

**SCREENING DE LINHAGENS S₇ E HÍBRIDOS DE MILHO-PIPOCA
PARA AMBIENTAÇÃO AO DÉFICIT DE NITROGÊNIO NO SOLO**

YURE PEQUENO DE SOUZA

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

**CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
MARÇO – 2021**

**SCREENING DE LINHAGENS S₇ E HÍBRIDOS DE MILHO-PIPOCA
PARA AMBIENTAÇÃO AO DÉFICIT DE NITROGÊNIO NO SOLO**

YURE PEQUENO DE SOUZA

“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 Junior

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
MARÇO – 2021

FICHA CATALOGRÁFICA

UENF - Bibliotecas

Elaborada com os dados fornecidos pelo autor.

S729

Souza, Yure Pequeno de.

SCREENING DE LINHAGENS S₇ E HÍBRIDOS DE MILHO-PIPOCA PARA AMBIENTAÇÃO AO DÉFICIT DE NITROGÊNIO NO SOLO / Yure Pequeno de Souza. - Campos dos Goytacazes, RJ, 2021.

110 f. : il.

Bibliografia: 70 - 87.

Tese (Doutorado em Genética e Melhoramento de Plantas) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias, 2021.
Orientador: Antonio Teixeira do Amaral Junior.

1. *Zea mays* L. var. Everta. 2. estresse abiótico. 3. topcross. I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. II. Título.

CDD - 631.5233

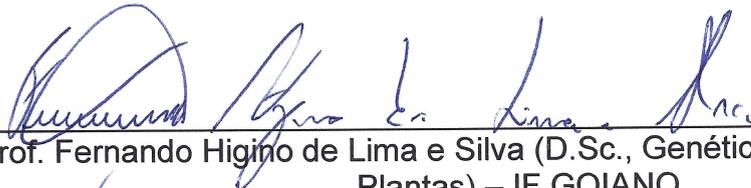
SCREENING DE LINHAGENS S₇ E HÍBRIDOS DE MILHO-PIPOCA
PARA AMBIENTAÇÃO AO DÉFICIT DE NITROGÊNIO NO SOLO

YURE PEQUENO DE SOUZA

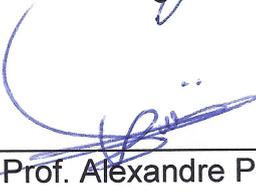
“Tese apresentada ao Centro de Ciências e
Tecnologias Agropecuárias da Universidade
Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro,
como parte das exigências para obtenção do
título de Doutor em Genética e Melhoramento de
Plantas”

Aprovada em 19 de março de 2021

Comissão Examinadora:



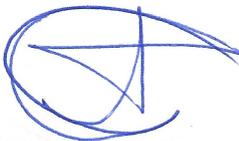
Prof. Fernando Higino de Lima e Silva (D.Sc., Genética e Melhoramento de
Plantas) – IF GOIANO



Prof. Alexandre Pio Viana (D.Sc., Produção Vegetal) - UENF



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



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

DEDICATÓRIA

À minha família, em especial, ao grande amor da minha vida, minha mãe Maria Valmira Alves Pequeno Souza (*in memoriam*)

Dedico com muito amor e carinho.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me capacitar e possibilitar sabedoria e discernimento para superar os obstáculos;

À minha mãe, Maria Valmira (*in memoriam*) pelo seu exemplo de garra e determinação e por ser minha maior incentivadora, ao meu pai José Dias, pelo seu amor, e a minha irmã Ingrid Souza, minha grande amiga.

À Talita Chaves, pela paciência, pelo amor e confiança;

Aos meus familiares, pelo apoio incondicional nas horas difíceis e nos momentos de alegria.

À Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro e ao Programa de Pós-Graduação em Genética e Melhoramento de Plantas, pela oportunidade concedida. E a todos os professores do programa pela contribuição na minha formação.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de doutorado. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Ao meu orientador, Professor Antônio Teixeira do Amaral Junior, pela oportunidade, orientação, incentivo e suporte para realização da pesquisa.

