE: altura de espiga; FF: florescimento feminino; FM: florescimento masculino; IF: intervalo de florescimento masculino e feminino; DE: diâmetro de espiga; TE: comprimento de espiga; P100: peso de 100 grãos; PROD: produtividade de grãos; CE: capacidade de expansão; e VP: volume de pipoca expandida por hectare.

Tabela 15. Análise dialéctica conjunta de Griffing (1954) para onze características de milho-pipoca avaliadas em alta disponibilidade de fósforo. Campos dos Goytacazes e Itaocara, RJ.

FV	GL	Quadrado Médio - Ambiente Alto P										
		AP	AE	FM	FF	IF	TE	DE	P100	PROD	CE	VP
Genótipos (G)	35	1739,30 **	713,65 **	30,22 **	32,57 **	0,97 ns	10,64 **	38,77 **	7,45 **	4180396,59 **	51,04 **	3387,81 **
CGC	7	1166,93 **	110,48 ns	88,41 **	102,83 **	1,68 ns	14,04 *	87,25 **	19,01 *	5356317,21 **	243,75 **	5438,51 **
CEC	28	1882,39 **	864,44 **	15,67 **	15,01 **	0,79 ns	9,79 **	26,65 **	4,56 **	3886416,43 **	2,86 ns	2875,13 **
Ambientes (A)	1	6976,84 **	2945,95 **	34,24 **	0,16 ns	39,18 **	55,45 **	86,20 **	1,02 ns	2752883,63 **	10,93 *	3184,96 **
G x A	35	157,55 **	78,24 ns	1,98 *	2,36 **	0,73 ns	2,08 **	9,73 **	2,03 **	104633,67 **	11,46 **	160,89 **
CGC x A	7	113,04 ns	63,53 ns	1,80 ns	3,66 **	0,68 ns	2,45 **	9,37 **	5,27 **	72497,29 ns	6,15 *	124,55 *
CEC x A	28	168,68 **	81,92 ns	2,03 *	2,04 *	0,75 ns	1,98 **	9,82 **	1,22 **	112667,76 **	12,79 **	169,97 **
Erro	110	64,84	56,47	1,31	1,30	0,74	0,75	0,99	0,55	51494,42	3,01	52,60
Média		192,11	110,20	53,76	54,99	1,23	17,06	29,54	11,97	2315,44	26,56	61,77
Componentes Quadráticos dos Efeitos Fixos												
CGC (Φ_g)		17,29	-0,04	1,43	1,67	0,00	0,21	1,42	0,30	87555,47	3,96	88,89
CEC (Φ_s)		292,12	125,25	2,18	2,07	-0,11	1,38	4,11	0,58	630571,26	-0,53	461,66

ns: não significativo; * e **: significativo em 5 e 1 % de probabilidade, respectivamente, pelo teste F. CGC: capacidade geral de combinação; CEC: capacidade específica de combinação. AP: altura de planta; AE: altura de espiga; FF: florescimento feminino; FM: florescimento masculino; IF: intervalo de florescimento masculino e feminino; DE: diâmetro de espiga; TE: comprimento de espiga; P100: peso de 100 grãos; PROD: produtividade de grãos; CE: capacidade de expansão; e VP: volume de pipoca expandida por hectare.

Excetuando-se IF, houve alta significância entre os genótipos para as características avaliadas nos ambientes com e sem estresse nutricional, revelando que há variabilidade genética entre os componentes do dialelo para as principais características de interesse em programas de melhoramento, tornando praticável a seleção de híbridos eficientes e responsivos no uso do fósforo (Tabelas 14 e 15).

O desdobramento dos genótipos nas capacidades combinatórias revelou significância no efeito da capacidade geral de combinação (CGC) para as características AP, FM, FF, TE, DE, P100, PROD, CE e VP nos ambientes de baixo e alto nível de fósforo (Tabelas 14 e 15), evidenciando a presença de efeitos aditivos na expressão dessas características, posto que pelo menos um dos genitores difere dos demais em relação à quantidade de alelos favoráveis de efeitos aditivos para tais características.

Também foi observado efeito significativo na capacidade específica de combinação (CEC) para as características AP, AE, FM, TE, DE, PROD e VP nos ambientes de baixo e alto fósforo (Tabelas 14 e 15), indicando que os efeitos gênicos não-aditivos também exercem influência na expressão dessas características e traz à baila a existência de complementação alélica entre os genitores nos locos com algum grau de dominância. Ainda no ambiente com alto fósforo, o efeito de CEC para as características FF e P100 também foi significativo, ao contrário do que ocorreu no ambiente de baixo fósforo. A ausência de significância da capacidade específica de combinação para CE revela predomínio dos efeitos gênicos aditivos no controle da característica, corroborando com o propalado por Pereira e Amaral Júnior (2001), Freitas Júnior et al. (2006) e Schwantes et al. (2017).

Apesar das significâncias nas estimativas dos quadrados médios, são os componentes quadráticos dos efeitos fixos (Φ_g e Φ_s) que revelam com maior fidedignidade a proeminência dos efeitos gênicos das características avaliadas (Cruz et al., 2012). Para as características PROD e VP, houve supremacia na estimativa da Φ_s em relação a Φ_g para os ambientes de baixo e alto fósforo, evidenciando que para a expressão de tal característica, os efeitos não-aditivos detêm maior importância (Tabelas 14 e 15). Esses resultados indicam que a melhor estratégia na obtenção de genótipos eficientes e responsivos no uso do fósforo para estas características, consiste na exploração da heterose através do desenvolvimento e uso de híbridos.

Normalmente, para o rendimento de grãos na cultura do milho-pipoca, são prevalentes os efeitos gênicos não-aditivos, como já reportado por outros autores (Pereira e Amaral Junior, 2001; Freitas Junior et al., 2006; Vieira et al., 2011). Por sua vez, com relação à eficiência no uso do fósforo, há contradição, vez que diversos pesquisadores têm revelado a importância tanto dos efeitos aditivos quanto não-aditivos em diferentes culturas. Citam-se como exemplos Gorz et al. (1987) que, avaliando a capacidade combinatória de híbridos de sorgo para múltiplos elementos minerais, relataram maior importância da capacidade geral de combinação para todos os elementos estudados, com exceção ao fósforo, cloro e ferro nos genitores femininos; Spehar (1995) que, avaliando a herança da eficiência de múltiplos elementos minerais em genótipos de soja, concluíram maior importância dos efeitos aditivos para todos elementos, com exceção ao cobre, manganês e zinco; Ashan et al. (1996), os quais em investigação sobre o controle genético da tolerância ao sal em genótipos de trigo, relataram a importância tanto dos efeitos aditivos quanto dos não-aditivos; Parentoni et al. (2010), que reportaram a prevalência de efeitos não-aditivos no controle genético da eficiência no uso do fósforo em milho; Kizilgeçi et al. (2016), os quais relataram a predominância dos efeitos gênicos aditivos para a eficiência no uso do nitrogênio em trigo; Meirelles et al. (2016) que, avaliando a capacidade combinatória de linhagens de milho em ambientes contrastantes de fósforo, identificaram prevalência de efeitos aditivos para eficiência e dominantes para responsividade; Hirut et al. (2017), que propalaram a maior relevância dos componentes genéticos aditivos para a eficiência no uso da água em batata; e Uzokwe et al. (2017), os quais, avaliando os efeitos genéticos de características relacionadas à eficiência no uso de fósforo na cultura da soja, reportaram prevalência dos efeitos não-aditivos.

Uma das razões que podem interferir na primazia da expressão dos efeitos gênicos responsáveis pela eficiência no uso do fósforo é a escolha dos parentais do dialelo, pois podem ser utilizados desde linhagens endogâmicas - que possuem base genética estreita - até variedades, que apresentam base genética ampla (Hallauer et al., 2010). Deste modo, cada genitor pode contribuir de forma diferente, com maior ou menor frequência de alelos favoráveis, proporcionando resultados contrastantes em relação ao tipo de ação gênica predominante para determinada característica. O grau da distância genética existente entre os parentais é outro elemento importante que interfere nos efeitos gênicos, pois é um dos componentes

- juntamente com os desvios de dominância -, utilizados para estimação da heterose na identificação de híbridos superiores para eficiência no uso do fósforo (Falconer, 1987). Sprague e Tatum (1942) relataram que as estimativas das capacidades combinatórias são relativas e sujeitas ao conjunto particular de genitores incluídos nas combinações híbridas. Ou seja, se por ventura os parentais forem do mesmo grupo heterótico, provavelmente não haverá complementaridade gênica, e os efeitos aditivos serão prevalentes na expressão da característica.

No presente trabalho, faz-se mister destacar que a escolha dos parentais adveio de estudo prévio da diversidade genética de linhagens oriundas de diferentes genealogias (Gerhardt et al., 2017), tendo-se optado pela inclusão, no dialelo, das três linhagens mais expressivamente eficientes, três inequivocamente ineficientes e duas medianamente eficientes, proporcionando não apenas possibilidade de expressão da complementaridade, mas também da simetria alélica.

Para a CE, a estimativa da Φ_g foi superior em relação à de Φ_s para os ambientes de baixo e alto nível de fósforo no solo (Tabelas 14 e 15), revelando maior importância os efeitos gênicos aditivos na expressão da característica, corroborando assim, com os resultados encontrados por outros autores que investigaram a herança da capacidade de expansão em milho-pipoca (Larish e Brewbaker, 1999; Pereira e Amaral Júnior, 2001; Rangel et al., 2007; Silva et al., 2010). Tais resultados indicam como estratégias adequadas de melhoramento os métodos de seleção recorrente intrapopulacionais, com o intuito de aumento da frequência de alelos favoráveis para a capacidade de expansão.

Tendo em mente que a eficiência e responsividade no uso do fósforo no milho-pipoca são características que têm relação direta com a PROD, na qual preponderam os efeitos gênicos não-aditivos, a seleção de linhagens para obtenção de híbridos superiores deve ser feita de maneira criteriosa, com base em um contexto genealógico, em que a escolha dos genitores com altos valores de CE - principal característica qualitativa do milho-pipoca - é uma estratégia interessante para agregar superioridade aos híbridos pelas médias superiores decorrentes da aditividade, possibilitando, assim, a expressão de incrementos em ambas as características. Ou ainda, pode ser sugerida a metodologia de seleção de genótipos com base na característica VP, considerada segundo Amaral Junior et al. (2016), um super-caráter que agrega, de forma simultânea, as características PROD e CE,

sendo, pois, uma alternativa viável para inferência de ganhos genéticos quanto à eficiência e responsividade no uso do fósforo.

Para AP, AE, TE, DE e P100, a estimativa da Φ_s foi superior à de Φ_g nos ambientes de baixo e alto fósforo no solo, demonstrando maior importância dos efeitos não-aditivos na expressão dessas características (Tabelas 14 e 15). Já, para a característica IF, a estimativa da Φ_g foi superior a Φ_s , revelando a maior influência dos efeitos aditivos na expressão da característica.

Merece destacar a inversão da expressão de efeitos gênicos mais proeminentes para as características de florescimento masculino e feminino entre os ambientes contrastantes. Nesse aspecto, houve prevalência dos efeitos aditivos para FF e FM no ambiente com estresse nutricional, ao passo que no ambiente sem estresse nutricional, houve predominância dos efeitos de dominância em ambas características. Tais resultados revelam que o ambiente contrastante exerce influência na expressão dos efeitos gênicos dessas características, podendo haver variação dos efeitos aditivos e dominantes de acordo com a condição ambiental em que os genótipos são submetidos. Mendes et al. (2015), ao investigarem estimativas de parâmetros genéticos em milho cultivado em ambientes contrastantes quanto ao nível de fósforo, concluíram que há a presença de efeitos genéticos aditivos e dominantes na expressão do florescimento masculino e feminino, com maior pujança dos efeitos dominantes em ambientes discrepantes. De todo modo, sobressai-se a necessidade de investigações mais detalhadas sobre o efeito do estresse ao fósforo na expressão de características de florescimento, tendo em vista a necessidade de adequação da melhor estratégia de melhoramento para obtenção de ganhos superiores.

No ambiente com alto nível de fósforo no solo, houve significância na interação entre a capacidade geral de combinação e ambiente para as características CE e VP (Tabela 15), indicando que não existiu consistência entre os efeitos observados para cada ambiente (local), ou seja, os efeitos aditivos entre as linhagens (\hat{g}_i) foram diferenciados e, nesse caso, é necessário, segundo Vencovsky e Barriga (1992), a prática da seleção para cada ambiente específico. Meirelles et al. (2016) também detectaram significância na interação entre a capacidade geral de combinação com diferentes anos para a produtividade de milho comum cultivado em ambientes contrastantes ao fósforo. Inobstante, Medici

et al. (2004) encontraram significância na interação entre a capacidade geral de combinação com níveis de nitrogênio para a produtividade de grãos de milho.

Além dessas características, houve significância na interação da CGC com o ambiente para as características TE, DE e P100 nos ambientes de baixo e alto nível de fósforo (Tabelas 14 e 15). As características AP, AE e IF foram significativas apenas no ambiente de baixo fósforo, e FF foi significativa exclusivamente no ambiente de alto fósforo. Resultados similares foram descobertos por Freitas Junior et al. (2006) e Silva et al. (2010), os quais, avaliando dialelos completos entre linhagens de milho-pipoca, observaram significância na interação CGC por ambiente para características de altura de planta e de espiga e dias para florescimento.

A interação entre a capacidade específica de combinação e ambiente foi significativa para as características PROD e VP no ambiente de alto fósforo, e para a CE foi significativa no ambiente de alto e baixo fósforo no solo (Tabelas 14 e 15), demonstrando que a classificação dos efeitos de CEC diferiu entre os ambientes (locais) e que devem ser considerados os resultados em cada ambiente para que haja possibilidade efetiva de seleção em condições específicas dos melhores híbridos responsivos no uso do fósforo. As características AP, FM, FF, DE e P100 também expressaram significância nos ambientes de baixo e alto fósforo no solo. A característica IF foi significativa apenas no ambiente de baixo fósforo e a característica TE somente no ambiente de alto fósforo. Outros autores, a exemplos de Pinto et al. (2001) e Silva et al. (2010), também detectaram significância na interação entre a capacidade específica de combinação com o ambiente para produtividade e altura de espiga em milho-pipoca e comum.

Segundo Sprague e Tatum (1942), a capacidade geral de combinação é o desempenho médio de uma linhagem em combinações híbridas, sendo expressa pela estimativa " \hat{g}_i ". Quando há altos valores, positivos ou negativos, tem-se que o genitor " i " é superior ou inferior aos demais genitores do dialelo com relação à média de seus híbridos.

No que se refere à PROD, as linhagens que mais se destacaram com os melhores desempenhos gerais nas combinações híbridas por suas magnitudes médias positivas de \hat{g}_i , foram: P7, P6, L75 e L59, nesta ordem, tanto no ambiente de baixo quanto de alto nível de fósforo no solo (Tabela 16). Essa coincidência de resultado leva a crer que o ambiente estressante não impôs uma diferenciação de

comportamento das linhagens quando em combinação com todas as demais constituintes do dialelo, como pode ser observado pela não significância da interação CGCxA para a PROD (Tabelas 14 e 15).

Porém, há que se atentar que na classificação das linhagens *per se* para a eficiência e responsividade no uso do fósforo, P7 e L59 foram designadas como eficientes e responsivas, P6 foi intermediária, e L75 foi ineficiente e não-responsiva no uso do fósforo (Figura 1). Por sua vez, dentre as linhagens que exibiram valores menos expressivos de $\hat{\sigma}_i$ - L80, L76, L77 e P2 (Tabela 16) -, as linhagens L80 e L77 foram classificadas como ineficientes e não-responsivas; L76, como intermediária; e P2, como eficiente e responsiva no uso do fósforo (Figura 1). Esses resultados remetem à reflexão de que há parcial consonância entre as linhagens avaliadas *per se* e resultantes de suas estimativas de capacidades combinatórias. Assim, deve-se atentar ao fato de que, em estudos envolvendo estresse ao fósforo, é necessário considerar não apenas o valor *per se* das linhagens, como também as estimativas de $\hat{\sigma}_i$ e $\hat{\sigma}_{ij}$, uma vez que a seleção *per se* de um genótipo não faz inferência às suas capacidades gerais e específicas de combinação.

Para a característica CE, as linhagens L80 e P7 detiveram os maiores valores positivos de $\hat{\sigma}_i$ nos ambientes de alto e de baixo nível de fósforo no solo (Tabela 16), indicando que com o uso destas linhagens como genitores, espera-se incrementos nas médias dos híbridos. Por outro lado, as linhagens que mais se destacaram negativamente para a $\hat{\sigma}_i$ - P2, L75 e L59 nos ambientes de alto e baixo fósforo - devem ser descartadas em cruzamentos para obtenção de híbridos com alta CE. As linhagens P6, L76 e L77 apresentaram valores de $\hat{\sigma}_i$ próximos de zero, não havendo, pois, superioridade nem inferioridade em relação à média geral dos híbridos do dialelo. Deve-se destacar que P7, ao apresentar valores positivos de $\hat{\sigma}_i$ para PROD e CE, caracteriza-se como uma linhagem de interesse para ser incluída em cruzamentos visando à obtenção de híbridos superiores na eficiência e responsividade no uso do fósforo.

Tabela 16. Efeito médio da capacidade geral de combinação (\hat{g}_i) para onze características de linhagens de milho-pipoca avaliadas em baixa e alta disponibilidade de fósforo. Campos dos Goytacazes e Itaocara, RJ.

Parentais	Capacidade Geral de Combinação (\hat{g}_i)											
	AP		AE		FM		FF		IF		TE	
	Baixo P	Alto P	Baixo P	Alto P	Baixo P	Alto P	Baixo P	Alto P	Baixo P	Alto P	Baixo P	Alto P
P2	10,15	8,48	2,62	2,81	-0,72	-0,51	-0,68	-0,77	0,02	-0,19	0,31	-0,29
P7	0,32	2,70	0,90	-0,22	-1,02	-1,53	-1,36	-1,56	-0,33	0,04	0,59	0,36
L59	-0,96	-0,03	0,74	0,28	-0,82	-0,75	-1,15	-0,93	-0,33	-0,16	-0,17	0,04
P6	1,13	0,23	0,02	0,38	-0,95	-0,97	-1,09	-0,99	-0,14	-0,09	-0,09	0,10
L76	-3,26	-0,58	-1,23	-0,17	0,17	-0,15	0,26	-0,14	0,09	-0,01	-0,06	0,05
L77	0,47	-4,76	-0,08	-0,47	0,99	1,31	1,24	1,62	0,25	0,28	-1,03	-1,05
L75	-2,76	-0,23	-1,18	-0,56	0,19	0,56	0,68	0,78	0,47	0,21	0,01	0,45
L80	-5,09	-5,81	-1,80	-2,04	2,17	2,04	2,10	1,97	-0,04	-0,08	0,43	0,34

Parentais	Capacidade Geral de Combinação (\hat{g}_i)									
	DE		P100		PROD		CE		VP	
	Baixo P	Alto P	Baixo P	Alto P	Baixo P	Alto P	Baixo P	Alto P	Baixo P	Alto P
P2	1,39	0,61	-0,14	-0,15	-124,79	-204,52	-2,28	-2,13	-7,87	-9,92
P7	0,33	0,36	-0,32	-0,23	414,56	410,93	1,94	2,66	15,47	17,84
L59	0,99	1,66	0,16	0,56	39,42	136,00	-0,80	-1,35	-0,91	0,07
P6	-0,83	-0,82	-0,82	-0,51	348,02	330,95	-0,09	0,71	8,82	10,60
L76	0,33	0,83	0,69	1,12	-293,89	-299,69	0,38	0,50	-6,81	-7,18
L77	1,68	-0,18	-0,28	0,00	-261,83	-225,32	0,74	0,51	-5,48	-4,42
L75	-0,79	-0,10	0,83	-0,39	180,60	185,26	-1,86	-3,06	1,77	-1,26
L80	-3,08	-2,35	-0,13	-0,40	-302,10	-333,61	1,96	2,16	-4,98	-5,73

AP: altura de planta; AE: altura de espiga; FF: florescimento feminino; FM: florescimento masculino; IF: intervalo de florescimento masculino e feminino; DE: diâmetro de espiga; TE: comprimento de espiga; P100: peso de 100 grãos; PROD: produtividade de grãos; CE: capacidade de expansão; e VP: volume de pipoca por hectare.

Como VP é uma característica que associa de forma positiva e concomitante o rendimento de grãos e a capacidade de expansão, resultou na consonância de parte das linhagens de maior e menor magnitude de \hat{g}_i entre PROD e CE. Considerando-se as linhagens com os maiores valores positivos de \hat{g}_i para VP - P7 e P6, nos ambientes de alto e baixo nível de fósforo -, P7 também compôs os grupos de elevados \hat{g}_{is} para CE e PROD; e P6 fez parte do grupo de valores mais elevados de \hat{g}_i para PROD. Dentre as linhagens com \hat{g}_{is} desfavoráveis para VP - P2, L76, L77 e L80, tanto no ambiente de alto quanto de baixo nível de fósforo no solo - todas foram consonantemente desfavoráveis para PROD em ambos ambientes; e P2, para CE. Assim, PROD é a característica que mais influencia o efeito de VP, quando se considera a participação de um conjunto de linhagens em cruzamentos aos pares com todas as demais.