Aos meus conselheiros e membros da comissão examinadora, professores Alexandre Pio Viana, Messias Gonzaga Pereira, Fernando Higino de Lima e Silva e Marcelo Vivas, pelas sugestões fornecidas para o aperfeiçoamento deste trabalho.

Ao secretário José Daniel, pelo trabalho de excelência que realiza, bem como por sua disponibilidade em ajudar.

Aos técnicos de campo, seu Geraldo, José Manoel, Leandro Hespanhol, Luzimara e Durval por toda ajuda na condução dos experimentos.

Aos companheiros do time de Melhoramento de Milho-pipoca.

Aos amigos conquistados na UENF, Derivaldo Pureza, José Arantes, Juliana Saltires, Gabrielle Mafra, Fábio Tomaz, Shahid Khan, Valdinei Azeredo, Fernando Ferreira, Janeo Eustáquio, Ismael Albino, Gabriel Moreno, Rysley Fernandes, Marcelo Moura, Jhean Torres, Maria do Socorro, Antônio André, Rafael Nunes, Luana Vasconcelos, Mariana Mangeiro, Fernanda Valadares, Ramon Moraes e Julio Saluci.

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

SUMÁRIO

RESUMO	vii
ABSTRACT	ix
1. INTRODUÇÃO	1
2.OBJETIVOS	3
3.CAPÍTULOS	4
3.1. PROSPECÇÃO DE LINHAGENS DE MILHO-PIPOCA EFICIENTES E RESPONSIVAS NO USO DO NITROGÊNIO	4
3.1.1. INTRODUÇÃO	4
3.1.2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
3.1.2.1. Aspectos morfológicos e econômicos do milho-pipoca.....	6
3.1.2.2. Uso e importância do nitrogênio para milho	9
3.1.2.3. Melhoramento para Eficiência no Uso do Nitrogênio	11
3.1.3. MATERIAL E MÉTODOS	15
3.1.3.1. Material genético e condições experimentais	15
3.1.3.2. Caracterização dos ambientes em relação à disponibilidade de nitrogênio.....	17
3.1.3.3. Características avaliadas	17
3.1.3.4. Classificação das linhagens quanto à eficiência e responsividade ao nitrogênio	18

3.1.3.5. Análises estatísticas.....	18
3.1.4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	19
3.1.4.1. Análise de variância e parâmetros genéticos.....	19
3.1.4.2. Seleção das linhagens eficientes e responsivas ao uso do nitrogênio.....	23
3.1.5. CONCLUSÃO	29
3.2. HABILIDADE COMBINATÓRIA DE TOPCROSSES DE MILHO-PIPOCA PARA TESTADORES CONTRASTANTES QUANTO À EFICIÊNCIA E RESPONSIVIDADE AO NITROGÊNIO NO SOLO.....	30
3.2.1. INTRODUÇÃO	30
3.2.2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	32
3.2.2.1. Aplicação do <i>topcross</i> no melhoramento de milho.....	32
3.2.2.2. Escolha de testadores.....	34
3.2.2.3. Histórico da população UENF-14: População-base do painel de linhagens avaliadas para o estudo de eficiência no uso do nitrogênio	36
3.2.3. MATERIAL E MÉTODOS	38
3.2.3.1. Germoplasma em estudo	38
3.2.3.2. Histórico das linhagens S ₇ oriundas de UENF-14.....	39
3.2.3.3. Escolha dos Testadores.....	39
3.2.3.4. Obtenção dos híbridos <i>topcrosses</i>	40
3.2.3.5. Avaliação dos híbridos <i>topcrosses</i> : caracterização da área e desenho experimental.....	41
3.2.3.6. Características avaliadas	44
3.2.3.7. Análise genético-estatística.....	44
3.2.4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
3.2.4.1. Análise de variância	47
3.2.4.2. Performance média dos <i>topcrosses</i>	50
3.2.4.3. Capacidades combinatórias	57
3.2.5. CONCLUSÃO	69
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70
APÊNDICES	88

RESUMO

SOUZA, Yure Pequeno de; D.Sc.; Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro; março de 2021. *Screening* de linhagens S₇ e híbridos de milho-pipoca para ambientação ao déficit de nitrogênio no solo. Orientador: Prof. Antônio Teixeira do Amaral Junior. Conselheiros: Prof. Alexandre Pio Viana e Prof. Messias Gonzaga Pereira.