Para as características AP e AE, houve concordância na expressão das linhagens em relação a \hat{g}_i , tendo P2 expressa o valor positivo mais elevado em ambos ambientes, e L80 e L76, tendo expressado as menores estimativas de \hat{g}_i , com a ressalva de que para AE a coincidência recaiu para com L80 no ambiente de alto nível de fósforo (Tabela 16). A coincidência na expressão da capacidade geral de combinação das linhagens para AP e AE pode ser explicada pela alta correlação genética e fenotípica positiva entre ambas as características, conforme observado por Cabral et al. (2016).

A meteorologia na agricultura muitas vezes pode ser imprevisível e por essa razão a tendência é que haja uma redução no ciclo das cultivares atuais, de modo a favorecer colheitas mais rápidas, evitando assim possíveis prejuízos por fatores ambientais, como veranico, geadas, chuva na colheita, competição por água e nutrientes com plantas invasoras e, até mesmo, para otimizar o tempo do agricultor para a próxima safra. Por essa razão, as linhagens P2, P6, P7 e L59 são as mais indicadas para proporcionar reduções no período de florescimento masculino e feminino, bem como para o intervalo entre florescimentos, nos ambientes de baixo e alto fósforo no solo, por expressarem estimativas negativas consistentes de \hat{g}_i para FM, FF e IF.

As características TE, DE e P100 são importantes e também devem ser levadas em consideração em processos seletivos, pois possuem correlação genética positiva para com o rendimento de grãos, segundo estudo realizado por Lopes et al. (2007), portanto, a seleção de genótipos com base nessas

características pode proporcionar ganhos indiretos em PROD. Nesse aspecto, as linhagens mais indicadas, por expressarem as maiores estimativas de \hat{g}_i , seriam: i) P7, L80 e P2 para TE, no ambiente de baixo fósforo; ii) L75, P7 e L80 para TE, no ambiente com alto fósforo; iii) L77, P2 e L59 para DE no ambiente de baixo fósforo no solo; iv) L59 e L76 para DE no ambiente de alto fósforo; v) L75 e L76 para P100 no ambiente de baixo fósforo; e vi) L76 e L59 ainda para P100 no ambiente de alto fósforo (Tabela 16).

Por uma análise do contexto genealógico em relação aos resultados expressos das capacidades gerais de combinação quanto a PROD e VP, pode-se concluir que as linhagens provenientes do híbrido comercial “Zaeli”, foram as que apresentaram os maiores valores de \hat{g}_i , demonstrando que se trata de genealogia que possui genes favoráveis e de interesse tanto para a PROD quanto para VP, cujas características estão diretamente relacionadas à eficiência e responsividade no uso do fósforo (Tabela 2). Em relação a CE, as genealogias com genes favoráveis, por proporcionarem linhagens com destaque superior para a capacidade geral de combinação, recaíram novamente sobre o híbrido comercial “Zaeli” e sobre a população “Viçosa: UFV”, com exceção da linhagem L75, que expressou valores negativos de \hat{g}_i .

A capacidade específica de combinação é o comportamento particular de uma combinação híbrida em relação à média dos genitores, expressa pela estimativa “ \hat{s}_{ij} ”. A CEC ocorre devido à variância genética dominante e dos outros tipos de componentes de variância epistática. Um híbrido considerado promissor deve apresentar altas estimativas da capacidade específica de combinação e que pelo menos um dos genitores apresente alta capacidade geral de combinação (Cruz et al., 2014).

Para a característica PROD, em que houve predominância dos efeitos gênicos dominantes para eficiência e responsividade no uso do fósforo, os seis híbridos que detiveram as maiores estimativas de \hat{s}_{ij} foram: P6 x L75, P7 x L80, L77 x L75, P6 x L80, P7 x L76 e L75 x L80 (Tabela 17). Em todas essas combinações pelo menos um dos genitores expressou alta estimativa de \hat{g}_i , estando, assim, em conformidade com o esperado com base na capacidade geral de combinação, conforme propalado por Cruz et al. (2014). Não por acaso, trata-se das combinações híbridas que expressaram altas médias para PROD, variando de 2.605,31 a 3.994,75 Kg ha⁻¹ para os ambientes contrastantes de fósforo, ficando

ordenadas no primeiro e segundo grupo do algoritmo de Scott-Knott (1974), com exceção do híbrido L75 x L80.

Ainda em relação à produtividade de grãos (PROD), nove combinações expressaram estimativas desfavoráveis de $\hat{\sigma}_{ij}$ nos ambientes contrastantes, quais sejam: P2 x P7, P2 x L59, P2 x P6, P7 x P6, L59 x L76, L59 x L77, L59 x L80, L76 x L77 e L76 x L80. Dessas combinações, sete – P2 x P7, P2 x L59, P2 x P6, P7 x P6, L59 x L76, L59 x L77, L59 x L80 – contêm pelo menos um dos genitores com alta estimativa de CGC. Por uma análise inicial, poder-se-ia supor que reduzida divergência genética das linhagens parentais tivesse gerado efeitos não satisfatórios de $\hat{\sigma}_{ij}$; porém, essa hipotetização deve ser descartada, uma vez que as genealogias das linhagens genitoras das mencionadas combinações, remetem a quatro diferentes ancestralidades, a saber: Composto CMS-42 (P2), Zaeli (P6 e P7), Beija-Flor: UFV (L59) e Viçosa: UFV (L76, L77 e L80). Não por acaso, o método de Tocher discriminou as linhagens parentais dessas combinações em cinco grupos (grupo I: L76; grupo II: P2, P6 e P7; grupo III: L80; grupo VI: L77; e grupo VII: L59) no ambiente com alto P; e quatro grupos (grupo I: L76, P2 e P6; grupo II: L80; grupo III: L59 e P7; e grupo VI: L77), no ambiente de baixo P (Gerhardt et al., 2017). Resta, pois, assumir que os desvios de dominância não se comportaram como o esperado com base na CGC parental.

Dentre as principais características de interesse econômico do milho-pipoca, a CE foi à única em que a interação da CEC com o ambiente foi mais acentuada, não havendo consonância entre os ambientes na classificação dos híbridos, tornando conveniente uma discussão específica para cada local. Os cinco híbridos que se destacaram pelas estimativas de $\hat{\sigma}_{ij}$, especificamente no ambiente de baixo fósforo, em Campos dos Goytacazes, foram: L77 x L75, L59 x L77, P7 x L75, L76 x L75, P2 x L76. Ainda, em Campos dos Goytacazes no ambiente de alto fósforo no solo, os híbridos com as maiores estimativas de $\hat{\sigma}_{ij}$, foram: P6 x L76, P7 x L77, P2 x P7, P2 x P6 e P7 x L75. Desses híbridos, apenas três combinações – P7 x L75, P7 x L77 e P2 x P7 – contiveram pelo menos um dos genitores com maior estimativa da CGC.

Tabela 17. Efeito da capacidade específica de combinação ($\hat{\sigma}_{ij}$) para onze características de híbridos dialélicos de milho-pipoca avaliados em baixa e alta disponibilidade de fósforo. Campos dos Goytacazes e Itaocara, RJ.

Híbridos	Capacidade Específica de Combinação ($\hat{\sigma}_{ij}$)											
	AP		AE		FM		FF		IF		TE	
	Baixo P	Alto P	Baixo P	Alto P	Baixo P	Alto P	Baixo P	Alto P	Baixo P	Alto P	Baixo P	Alto P
P2 x P7	-18,44	-12,54	-13,05	-9,28	-0,65	-1,35	-0,33	-0,82	0,48	0,59	-0,39	-0,37
P2 x L59	-1,56	-2,00	2,91	1,64	0,14	0,25	-0,35	0,89	-0,48	0,45	-0,06	0,54
P2 x P6	-1,44	-7,81	1,68	-0,11	-0,89	1,14	-0,69	0,87	0,30	-0,28	-0,21	-0,55
P2 x L76	10,32	8,18	9,87	4,21	-0,85	0,22	-0,71	0,21	0,09	-0,03	1,31	1,25
P2 x L77	4,71	3,50	3,98	0,92	-1,78	-0,43	-1,81	-0,93	-0,10	-0,48	0,72	-0,33
P2 x L75	14,31	24,40	10,88	18,25	-1,12	-2,04	-0,59	-2,03	0,34	0,09	1,55	1,45
P2 x L80	20,60	13,81	7,06	3,07	2,20	-0,31	1,80	-0,66	-0,50	-0,30	0,20	0,78
P7 x L59	-1,21	0,95	-2,24	3,15	0,27	-0,25	-0,75	-0,34	-0,98	-0,28	-0,14	0,56
P7 x P6	-13,85	-11,01	-11,43	-14,67	-0,81	-1,62	-0,12	-1,15	0,49	0,49	-0,69	-0,52
P7 x L76	5,82	20,18	9,41	14,60	0,30	0,34	0,13	0,17	-0,10	-0,27	0,83	0,45
P7 x L77	4,82	9,54	0,24	4,69	-0,06	0,64	-0,56	0,09	-0,28	-0,55	0,99	0,38
P7 x L75	12,16	8,73	8,79	7,38	-1,11	-0,57	-0,25	-0,74	0,72	-0,15	0,88	-0,05
P7 x L80	17,55	16,15	12,03	13,43	0,34	0,17	0,83	-0,12	0,34	-0,20	0,54	1,51
L59 x P6	0,89	-1,50	0,65	0,02	-0,20	0,24	-1,36	0,34	-1,18	0,02	0,77	-0,23

AP: altura de planta; AE: altura de espiga; FM: florescimento masculino; FF: florescimento feminino; IF: intervalo de florescimento masculino e feminino; e TE: comprimento de espiga.

Tabela 17, Cont.

Híbridos	Capacidade Específica de Combinação ($\hat{\sigma}_{ij}$)											
	AP		AE		FM		FF		IF		TE	
	Baixo P	Alto P	Baixo P	Alto P	Baixo P	Alto P	Baixo P	Alto P	Baixo P	Alto P	Baixo P	Alto P
L59 x L76	23,45	0,66	10,70	-0,10	-0,90	0,89	-0,68	0,58	0,25	-0,23	1,59	0,23
L59 x L77	9,69	14,27	5,94	8,63	-1,53	-2,71	-1,09	-2,81	0,42	-0,02	0,67	1,36
L59 x L75	11,84	14,07	9,19	8,84	-0,55	-1,36	-0,80	-0,83	-0,16	0,55	0,67	1,04
L59 x L80	8,03	16,08	7,04	3,34	0,02	-0,11	0,13	-0,38	0,20	-0,33	1,07	0,58
P6 x L76	7,27	6,12	5,51	4,85	-0,63	-0,24	-0,49	-0,30	0,05	0,04	0,63	1,11
P6 x L77	9,29	12,08	5,79	5,94	1,07	-0,84	0,38	-1,01	-0,76	-0,25	1,48	1,28
P6 x L75	10,79	8,95	0,99	2,65	0,71	0,14	0,59	0,09	-0,16	-0,02	0,96	0,56
P6 x L80	0,73	13,27	8,69	10,53	-0,28	-1,29	-0,41	-1,26	0,01	0,10	-0,68	0,08
L76 x L77	-3,22	12,49	1,39	7,39	-0,29	-2,28	-0,80	-1,76	-0,19	0,50	0,14	-0,36
L76 x L75	1,18	3,16	3,60	2,75	0,34	-1,71	0,09	-1,41	-0,21	0,24	-0,62	-0,34
L76 x L80	6,44	2,15	7,53	6,61	-1,02	-0,69	-1,13	-1,04	0,08	-0,48	0,50	1,48
L77 x L75	10,14	5,77	8,52	8,29	-1,55	-1,24	-1,75	-1,47	-0,19	-0,55	1,02	1,39
L77 x L80	19,24	0,04	11,31	-1,36	-0,39	-0,48	-0,16	-0,14	0,12	0,24	1,29	0,35
L75 x L80	11,97	11,22	10,88	7,66	-1,34	-0,41	-1,22	-0,13	0,22	0,14	2,95	0,22

AP: altura de planta; AE: altura de espiga; FM: florescimento masculino; FF: florescimento feminino; IF: intervalo de florescimento masculino e feminino; e TE: comprimento de espiga.

Tabela 17, Cont.

Híbridos	Capacidade Específica de Combinação ($\hat{\sigma}_{ij}$)									
	DE		P100		PROD		CE		VP	
	Baixo P	Alto P	Baixo P	Alto P	Baixo P	Alto P	Baixo P	Alto P	Baixo P	Alto P
P2 x P7	-2,20	-0,72	-0,02	-0,12	-1,74	-515,38	-0,20	0,38	-2,30	-14,32
P2 x L59	0,03	-0,47	-0,13	-1,07	-34,82	-473,41	0,14	-0,03	-0,98	-10,69
P2 x P6	0,41	-2,13	-0,69	-0,06	-304,39	-257,56	-0,67	-0,14	-10,11	-7,88
P2 x L76	1,63	1,87	0,55	0,22	161,51	272,36	0,84	-0,09	6,25	7,86
P2 x L77	1,01	0,48	0,22	0,89	322,86	274,15	-0,60	0,78	6,44	8,62
P2 x L75	1,75	0,79	-0,25	0,91	364,55	561,45	1,91	0,14	10,85	10,80
P2 x L80	0,37	2,07	-0,13	0,49	260,91	357,56	-0,96	-0,02	5,78	10,57
P7 x L59	0,07	0,34	0,13	0,45	380,49	471,10	2,78	0,05	17,65	13,32
P7 x P6	-1,50	0,20	0,76	-0,14	-540,08	-443,77	0,71	0,63	-12,30	-9,57
P7 x L76	0,27	-0,87	-1,05	-1,93	768,31	786,36	1,51	-0,02	25,79	22,90
P7 x L77	1,71	2,43	0,27	0,36	512,41	605,81	-1,09	0,85	11,38	19,86
P7 x L75	1,96	-0,25	0,54	-0,02	392,02	373,05	1,49	0,21	12,24	8,32
P7 x L80	1,12	2,64	0,89	0,59	873,99	741,89	-0,35	0,05	24,54	24,25
L59 x P6	2,10	-1,95	-0,10	-0,70	231,31	117,43	1,04	0,23	7,82	3,24

DE: diâmetro de espiga; P100: peso de 100 grãos; PROD: produtividade de grãos; CE: capacidade de expansão; e VP: volume de pipoca expandida por hectare.

Tabela 17, Cont.

Híbridos	Capacidade Específica de Combinação ($\hat{\sigma}_{ij}$)									
	DE		P100		PROD		CE		VP	
	Baixo P	Alto P	Baixo P	Alto P	Baixo P	Alto P	Baixo P	Alto P	Baixo P	Alto P
L59 x L76	1,81	0,10	-0,33	0,38	-79,26	-89,91	-1,44	-0,42	-4,66	-2,91
L59 x L77	1,23	2,40	0,56	-0,56	-98,74	-75,86	2,23	0,45	1,73	-1,25
L59 x L75	1,30	1,49	1,30	1,20	342,97	315,86	-2,45	-0,20	-0,30	3,95
L59 x L80	-0,30	1,24	-1,06	-1,12	-253,07	-35,84	-0,03	-0,35	-5,90	-0,47
P6 x L76	-0,68	0,43	-0,04	-0,85	490,48	531,74	-0,24	0,16	11,68	15,52
P6 x L77	0,67	2,33	0,61	-0,60	596,97	585,00	1,19	1,03	18,90	18,74
P6 x L75	2,47	1,14	-0,34	-0,37	1262,43	1163,10	-0,56	0,39	25,91	27,55
P6 x L80	1,32	0,14	0,61	0,02	693,01	800,70	1,69	0,24	25,37	25,40
L76 x L77	-2,04	0,12	-1,49	-0,12	-312,37	-286,80	-1,21	0,38	-10,36	-8,15
L76 x L75	0,47	-0,07	0,16	1,76	299,76	354,87	1,40	-0,26	9,14	7,03
L76 x L80	2,30	1,95	1,21	-0,30	-268,68	-386,46	-0,39	-0,42	-8,99	-11,76
L77 x L75	2,34	1,13	1,29	-0,62	775,26	827,93	1,88	0,61	23,37	20,91
L77 x L80	1,56	2,21	0,13	0,19	284,96	249,58	0,02	0,45	7,61	8,27
L75 x L80	2,66	-0,86	0,10	-1,04	655,44	766,65	0,43	-0,19	17,93	20,04

DE: diâmetro de espiga; P100: peso de 100 grãos; PROD: produtividade de grãos; CE: capacidade de expansão; e VP: volume de pipoca expandida por hectare.

Os cinco híbridos com as maiores estimativas de $\hat{\sigma}_{ij}$ para a CE em Itaocara no ambiente de baixo fósforo foram: P7 x L59, P2 x L75, P6 x L80, P7 x L76 e P6 x L77. Ainda, em Itaocara no ambiente de alto fósforo, os híbridos P6 x L76, P7 x L77, P2 x P7, P2 x P6 e P7 x L75 expressaram superioridade fenotípica com base em $\hat{\sigma}_{ij}$. Dessas combinações, seis contiveram pelo menos um dos genitores com estimativas favoráveis de $\hat{\sigma}_i$, no caso, P7 x L59, P6 x L80, P7 x L76, P7 x L77, P2 x P7 e P7 x L75. Considerando a média dos locais, os híbridos que se sobressaíram no ambiente de baixo fósforo, foram: P7 x L59, L59 x L77, P2 x L75, L77 x L75 e P6 x L80 – e no ambiente de alto fósforo, foram: P6 x L77, P7 x L77, P2 x L77, P7 x P6 e L77 x L75.

Também vale destacar as combinações P7 x L80, P7 x L59, P7 x L76 e P6 x L80, pois além de apresentarem pelo menos um dos genitores de alta CGC para CE, também são pares que expressaram elevadas médias para PROD, com estimativas variando de 2.810,30 a 3.333,46 Kg ha⁻¹ entre os ambientes contrastantes, portanto, são híbridos interessantes para serem registrados e lançados como de interesse para cultivos visando ao aproveitamento da eficiência e responsividade no uso de fósforo.

Como a característica VP é associada à PROD e CE, é necessário que essas últimas tenham valores médios altos, ou que pelo menos uma delas se sobressaia com médias altas. Nessa situação, podem-se nomear as combinações híbridas P6 x L75, P6 x L80, P7 x L80, P7 x L76, e L77 x L75 como as que detiveram as estimativas mais pujantes de $\hat{\sigma}_{ij}$ (Tabela 17). Dentre essas combinações híbridas, coincidentemente todas mesmas ficaram ordenadas no primeiro grupo do algoritmo de Scott-Knott (1974), com exceção do par L77 x L75, além de expressarem altas médias para volume de pipoca expandida por hectare, variando de 82,90 a 98,66 m³ha⁻¹ nos ambientes de baixo e alto fósforo no solo.

A busca por ganhos adicionais na produtividade tem sido complementada com os esforços para o melhoramento de outros caracteres morfoagronômicos, como a redução da altura de plantas e da inserção de espigas para reduzir o percentual de acamamento e quebraimento das plantas, além de permitir um maior adensamento sem que haja competição populacional (Araújo, 1992). A planta do milho-pipoca possui o colmo mais fino comparado à planta do milho comum, tornando aquela mais suscetível ao acamamento e quebraimento de plantas. Para evitar esses problemas no campo, é necessária a indicação de cultivares de porte

baixo a médio. Assim, combinações híbridas com menores estimativas de $\hat{\sigma}_{ij}$ para AP e AE são desejáveis. Os híbridos com as menores estimativas de $\hat{\sigma}_{ij}$ para AP e AE nos ambientes de baixo e alto fósforo, foram: P2 x P7, P7 x P6, P7 x L59, P2 x P6 e P2 x L59 (Tabela 17).

Tendo como interesse a redução no ciclo de cultivo do milho-pipoca, as combinações híbridas indicadas em programas de melhoramento são as que expressam as menores estimativas de $\hat{\sigma}_{ij}$ para FM e FF. Neste caso, as combinações híbridas indicadas em programas de melhoramento são: P2 x L75, L59 x L77, L76 x L77 e L76 x L75, pois expressaram as menores estimativas de $\hat{\sigma}_{ij}$ para FM e FF no ambiente de alto fósforo. Por sua vez, no ambiente com estresse nutricional, as menores estimativas de $\hat{\sigma}_{ij}$ para FM recaíram para os pares P2 x L77, L77 x L75, L59 x L77, L75 x L80 e P2 x L75; e para FF, destacaram-se P2 x L77, L77 x L75, L59 x P6, L75 x L80 e L76 x L80.