Grandes quantidades de fertilizantes de nitrogênio (N) aplicados aos sistemas de cultivo de milho proporcionam altos rendimentos, mas causam impactos ambientais adversos. O desenvolvimento de cultivares com maior eficiência de uso de N é fundamental para a manutenção de uma produção sustentável. No capítulo 1 objetivou avaliar o potencial agrônomo de linhagens endogâmicas de milho-pipoca e selecionar as eficientes e responsivas no uso de nitrogênio e que expressem elevados volumes de expansão. Para isso, cinquenta e uma linhagens S₇ de milho-pipoca de diferentes origens foram avaliadas em campo sob condições de baixa e alta disponibilidade de N, arranjadas em delineamento de blocos casualizados com três repetições. As duas principais características de interesse econômico da cultura foram avaliadas: rendimento de grãos e capacidade de expansão. Existe variabilidade genética disponível no painel de linhagens de pipoca avaliadas, sendo possível classificar quinze linhagens como eficientes e responsivas no uso de nitrogênio, com destaque para as linhagens L205, L206 e L217 e L395 por apresentarem eficiência de uso de N e alto volume de expansão. Esses genótipos aparecem como potenciais genitores a serem inseridos em blocos

de cruzamentos para desenvolver híbridos e/ou populações de melhoramento com alta eficiência no uso do nitrogênio e capacidade de expansão. No capítulo 2, o objetivo do trabalho foi avaliar a performance de testadores contrastantes quanto a eficiência no uso do nitrogênio para identificar linhagens e híbridos de milho-pipoca superiores para condições ótimas e de deficiência de nitrogênio no solo. Para tanto, 15 linhagens S₇ oriundas da população UENF-14 foram cruzadas com seis testadores, sendo três eficientes e responsivos (L59, L70 e P7) e três ineficientes e não-responsivos (L54, L75 e L80) perfazendo 90 híbridos *topcrosses*. Esses híbridos juntamente com três testemunhas foram avaliados em ambientes contrastantes quanto a disponibilidade de nitrogênio, em delineamento de blocos ao acaso em arranjo de repetição dentro de “sets”, em dois locais: Campos dos Goytacazes, RJ e Itaocara, RJ. As características avaliadas foram rendimento de grãos e a capacidade de expansão. Realizou-se análise de variância conjunta e a análise dialélica foi efetuada de acordo com o método 4 de Griffing (1956), adaptado a dialelos parciais em múltiplos ambientes. Os testadores superiores quanto a eficiência no uso do nitrogênio (L70 e L59) proporcionou maiores médias nos híbridos em que foram genitores nas duas condições de disponibilidade de nitrogênio no solo. As linhagens L684 e L686 exibiram efeitos de alta capacidade geral de combinação para rendimento de grãos nas condições de disponibilidade de nitrogênio, sendo candidatas a serem incluídas em blocos de cruzamentos visando o desenvolvimento de híbridos e ou população de melhoramento eficientes no uso do nitrogênio. Os híbridos L684xL70 e L694xL70 apresentaram performance superior para rendimento de grãos e capacidade de expansão em ambas condições de disponibilidade de nitrogênio e, portanto, podendo ser opções de cultivo para produtores que dispõe ou não de alto nível tecnológico.