Assim como ocorre para as características FM e FF, é importante selecionar genótipos com as menores estimativas de $\hat{\sigma}_{ij}$ para IF, principalmente nos ambientes com restrição nutricional, por possuírem maior tendência a promover retardamento na liberação de pólen e do estilo-estigma das plantas. As combinações híbridas com as menores estimativas de $\hat{\sigma}_{ij}$ para IF promoverão menores taxas de assincronia entre os florescimentos, conseqüentemente haverá menores prejuízos na produtividade. Neste caso, os híbridos indicados em programas de melhoramento no ambiente com estresse ao nutriente, são: L59 x P6, P7 x L59, P6 x L77, P2 x L80 e P2 x L59, ao passo que no ambiente sem restrição de fósforo houve supremacia dos pares P7 x L77, L77 x L75, P2 x L77, L76 x L80 e L59 x L80.

Assim como já discutido anteriormente, as características tamanho de espiga, diâmetro de espiga e peso de 100 grãos têm grande importância no melhoramento, pois são componentes de produção que possuem grau de associação para com rendimento de grãos, e a seleção com base nessas características pode proporcionar ganhos em outras características de interesse econômico. Com base nisso, os híbridos com as maiores estimativas de $\hat{\sigma}_{ij}$ para TE, DE e P100 são os mais indicados para comporem programas de melhoramento. Por conseguinte, em relação ao tamanho de espiga, L75 x L80, L59 x L76, P2 x L75, P6 x L77 e P2 x L76 destacaram-se com as maiores estimativas de $\hat{\sigma}_{ij}$ no ambiente com baixo teor de fósforo no solo; por sua vez, no ambiente com alto nível

de fósforo, sobressaíram-se P7 x L80, L76 x L80, P2 x L75, L77 x L75 e L59 x L77 (Tabela 17).

Para diâmetro de espiga, as combinações híbridas com as maiores estimativas de $\hat{\sigma}_{ij}$ no ambiente de baixo fósforo, foram L75 x L80, P6 x L75, L77 x L75, L76 x L80 e L59 x P6; no ambiente com teor alto fósforo, destacaram-se P7 x L80, P7 x L77, L59 x L77, P6 x L77 e L77 x L80 (Tabela 17). No que se refere a peso de 100 grãos (P100), L59 x L75, L77 x L75, L76 x L80, P7 x L80 e P7 x P6 foram os híbridos com as maiores estimativas de $\hat{\sigma}_{ij}$ no ambiente com estresse nutricional, ao passo que no ambiente sem estresse nutricional, as supremacias de $\hat{\sigma}_{ij}$ foram exibidas pelas combinações L76 x L75, L59 x L75, P2 x L75, P2 x L77 e P7 x L80 (Tabela 17).

De modo geral, as linhagens utilizadas neste dialelo possuem potencial genético para a exploração de híbridos quanto à eficiência e responsividade no uso de fósforo no solo. De todos os híbridos obtidos, há vários que são promissores para as variadas características analisadas individualmente. Em suma, considerando a predominância dos efeitos gênicos das características PROD, CE e VP, bem como suas médias expressas nos ambientes contrastantes, as combinações híbridas que apresentaram resultados promissores quanto à eficiência e responsividade no uso do fósforo, são sumariadas pelas combinações P7 x L80, P7 x L59, P7 x L76 e P6 x L80.

3.2.5. CONCLUSÕES

Os componentes quadráticos da CGC foram superiores nos ambientes de alto e baixo nível de fósforo para a capacidade de expansão, demonstrando predominância dos efeitos aditivos para a eficiência e responsividade no uso de fósforo.

Os componentes quadráticos da CEC foram superiores nos ambientes de alto e baixo nível de fósforo para produtividade de grãos e volume de pipoca expandida por hectare, demonstrando predominância dos efeitos não-aditivos desta com relação à eficiência e responsividade do uso de fósforo.

A melhor estratégia para obtenção de genótipos eficientes e responsivos no uso do fósforo consiste na exploração da heterose por meio da identificação de híbridos de milho-pipoca superiores, com o uso de genitores que proporcionem um acúmulo de genes aditivos para a capacidade de expansão.

Os híbridos P7 x L80, P7 x L59, P7 x L76 e P6 x L80 apresentaram-se como promissores, podendo ser avaliados como opções de cultivo em solos que apresentam deficiência para o fósforo.

O índice proposto por Parentoni foi o mais adequado para selecionar genótipos de milho-pipoca em programas de melhoramento para eficiência no uso do fósforo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahsan, M., Wright, D., Virk, D.S. (1996) Genetic analysis of salt tolerance in spring wheat (*Triticumaestivum* L.). *Cereal Research Communications*, 24:353-360.
- Allard, R.W. (1960) Principles of plant breeding. John Wiley and Sons, New York, 485p.
- Amaral Júnior, A.T., Freitas Júnior, S.P., Rangel, R.M., Pena, G.F., Ribeiro, R.M., Morais, R.C., Schuelter, A.R. (2010) Improvement of a popcorn population using selection indexes from a fourth cycle of recurrent selection program carried out in two different environments. *Genetics and Molecular Research*, 9:340-347.
- Amaral Júnior, A.T., Gonçalves, L.S.A., Freitas Júnior, S.P., Candido, L.S., Vittorazzi, C., Pena, G.F., Ribeiro, R.M., Silva, T.R.C., Pereira, M.G., Scapim, C.A., Viana, A.P., Carvalho, G.F. (2013) UENF-14: a new popcorn cultivar. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, 13:218-220.
- Amaral Júnior, A.T., Santos, A., Gerhardt, I.F.S., Kurosawa, R.N.F., Moreira, N.F., Pereira, M.G., Gravina, G.A., Silva, F.H.L. (2016) Proposal of a super trait for the optimum selection of popcorn progenies based on path analysis. *Genetics and Molecular Research*, 15.

- Anghinoni, I. (2006) Phosphorus forms and availability in Brazilian tropical and subtropical soils under management systems. *International Symposium On Phosphorus Dynamics In The Soil-Plant Continuum*, 10, Uberlândia. Proceedings... Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo.13-14.
- Araújo, P.M. (1992) *Variabilidade genética em subpopulações de milho (Zea mays L.) obtidas por seleção divergente*. Dissertação (Mestrado em Genética e Melhoramento de Plantas) – Piracicaba – SP, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”- Esalq, 153p.
- Arnhold, E., Viana, J.M.S., Silva, R.G. (2009) Association of performance among S3 families and topcross hybrids of popcorn. *Revista Ciência Agronômica*, 40:396-399.
- Baligar, V.C., Fageria, N.K., He, Z.L. (2001) Nutrient use efficiency in plants. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 32:921-950.
- Bänziger, M., Betrán, F.J., Lafitte, H.R. (1997) Efficiency of High-Nitrogen Selection Environments for Improving Maize for Low-Nitrogen Target Environments. *Crop Science*, 37:1103-1109.
- Barreto, A.C., Fernandes, M.F. (2002) Yield and phosphorus uptake by corn plants as affected by phosphorus fertilizer rates and placement in a coastal tableland soil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 26:151-156.
- Barros Filho, N.F., Comerford, N.B. (2005) Phosphorus sorption, desorption and resorption by soils of the Brazilian Cerrado supporting eucalypt. *Biomass and Bioenergy*, 28:229-236.
- Batten, G.D. (1992) A review of phosphorus efficiency in wheat. *Plant and Soil*, 146: 163-168.
- Bolaños J., Edmeades G.O. (1993) Eight cycles of selection for drought tolerance in low land tropical maize: II, responses in reproductive behaviour. *Field Crops Research*, 31, 253-268.
- Borlaug, N. (2000) *The green revolution revisited and the road ahead*. Oslo: The Norwegian Nobel Intitute, Special 30th Anniversary Lecture.

- Bouranis, D.L., Chorianopoulou, S.N., Kollias, C., Maniou, P., Protonotarios, V.E., Siyiannis, V. F., Hawkesford, M.J. (2006) Dynamics of aerenchyma distribution in the cortex of sulfate-deprived adventitious roots of maize. *Annals of Botany*, 97:695-704.
- Boutraa, T. (2009) Growth and carbon partitioning of two genotypes of bean (*Phaseolus vulgaris*) grown with low phosphorus availability. *EurAsian Journal of BioSciences*, 3:17-24.
- Brasil, E.C., Alves, V.M.C., Marriel, I.E., Pitta, G.V.E., Carvalho, J.G. (2007) Dry matter and mineral nutrition in efficient corn genotypes in relation to phosphorus acquisition. *Revista Ciência Agrotecnologia*, 31: 704-712.
- Buchanan, B.B., Gruissem, W., Jones, R.L. (2001) *Biochemistry & molecular biology of plants*. 2. ed. Rockville, Maryland: American Society of Plant Physiologists, 1367p.
- Cabral, P.D.C., Amaral Júnior, A.T., Freitas, I.L.J., Ribeiro, R.M., Silva, T.R.C. (2016) Cause and effect of quantitative characteristics on grain expansion capacity in popcorn. *Revista Ciência Agronômica*, 47:108-117.
- Camargo, C.E.O. (1984) Efeito de diferentes níveis de fósforo em solução nutritiva e no solo no comportamento de cultivares de trigo. *Bragantia*, 43:63-86.
- Chen, J., Xu, L., Cai, Y., Xu, J. (2009) Identification of QTLs for phosphorus utilization efficiency in maize (*Zea mays* L.) across P levels. *Euphytica*, 167:245-252.
- Clark, R.B, Brown, J.C. (1974) Diefferential phosphorus uptake by phosphorus-stressed corn inbreds. *Crop Science*, 14:505-508.
- Cock, W.R.S., Amaral Júnior, A.T., Bressan-Smith, R.E., Monnerat, P.H. (2002) Biometrical analysis of phosphorus use efficiency in lettuce cultivars adapted to high temperatures. *Euphytica*, 126: 299-308.
- Coelho, G.T.D.C.P., Souza, I.R.P.D., Carneiro, N.P., Schaffert, R.E., Brandão, R.L., Alves, V., Carneiro, A.A. (2010) Formação de aerênquima em raízes de milho sob estresse de fósforo. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, 5:443-449.