Palavras-chave: *Zea mays* L. var.; Everta; estresse abiótico; *topcross*

ABSTRACT

SOUZA, Yure Pequeno de; D.Sc.; Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro; March de 2021. Screening of S₇ inbred lines and popcorn hybrids to adapt to soil nitrogen deficiency. Advisor: Prof. Antônio Teixeira do Amaral Junior. Co-advisors: Prof. Alexandre Pio Viana e Prof. Messias Gonzaga Pereira.

Large amounts of nitrogen (N) fertilizers applied to maize cropping systems support high yields but cause adverse environmental impacts. The development of cultivars with higher N use efficiency is essential to maintain sustainable production. In chapter 1 aimed to select popcorn inbred lines that nitrogen use efficient and N-responsive that express high volumes of grain expansion. Fifty-one popcorn inbred lines of from different origins were evaluated in the field under conditions of low and high availability of N, arranged in a randomized block design with three replications. The two main traits of economic interest in the crop were evaluated: grain yield and popping expansion. It was observed that there is genetic variability available in the panel of lines popcorn evaluated, highlighting the genotypes L205, L206 and L217 and L395 for presenting nitrogen use efficiency and high-volume expansion. These genotypes appear as potential parents to be inserted in mating blocks in order to develop hybrids and/or breeding populations with high nitrogen use efficiency and expansion volume. In chapter 2, the objective was to evaluate the performance of contrasting testers in regarding of efficiency in the nitrogen use to identify superior popcorn inbred lines and hybrids for optimal conditions and nitrogen deficiency in the soil. Therefore, 15 inbred lines from the UENF-14 population were crossed with

six testers, three of which were efficient and responsive (L59, L70 and P7) and three inefficient and non-responsive (L54, L75 and L80) making 90 topcross hybrids. These hybrids, together with three checks, were evaluated in contrasting environments for nitrogen availability, in a randomized complete blocks design with replications plow within "sets", in two locations: Campos dos Goytacazes, RJ and Itaocara, RJ. The evaluated traits were grain yield and the popping expansion. Combine variance analysis was performed and the diallel analysis was performed according to Griffing's method 4 (1956), adapted to partial diallel in multiple environments. The superior testers regarding the efficiency in N-use of (L70 and L59) provided higher averages in the hybrids in which they were parents in both conditions of nitrogen availability in the soil. The inbred lines L684 and L686 exhibited effects of high general combining ability for grain yield under conditions of nitrogen availability, being eligible to be included in mating blocks aiming at the development of hybrids and/or efficient breeding populations in the nitrogen use. The L684xL70 and L694xL70 hybrids showed superior performance for grain yield and popping expansion in both conditions of nitrogen availability and therefore, they can be cultivation options for producers who have or do not have a high technological level.

Keywords: *Zea mays* L. var.; Everta; abiotic stress; *topcross*.

1. INTRODUÇÃO

O nitrogênio (N) é um nutriente essencial de maior exigência pelas plantas, especialmente o milho, sendo fundamental na síntese de proteínas, clorofila, ácidos nucléicos e biomoléculas, portanto, primordial para o estabelecimento e manutenção da produtividade dessa cultura (Hafiz et al., 2016; Silva et al., 2017). A aplicação de nitrogênio por meio de fertilizantes químicos constitui a principal fonte de entrada de N nos sistemas de produção das culturas em todo mundo.

De modo geral, com intuito de alcançar elevadas produtividades, os fertilizantes nitrogenados vêm sendo amplamente utilizados pelos agricultores, no entanto, a maior parte do N aplicado é perdido, tendo em vista que a recuperação desse elemento no sistema solo-planta raramente excede 50 % (Abbasi et al., 2013). Nos cereais, essa eficiência é ainda menor, com valores em torno de 30 - 40 % (Raun et al., 2002).

Essa baixa taxa de recuperação do nitrogênio pelas plantas está associada a diversos processos de perdas, como a lixiviação de nitrato, volatilização da amônia, desnitrificação, escoamento superficial e competição com a microbiota do solo (Kant et al., 2011). Além disso, a natureza dinâmica do nitrogênio, principalmente em solos tropicais e os processos de transformações que podem ocorrer no mesmo, contribuem para a redução da disponibilidade desse nutriente para as plantas (Mendes-Santos et al., 2017). Neste cenário, o uso indiscriminado dos fertilizantes nitrogenados pode ocasionar impactos negativos ao meio ambiente, como a eutrofização dos ecossistemas de água doce e marinhos (Li et

al., 2015; Haddad et al., 2015), além de problemas de cunho econômico, devido ao aumento dos custos de produção (Dass et al., 2015).

Diante desse cenário, novas concepções de pesquisas científicas na área agrícola vêm se tornando necessárias, de forma a garantir a segurança alimentar, sem agredir o meio ambiente. Neste contexto, torna-se imprescindível a otimização da eficiência no uso do nitrogênio pelas culturas, contribuindo para uma produção agrícola mais sustentável.

A eficiência no uso do nitrogênio (EUN) é definida como a relação entre a massa de grãos pela quantidade de N aplicado no solo (Moll et al., 1982). Isto posto, algumas estratégias podem ser adotadas com o intuito de aumentar a eficiência no uso desse nutriente, tais como rotação diversificada de cultura (Agneessens et al., 2014), utilização e fertilizantes de liberação lenta (Nelson et al., 2014) e utilização de bactérias fixadoras de nitrogênio (Martins et al., 2018; Vidotti et al., 2019; Zeffa et al., 2019). Outra importante estratégia, é a seleção e/ou o desenvolvimento de cultivares com maior eficiência no uso do nitrogênio (Carvalho et al., 2012, Santos et al., 2017).

Perante o exposto, a busca por cultivares mais eficientes no uso de N tem sido o objetivo de programas de melhoramento, principalmente, os de cereais, uma vez que 65 % da produção mundial de adubos nitrogenados são utilizados nessas culturas (Garnett et al., 2009). Para isso, é de extrema importância que as pesquisas concentrem esforços no desenvolvimento de genótipos eficientes e responsivos ao uso do nitrogênio, onde os mais eficientes produzirão mais grãos em relação a outros em condições de baixa disponibilidade desse nutriente, enquanto os genótipos mais responsivos aumentarão a produtividade concomitantemente com o aumento da disponibilidade relativa de N (Fageria e Kluthcouski, 1980; Moll et al., 1982).

Inobstante, a elucidação dos aspectos relacionados com as frequências de alelos favoráveis e complementariedade gênica promovem um maior entendimento da base genética da eficiência no uso do nitrogênio, vez que uma estratégia viável para aumentar a produtividade das culturas em condição de baixa disponibilidade de N é a identificação de fontes de alelos favoráveis e cruzamentos que proporcionem boa complementação gênica, para o desenvolvimento de cultivares eficientes no uso do nitrogênio, possibilitando maior segurança alimentar e sustentabilidade agrícola.

2. OBJETIVOS

- i. Discriminar linhagens endogâmicas (S_7) de milho-pipoca, identificando possíveis fontes de alelos favoráveis para eficiência e responsividade no uso do nitrogênio, com base na performance *per se* e em combinação;
- ii. Avaliar o desempenho de testadores com performances contrastantes quanto ao uso e responsividade do nitrogênio (eficientes / responsivos, não eficientes / não responsivos) para identificar linhagens com alta expressão para EUN em combinações híbridas; e
- iii. Selecionar híbridos de milho-pipoca eficientes e responsivos no uso nitrogênio e com elevada capacidade de expansão.

3. CAPÍTULOS

3.1. PROSPECÇÃO DE LINHAGENS DE MILHO-PIPOCA EFICIENTES E RESPONSIVAS NO USO DO NITROGÊNIO

3.1.1. INTRODUÇÃO

O nitrogênio (N) é o nutriente requerido em maiores quantidades pelas plantas, sendo fundamental para o crescimento e desenvolvimento. No milho, esse mineral representa grande importância para o incremento do rendimento de grãos (Hirel et al., 2007; Morosini et al., 2017; Taiz et al., 2017). Dessa forma, a deficiência de N constitui, depois da seca, o principal estresse abiótico que limita a máxima expressão produtiva dessa cultura.