- Collins, N.C., Tardieu, F., Tuberosa, R. (2008) Quantitative Trait Loci and Crop Performance under Abiotic Stress: Where Do We Stand? *Plant Physiology*, 147:469-486.
- Comstock, R.E., Robinson, H.F. (1948) The components of genetic variance in populations of biparental progenies and their use in estimating the average degree of dominance. *Biometrics*, 4:254-266.
- Cordell, D., Drangert, J.O., White, S. (2009) The story of phosphorus: Global food security and food for thought. *Global Environmental Change*, 19:292–305.
- Cordell, D., Neset, T.S., Prior, T. (2012) The phosphorus mass balance: identifying 'hotspots' in the food system as a roadmap to phosphorus security. *Curr.Opin.Biotech*, 23:839-845.
- Cruz, C.D. (2013) GENES - a software package for analysis in experimental statistics and quantitative genetics. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 35: 271-276.
- Cruz, C.D., Carneiro, P.C.S., Regazzi, A.J. (2014) *Modelos biométricos aplicados ao melhoramento II*. 3. ed. Viçosa: Editora UFV, 668p.
- Cruz, C.D., Regazzi, A.J., Carneiro, P.C.S. (2012) *Modelos biométricos aplicados ao melhoramento I*. 4. ed. Viçosa: Editora UFV, 514p.
- Daros, M., Amaral Júnior, A.T., Pereira, M G., Santos, F.S. (2004a). Recurrent selection in inbred popcorn families. *Sci. Agric.*, 61, 609-614.
- Daros, M., Amaral Júnior, A.T., Pereira, M.G. (2002) Genetic gain for grain yield and popping expansion in full-sib recurrent selection in popcorn. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, 2:339-344.
- Daros, M., Amaral Júnior, A.T., Pereira, M.G., Santos, F.S., Scapim, C.A., Freitas Júnior, S.P., Daher, R.F., Ávila, M.R. (2004b) Correlations among agronomic traits in two recurrent selection cycles in popcorn. *Ciência Rural*, 34:1389-1394.
- Dechen, A.R., Nachtigall, R.G. (2007) Elementos requeridos à nutrição de plantas. In: Novais, R.F., Alvarez, V.H., Barros, N.F., Fontes, R.L., Cantarutti, R.B., Neves, J.C.L. (org) *Fertilidade do solo*. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 91-132.

- Dofing, S.M., D’Croz-Mason, Thomas-Compton, M.A. (1991) Inheritance of Expansion Volume and Yield in Two Popcorn × Dent Corn Crosses. *Crop Science*, 31:715–718.
- Duncan R.R. (1994) Genetic Manipulation *In: Wilkinson, R.E. (org), Plant environment interactions*. New York: Marcel Dekker, p. 1-38.
- Edwards, A.W.F., Cavalli-Sforza, L.L. (1965) A method for cluster analysis. *Biometrics*, 21:362-375.
- Erwin, A.T. (1949) The origin and history of popcorn, *Zea mays* L. var. *indurata* (Sturt.) Bailey mut. *Everta* (Sturt.) ERWIN. *Agron. J*, 41:53-56.
- Fageria, N.K., Baeta, A.B., Alexandre, B.H. (2011) Lowland rice genotypes evaluation for phosphorus use efficiency in tropical lowland. *Journal of Plant Nutrition*, 34:1087-1095.
- Falconer, D.S. (1987) *Introduction to quantitative genetics*. New York: Longman, 489p.
- Fan, M., Zhu, J., Richards, C., Brown, K.M., Lynch, J.P. (2003) Physiological roles for aerenchyma in phosphorus-stressed roots. *Functional Plant Biology*, 30:493-506.
- 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.
- Fernandes, C., Muraoka, T. (2002) Absorção de fósforo por híbridos de milho cultivados em solo de cerrado. *Scientia Agricola*, 59:781-787.
- Fidélis, R.R., Miranda, G.V., Pelúzio, J.M., Galvão, J.C.C. (2008) Classificação de populações de milho quanto a eficiência e resposta ao uso de fósforo em solos naturais de cerrado. *Bioscience Journal*, 24:39-45.
- Fischer, K.S., Johnson, E.C., Edmeades, G.O. (1983) Breeding and selection for drought in tropical maize. *Symposium on Principles and Methods in Crop*

Improvement for Drought Resistance: With emphasis on Rice. Mexico. CIMMYT, p. 16.

Freitas, I.L.J., Amaral Júnior, A.T., Freitas Júnior, S.P., Cabral, P.D.S., Ribeiro, R.M., Goncalves, L.S.A. (2014). Genetic gains in the UENF-14 popcorn population with recurrent selection. *Genetics and Molecular Research*, 13:518-527.

Freitas Júnior, S.P., Amaral Júnior, A.T., Pereira, M.G., Cruz, C.D., Scapim, C.A. (2006) Capacidade combinatória em milho-pipoca por meio de dialelo circulante. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 41:1599-1607.

Freitas Júnior, S.P., Amaral Júnior, A.T., Rangel, R.M., Viana, A.P. (2009) Genetic gains in popcorn by full-sib recurrent selection. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, 9:1-7.

Fritsche-Neto, R., Miranda, G.V., DeLima, R.O., Souza, L.V., Silva, J. (2010) Herança de caracteres associados à eficiência de utilização do fósforo em milho. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 45:465-471.

Fukuda, T., Saito, A., Wasaki, J., Shinano, T., Osaki, M. (2007) Metabolic alterations proposed by proteome in rice roots grown under low P and high Al concentration under low pH. *Plant Science*, 172:1157-1165.

Furlani, A.M.C., Bataglia, O.C., Lima, M. (1985) Eficiência de linhagens de milho na absorção e utilização de fósforo em solução nutritiva. *Bragantia*, 44:129-147.

Furlani, A.M.C., Clark, R.B., Maranville, J.W., Ross, W.M. (1984) Sorghum genotype differences in phosphorus uptake rate and distribution in plant parts. *Journal of Plant Nutrition*, 7:1113-1126.

Furlani, A.M.C., Lima, M., Nass, L.L. (1998) Combining ability effects for P-efficiency characters in maize grown in low P nutrition. *Maydica*, 43: 169-174.

Furlani, A.M.C., Usberti Filho, J.A. (1990) Capim-colonião: eficiência na absorção e na utilização de fósforo em solução nutritiva. *Bragantia*, 49:413-423.

- Gabelman, W.H., Gerloff, G.C. (1983) The search and interpretation of genetic controls that enhance plant growth under deficiency levels of a macronutrient. *Plant and Soil*, 72:335-350.
- Galinat, W.C. (1977) The origin of corn. *In*: Sprague, G.F. (org) *Corn and corn improvement*. New York: Academic Press 1-48.
- Gardner, C.O., Eberhart, S.A. (1966). Analysis and interpretation of the variety cross diallel and related populations. *Biometrics* 22: 439-452.
- Geraldi, I.O., Miranda Filho, J.B., Vencovsky, R. (1985) Estimates of genetic parameters for tassel characters in maize (*Zea mays* L.) and breeding perspectives. *Maydica*, 30:1-14.
- Gerhardt, I.F.S., Amaral Júnior, A.T., Guimarães, L.J.M., Schwantes, I.A., Santos, A., Kamphorst, S.H., Lima, V.J., Poblete, F.M., Myers, G.O. (2017) Intraspecific variability of popcorn S7 lines for phosphorus efficiency in the soil. *Genetics and Molecular Research*, 16.
- Gerloff, G.C. (1976) Plant efficiencies in the use of nitrogen, phosphorus and potassium. *Workshop on plant adaptation to mineral stress in problem soils*, Ithaca: Cornell University Agricultural Experimental Station, p.161-173.
- Gong, X., Wheeler, R., Bovill, W. D., McDonald, G.K. (2016) QTL mapping of grain yield and phosphorus efficiency in barley in a Mediterranean - like environment. *Theoretical and Applied Genetics*, 129:1657-1672.
- Goodman, M.M (1987). História e origem do milho. *In*: Paterniani, E. *Melhoramento e produção do milho no Brasil*. Piracicaba, Esalq Fundação Cargill, p. 3-38.
- Goodman, M.M., Smith, J.S.C. (1987). Botânica *In*: Paterniani, E., Viegas, G.(org). *Melhoramento e produção de milho*. Campinas, Fundação Cargil, p. 1:41-78.
- Gorz, H.J., Haskins, F.A., Pedersen, J.F., Ross, W.M. (1987) Combining ability effects for mineral elements in forage sorghum hybrids. *Crop Science*, 27: 216-219.

- Grant, C.A., Flaten, D.N., Tomaszewicz, D.J., Sheppard, S.C. (2001) The Importance of Early Season Phosphorus Nutrition. *Canadian Journal of Plant Science*, 81:211-224.
- Griffing, B. (1956) Concept of general and specific combining ability in relation to diallel crossing system. *Aust. J. Biol. Sci.*, 9:463 - 493.
- Gu, R., Chen, F., Long, L., Cai, H., Liu, Z., Yang, J., Wang, L., Li, H., Li, J., Liu, W., Mi, G., Zhang, F., Yung, G. (2016) Enhancing phosphorus uptake efficiency through QTL-based selection for root system architecture in maize. *Journal of Genetics and Genomics*, 43:663-672.
- Guadagnin, J.P. (1996) *Milho Pipoca*. Porto Alegre: Embrapa/Fepagro, p. 11, Circular Técnica, 9.
- Guimarães, A.G., Amaral Júnior, A.T., Almeida Filho, J.E., Pena, G.F., Vittorazzi, C., Pereira, M.G. (2018) Population structure and impact of recurrent selection on popcorn using EST-SSR markers. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 40:1-10.
- Hallauer, A.R., Carena, M.J., Miranda Filho, J.B. (2010) *Quantitative genetics in maize breeding*. New York: Springer, 580p.
- Hammond, J.P., Broadley, M.R., White, P.J. (2004) Genetic responses to phosphorus deficiency. *Annals of Botany*, 94:323-332.
- Hayman, B.I. (1954). The analysis of variance of diallel tables. *Biometrics* 10:235-244.
- He, Z.L., Wu, J., O'Donnell, A.G., Syers, J.K. (1997) Seasonal responses in microbial biomass carbon, phosphorus and sulphur in soils under pasture. *Biology and Fertility of Soils*, 24:421-428.
- Helgadóttir, A., Ostrem, L., Collins, R. P., Humphreys, M., Marshall, A., Julier, B., Gastal, F., Barre, Ph., Louarn, G. (2016) Breeding Forages to Cope with Environmental Challenges in the Light of Climate Change and Resource Limitations. In: Roldán-Ruiz, I., Baert, J., Reheul, D. (org) *Breeding in a World of Scarcity*. Springer, p. 3-13.

- Heuer, S., Gaxiola, R., Schilling, R., Herrera-Estrella, L., López-Arredondo, D., Wissuwa, M., Delhaize, E., Rouached, H. (2017) Improving phosphorus use efficiency: a complex trait with emerging opportunities. *The plant Journal*, 90:868–885.
- Hirut, B., Shimelis, H., Fentahun, M., Bonierbale, M., Gastelo, M., Asfaw, A. (2017) Combining ability of highland tropic adapted potato for tuber yield and yield components under drought. *Plos One*, 12:1-22.
- Horst, W.J., Abdou, M., Wiesler, F. (1993) Genotypic differences in phosphorus efficiency of wheat. *Plant and Soil*, 155:293-296.
- Ijarotimi, S.O., Keshinro, O.O. (2011) Determination of Amino Acid, Fatty Acid, Mineral, Functional and Choking Properties of Germinated and Fermented Popcorn (*Zea mays everta*) Flour. *European Journal of Food Research & Review*, 1:102-122.
- James, R. A., Weligama, C., Verbyla, K., Ryan, P. R., Rebetzke, G. J., Rattey, A., Richardson, A. E., Delhaize, E. (2016) Rhizosheaths on wheat grown in acid soils: phosphorus acquisition efficiency and genetic control. *Journal of Experimental Botany*, 67:3709-3718.
- Kamphorst, S.H., Lima, V.J., Amaral Júnior, A.T., Schmitt, K.F.M., Leite, J.T., Silva, B.L.S., Campostrini, E. (2017) Water stress in popcorn genotypes: canopy temperature and root architecture system. *2nd Agriculture and Climate Change Conference*, Barcelona.
- Kantety, R.V., Zeng, X., Bennetzen, J., Zehr, B.E. (1995) Assessment of genetic diversity in dent and popcorn (*Zea mays* L.) inbred lines using inter-simple sequence repeat (ISSR) amplification. *Molecular Breeding*, 1:365-373.
- Kizilgeçi, F., Yildirim, M., Akinci, C. (2016) Nitrogen Use Efficiency (NUE) Changes in Durum Wheat Parents and Their F2 Progenies Under Different Nitrogen Conditions. *Journal of Agricultural Faculty of Gaziosmanpasa University*, 33:96-102.
- Lafitte, H.R., Edmeades, G.O. (1994) Improvement for tolerance to low soil nitrogen in tropical maize: I., selection criteria. *Field Crops Research*, 39:1-14.

- Larish, L.L.B., Brewbaker, J.L. (1999) Diallel analyses of temperate and tropical popcorns. *Maydica*, 44: 279-284.
- Li, H., Yang, Y., Zhang, H., Chu, S., Zhang, X., Yin, D., Yu, D., Zhang, D. (2016) A genetic relationship between phosphorus efficiency and photosynthetic traits in soybean as revealed by QTL analysis using a high-density genetic map. *Frontiers in Plant Science*, 7:1-16.
- Lindgren, D.T., Gabelman, W.H., Gerloff, G.C. (1977) Variability of phosphorus uptake and translocation in *Phaseolus vulgaris* L. under phosphorus stress. *Journal American Society for Horticultural Science*, 102:674-677.
- Lira, M.A. (1983) *Seleção entre e dentro de famílias de meios-irmãos para produção e capacidade de expansão e correlações entre alguns caracteres em milho pipoca (Zea mays L.)*. Tese (Mestrado em Fitotecnia) - Lavras - MG, UFLA, 62p.
- Lopes, S.J., Lúcio, A.D.C., Storck, L., Damo, H.P., Brum, B., Santos, V.J. (2007) Path analysis on maize spikes characteristics related of the hybrid type. *Ciência Rural*, 37:1536-1542.
- Lu, H.J., Bernardo, R., Ohm, H. (2003) Mapping QTL for popping expansion volume in popcorn with simple sequence repeat markers. *Theoretical and Applied Genetics*, 106:423-427.
- Ma, Z., Baskin, T.I., Brown, K.M., Lynch, J.P. (2003) Regulation of root elongation under phosphorus stress involves changes in ethylene responsiveness. *Plant Physiology*, 131:1381-1390.
- Machado, C.T.T., Furlani, A.M.C., Machado, A.T. (2001) Índices de eficiência de variedades locais e melhoradas de milho ao fósforo. *Bragantia*, 60:225-238.
- Machado, J.A. (1980) *Melhoramento genético de milho doce (Zea mays L.)*. Tese (Mestrado em Genética e Melhoramento de Plantas) - Piracicaba - SP, ESALQ, 78p.
- Mangelsdorf, P.C. (1974) *Corn: its origin, evolution and improvement*. Cambridge: Havard University Press, 262p.

- Mangelsdorf, P.C., Smith Jr., C.E. (1949) A discovery of remains of primitive maize in New Mexico. *J. Hered.*, 17:39-43.
- Marcante, N.C., Muraoka, T., Bruno, I.P., Camacho, M.A. (2016) Phosphorus uptake and use efficiency of different cotton cultivars in savannah soil (Acrisol). *Acta Scientiarum. Agronomy*, 38:239-247.
- March, M.D., Toma, L., Stott, A.W., Roberts, D.J. (2016) Modelling phosphorus efficiency within diverse dairy farming systems – pollutant and non-renewable resource? *Ecological Indicators*, 69:667-676.
- Mather, K., Jinks, J. (1977) *Introduction to biometrical genetics*. Springer US, 231p.
- Matta, F.P., Viana, J.M.S. (2001). Testes de capacidade de expansão em programas de melhoramento de milho pipoca. *Sci. agric.* 58:845-851.
- Medici, L.O., Pereira, M.B., Lea, P.J., Azevedo, R.A. (2004) Diallel analysis of maize lines with contrasting responses to applied nitrogen. *The Journal of Agricultural Science*, 142:535-541.
- Meirelles, W.F., Parentoni, S.N., Guimarães, L.J.M., Guimarães, P.E.O., Pacheco, C.A.P., Oliveira, A.C., Mendes, F.F., Scapim, C.A. (2016) Diallel analysis of maize lines as to their phosphorus responsiveness and use efficiency. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 51:224-232.
- Mendes, F.F., Guimarães, L.J.M., Guimarães, C.T., Souza, J.C., Guimarães, P.E.O., Parentoni, S.N. (2015) Genetic control of traits related to phosphorus use efficiency in tropical maize. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, 15:59-65.
- Mendes, F.F., Guimarães, L.J.M., Souza, J.C., Guimarães, P.E.O., Magalhães, J.V., Garcia, A.A.F., Parentoni, S.N., Guimarães, C.T. (2014) Genetic Architecture of Phosphorus Use Efficiency in Tropical Maize Cultivated in a Low-P Soil. *Crop Science*, 54:1530-1538.
- Mendes, F.F., Guimarães, L.J.M., Souza, J.C., Guimarães, P.E.O., Pacheco, C.A.P., Machado, J.R.D.A., Meirelles, W.F., Silva, A.R., Parentoni, S.N. (2012)

Adaptability and stability of maize varieties using mixed model methodology. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, 12:111-117.

- Missaoui, A.M., Young, J. (2016) Genetic gain from selection and potential for improving alfalfa phosphorus uptake and removal from soils heavily amended with poultry litter. *Euphytica*, 209: 495-506.
- Mojena, R. (1977) Hierárquical grouping method and stopping rules: an evaluation. *Computer Journal*, 20:359-363.
- Moll, R.H., Kamprath, E.J., Jackson, W.A. (1982) Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen utilization. *Agronomy Journal*, 74:562-564.
- Moll, R.H., Lonquist, J.H., Fortuna, J.V., Johnson, E.C. (1965) The relation of heterosis and genetic divergence in maize. *Genetics*, 52:139-144.
- Moterle, L.M., Braccini, A.L., Scapim, C.A., Pinto, R.J.B., Gonçalves, L.S.A., Rodrigues, R., Amaral Júnior, A.T. (2012) Combining ability of popcorn lines for seed quality and agronomic traits. *Euphytica*, 185:337-347.
- Moura, W.M., Casali, V.D.W., Cruz, C.D., Lima, P.C. (1999) Genetic divergence of phosphorus nutritional efficiency in sweet pepper lines. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 34:217-224.
- Mundim, G.B., Viana, J.M.S., Maia, C. (2013) Early evaluation of popcorn inbred lines for phosphorus use efficiency. *Plant Breeding*, 132:613-619.
- Murrel, T.S., Fixen, P.E. (2006) Improving fertilizer phosphorus effectiveness: challenges for the future. *International Symposium On Phosphorus Dynamics In The Soil plant Continuum*, 3, Uberlândia: Embrapa Milho e Sorgo, p.150-151.
- Novais, R.F., Alvarez, V.H., Barros, N.F., Fontes, R.L., Cantarutti, R.B., Neves, J.C.L. (2007) *Fertilidade do Solo*. Viçosa – MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1017p.
- Ochoa, I.E., Blair, M.W., Lynch, J.P. (2006) QTL analysis for adventitious root formation in common bean under contrasting phosphorus availability. *Crop Science*, 46, 1609-1621.

- Parentoni, S.N. (2000) Eficiência na utilização de fósforo em genótipos de milho. *Congresso Nacional de Milho e Sorgo*, 23, Uberlândia: Abms/Embrapa Milho e Sorgo.
- Parentoni, S.N., Alves, V.M.C., Milach, S.K., Cançado, G.M.A., Bahia Filho, A.F.C. (2001) Melhoramento para tolerância ao alumínio como fator de adaptação a solos ácidos. *In: Nass, L.L., Valois, A.C.C., Melo, I.S., Valedares-Ingles, M.C. (org) Recursos genéticos e melhoramento de plantas*. Rondonópolis: Fundação MT.
- Parentoni, S.N., Mendes, F.F., Guimarães, L.J.M. (2011) Melhoramento para eficiência no uso de P. *In: Fritsche-Neto, R., Borém, A. (org) Melhoramento de plantas para condições de estresses abióticos*. Viçosa: Editora UFV, p.101-126.
- Parentoni, S.N., Souza Jr., C.I., Alves, V.M.C., Gama, E.E.G., Coelho, A.M., Oliveira, A.C., Guimarães, P.E.O., Vasconcelos, M.J.V., Pacheco, C.A.P., Meirelles, W.F., Magalhães, J.V., Guimarães, L.J.M., Silva, A.R., Mendes, F.F., Schaffert, R.E. (2010) Inheritance and Breeding Strategies for Phosphorus Efficiency in Tropical Maize (*Zeamays L.*). *Maydica*, 55:1-15.
- Parentoni, S.N., Souza Junior, C.L. (2008) Phosphorus acquisition and internal utilization efficiency in tropical maize genotypes. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília 43:893-901.
- Paterniani, E., Campos, M.S. (2005) Melhoramento do milho. *In: Borém, A. (org) Melhoramento de espécies cultivadas*. 2 ed. Viçosa: Editora UFV, p. 491-552.
- Pereira, M.G., Amaral Júnior, A.T. (2001) Estimation of Genetic Components in Popcorn Based on the Nested Design. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, 1:3-10.
- Pimentel-Gomes, F. (2009) *Curso de estatística experimental*. 15. ed. Piracicaba: Fealq, 451p.
- Pimentel-Gomes, F., Garcia, C.H. (2002) *Estatística aplicada a experimentos agrônômicos e florestais: exposição com exemplos e orientações para uso de aplicativos*. Piracicaba: Fealq, 309 p.

- 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: Editora UFLA, 522p.
- Ramalho, M.A.P., Ferreira, D.F., Oliveira, A.C. (2000) *Experimentação em Genética e Melhoramento de Plantas*. 3. ed. Lavras: Editora UFLA, 322p.
- Ramalho, M.A.P., Santos, J.B., Zimmermann, M.J. (1993) *Genética quantitativa em plantas autógamas: aplicações ao melhoramento genético do feijoeiro*. Goiânia: UFG, 271p.
- Rangel, M.M., Amaral Júnior, A.T., Gonçalves, L.S.A., Freitas Júnior, S.P., Candido, L.S. (2011) Análise biométrica de ganhos por seleção em população de milho pipoca de quinto ciclo de seleção recorrente. *Revista Ciência Agronômica* 42:473-481.
- Rangel, R.M., Amaral Júnior, A.T., Viana, A.P., Freitas Júnior, S.P., Pereira, M.G. (2007) Prediction of popcorn hybrid and composites means. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, 7:287-295.
- Rao, C.R. (1952) *Advanced statistical methods in biometric research*. New York: John Wiley and Sons, 390p.
- Reina, E., Peluzio, J.M., Afferri, F.S., Oliveira Júnior, W.P., Siebeneichler, S.C. (2014) Genetic divergence and phosphorus use efficiency in the soybean with a view to biodiesel production. *Revista Ciência Agronômica*, 45:344-350.
- Reis, G.G., Pereira, F.B., Granato, I.S.C., Do Vale, J.C., Fritsche-Neto, R. (2017) Tropical maize selection indexes genotypes for efficiency in use of nutrients: phosphorus. *Revista Ceres*, 64:266-273.
- Ribaut, J.M., Hoisington, D.A., Deutsch, J.A., Jiang, C., Gonzalez-de-Leon, D. (1996) Identification of quantitative trait loci under drought conditions in tropical maize: I. flowering parameters and the anthesis-silking interval. *Theoretical and Applied Genetics*, 92:905–914.
- Ribeiro, R.M., Amaral Júnior, A.T., Gonçalves, L.S.A., Candido, L.S., Silva, T.R.C., Pena, G.F. (2012) Genetic progress in the UNB-2U population of popcorn under

- recurrent selection in Rio de Janeiro, Brazil. *Genetics and Molecular Research*, 11:1417-1423.
- Rowe, H., Withers, P.J.A., Baas, P., Chan, N.L., Doody, D., Holiman, J., Jacobs, B., Li, H., MacDonald, G.K., McDowell, R., Sharpley, A.N., Shen, J., Taheri, W., Wallenstein, M., Weintraub, M.N. (2016) Integrating legacy soil phosphorus into sustainable nutrient management strategies for future food, bioenergy and water security. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 104:393-412.
- Santos, A., Amaral Junior, A.T., Kurosawa, R.N.F., Gerhardt, I.F.S., Fritsche-Neto, R. (2017) *Ciência e Agrotecnologia*, 41:22-31.
- Santos, D.R., Gatiboni, L.C., Kaminski, J. (2008) Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. *Ciência Rural*, 38:576-586.
- Santos, F.S., Amaral Junior, A.T., Freitas Junior, S.P., Rangel, M.R., Pereira, M.G. (2007) Predição de ganhos genéticos por índices de seleção na população de milho-pipoca UNB-2U sob seleção recorrente, *Bragantia*, 66:389-396.
- Santos, M.X., Guimarães, P.E.O, Pacheco, C.A.P., França, G.E., Parentoni, S.N., Gama, E.E.G., Lopes, M.A. (1998) Improvement in the synthetic elite NT for soils with low nitrogen content. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 33:55-61.
- Santos, O.J.A.P., Gonçalves, L.S.A., Scapim, C.A., Sousa, S.M., Castro, C.R., Baba, V.Y., Oliveira, A.L.M. (2016) Screening of inbred popcorn lines for tolerance to low phosphorus. *Genetics and Molecular Research*, 15:1-9.
- Savary, S., Ficke, A., Hollier, C.A. (2014) Impacts of Global Change on Crop Production and Food Security. *Global Environmental Change*, 1:379-387.
- Sávio, F.L., Faria, P.N., Pereira, W.A., Oliveira, A.B., Tardin, F.D., Rodrigues, J.A.S., Schaffert, R.E. (2008) Genetic divergence among sorghum hybrids cultivated in nutritive solution with different phosphorus levels. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, 7:305-321.
- Sawazaki, E. (2001) A cultura do milho pipoca no Brasil. *O Agrônomo*, Campinas, 53:11-13.

- Scapim, C. A., Pacheco, C.A.P., Amaral Júnior, A.T., Vieira, R.A., Pinto, R.J.B., Conrado, T.V. (2010) Correlations between the stability and adaptability statistics of popcorn cultivars. *Euphytica*, 174:209-218.
- Scholz, R.W., Ulrich, A.E., Eilittä, M., Roy, A. (2013) Sustainable use of phosphorus: a finite resource. *Sci. Total Environ*, 461-462:799-803.
- Schwantes, I.A., Amaral Junior, A.T., Gerhardt, I.F.S., Vivas, M., Silva, F.H.L., Kamphorst, S.H. (2017) Diallel analysis of resistance to *Fusarium* ear rot in Brazilian popcorn genotypes. *Tropical Plant Pathology*, 42:70-75.
- Scott, A.J., Knott, M. (1974) Cluster Analysis Method for Grouping Means in the Analysis of Variance. *Biometrics*, 30:507-512.
- Silva, K.C.L., Silva, K.P., Carvalho, E.V., Rotili, E.A., Afférri, F.S., Peluzio, J.M. (2015) Genetic diversity in maize genotypes with and without a topdressing of nitrogen fertilizer. *Revista Agro@ambiente On-line*, 9:102-110.
- Silva, V.Q.R., Amaral Júnior, A.T., Gonçalves, L.S.A., Freitas Júnior, S.P., Candido, L.S., Vittorazzi, C., Moterle, L.M., Vieira, R.A., Scapim, C.A. (2010) Combining ability of tropical and temperate inbred lines of popcorn. *Genetics and Molecular Research*, 9:1742-1750.
- Soares, M.O., Miranda, G.V., Guimarães, L.J.M., Marriel, I.E., Guimarães, C.T. (2011) Genetic parameters of a maize population in contrasting nitrogen levels. *Revista Ciência Agronômica*, 42:168-174.
- Spehar, C.R. (1995) Diallel analysis for mineral element absorption in tropical adapted soybeans [*Glycine max* (L.) Merrill]. *Theoretical and Applied Genetics*, 90:707-713.
- Sprague G.F., Tatum, L.A. (1942) General vs. Specific combining ability in single crosses of corn. *Journal of the American Society of Agronomy*, 34:923-932.
- Su, J., Li, H., Li, B., Jing, R., Tong, Y., Li, Z. (2009) Detection of QTLs for phosphorus use efficiency in relation to agronomic performance of wheat grown under phosphorus sufficient and limited conditions. *Plant Science*, 176:824-836.
- Taiz, L., Zeiger, E. (2013) *Fisiologia vegetal*. 5. ed. Porto Alegre: Artmed, 819p.

- Tenkorang, F., Lowenberg-Deboer, J. (2009) Forecasting long-term global fertilizer demand. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 83:233–247.
- Uzokwe, V.N.E., Asafo-Adiei, B., Fawole, I., Abaidoo, R., Odeh, I.O.A., Ojo, D.K., Dashiell, K., Sanginga, N. (2017) Generation mean analysis of phosphorus-use efficiency in freely nodulating soybean crosses grown in low-phosphorus soil. *Plant Breeding*, 136:139–146.
- Vencovsky, R., Barriga, P. (1992) *Genética Biométrica no fitomelhoramento*. Ribeirão Preto: Revista Brasileira de Genética, 486p.
- Viana, A.P., Resende, M.D.V. (2014) *Genética Quantitativa no Melhoramento de Fruteiras*. Campos dos Goytacazes: Interciência, 282p.
- Vieira, R.A., Scapim, C.A., Tessman D.J., Hata, F.T. (2011) Diallel analysis of yield, popping expansion, and southern rust resistance in popcorn lines. *Revista Ciência Agronômica*, 42:774-780.
- Ward, J.H. (1963) Hierarchical grouping to optimize an objective function. *J. Amer. Statist. Assoc*, 58:236-244.
- Welcker, C., Thé, C., Andréau, B., De Leon, C., Parentoni, S.N., Bernal, J., Félicité, J., Zonkeng, C., Salazar, F., Narro, L., Charcosset, A., Horst, W.J. (2005) Heterosis and combining ability for maize adaptation to tropical acid soils: implications for future breeding strategies. *Crop Sci*, 45:2405-2413.
- Whiteaker, G., Gerloff, G.C., Gabelman, W.H., Lindgren, D. (1976) Intraspecific differences in growth of beans at stress levels of phosphorus. *Journal of American Society for Horticultural Science*, 10:472-475.
- Wieneke, J. (1990) Phosphorus efficiency and phosphorus remobilization in two sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) cultivars. *Plant and Soil*, 123:139-145.
- Xie, F., Hardy, B. (2009) *Accelerating hybrid rice development*. Los Baños-Philippines: International Rice Research Institute, 698p.
- Yu-Ling, L., Young-Bing, D., Su-Zhen, N. (2006) QTL Analysis of Popping Fold and the Consistency of QTLs Under Two Environments in Popcorn. *Acta Genetica Sinica*, 33:724-732.

- Zhang, D., Cheng, H., Geng, L., Kan, G., Cui, S., Meng, Q., Gai, J., Yu, D. (2009) Detection of quantitative trait loci for phosphorus deficiency tolerance at soybean seedling stage. *Euphytica*, 167:313-322.
- Zhu, J., Mickelson, S.M., Kaeppler, S.M., Lynch, J.P. (2006) Detection of quantitative trait loci for seminal root traits in maize (*Zea mays* L.) seedlings grown under differential phosphorus levels. *Theoretical and Applied Genetics*, 113:1-10.
- Ziegler, K. E. (2001) Popcorn. *In*: Hallauer, A. (org) *Specialty Corn*. CRC Press, Boca Raton, FL, p.199–234.
- Ziegler, K.E., Ashman, B. (1994) Popcorn. *In*: Hallauer, A. (org) *Specialty corns*. Iowa, CRC Press, 7:189-223.
- Zinsly, J.R., Machado, J.A. (1987) Milho-pipoca. *In*: Paterniani, E., Viégas, G. P. (org) *Melhoramento e produção do milho*. 2. ed. Campinas: Fundação Cargill. p.413-421.