O milho-pipoca (*Zea mays* L. var. *everta*) é um tipo especial de milho, que possui grande aceitação popular, proporcionando ganhos econômicos tanto no setor de produção de grãos quanto na comercialização da pipoca (Silva et al., 2019). Nos últimos anos, essa cultura vem apresentando uma significativa demanda comercial na indústria alimentícia e sua produção tem atingindo rendimentos superiores a um milhão de toneladas (USDA, 2019).

Para atender essa demanda, o cultivo do milho-pipoca aumentou nas regiões tropicais, onde os solos geralmente apresentam disponibilidade de

nitrogênio abaixo da requerida para que as espécies cultivadas atinjam produtividades satisfatórias. Dessa forma, visando a aumentar a produção agrícola, os agricultores tornam-se cada vez mais dependentes dos fertilizantes nitrogenados. Em 2019, cerca de 107,4 milhões de toneladas de fertilizantes nitrogenados foram utilizados em todo mundo. Para 2022 estima-se que 111,6 milhões de toneladas sejam utilizadas (FAO, 2019).

Apesar da grande quantidade de fertilizantes de N aplicados, a eficiência de recuperação do nitrogênio das plantas é baixa; cerca de 30 a 40 %, o que significa que grande parte do N aplicado não é usado (Raun e Johnson, 1999; Ciampitti e Vyn, 2012). Assim, mais de 60 % do N é perdido por lixiviação, volatilização, escoamento superficial e competição com a microbiota do solo, resultando em impactos negativos ao ambiente, bem como, aumento dos custos de produção da cultura (Dass et al., 2015; Sharma e Bali, 2017).

Neste cenário, reduzir a dependência por insumos nitrogenados, mantendo altos níveis de rendimentos, é essencial para garantir uma produção agrícola sustentável para o futuro. Esse desafio pode ser superado por meio do desenvolvimento de cultivares eficientes no uso do N, as quais podem ser obtidas por meio do cruzamento entre linhagens adaptadas a ambientes com baixa disponibilidade N e que sejam responsivas à fertilização nitrogenada, pois, a transferência de alelos favoráveis aos descendentes depende da presença desses, nas linhagens genitoras (Hallauer et al., 2010).

A seleção de genitores dentro de um programa de melhoramento visando ao desenvolvimento de híbridos eficientes no uso N, é habitualmente realizada avaliando-se a capacidade combinatória das linhagens, via dialelos ou *topcrosses*. Entretanto, antes dessa etapa, a seleção de linhagens pelo desempenho *per se* quanto a performance produtiva em ambientes com e sem restrição de nitrogênio, pode ser uma estratégia eficaz para aumentar as chances de obter híbridos superiores no uso desse nutriente.

A viabilidade dessa seleção prévia foi comprovada por Santos et al. (2020), que avaliando, em ambientes de alta e baixa disponibilidade de N, um conjunto 90 híbridos dialélicos de milho-pipoca, oriundos do cruzamento de genitores contrastantes quanto ao uso do N e selecionados pelo desempenho *per se*, concluíram que os híbridos classificados como eficientes e responsivos ao uso N,

eram provenientes do cruzamento em que, pelo menos um dos genitores era eficiente e responsivo ao uso N, ou intermediário.

Apesar disso, em milho-pipoca ainda existem poucos estudos que abordam essa temática, principalmente em condições de campo, onde melhor se pode representar o ambiente de cultivo, sobretudo considerando o local de adaptação ao qual se almeja desenvolver um programa de melhoramento. Em um dos poucos trabalhos desenvolvidos com milho-pipoca nas condições mencionadas acima, Santos et al. (2017a) avaliaram um conjunto de 29 linhagens incluídas em apenas oito genealogias distintas e verificaram que 13 linhagens (P7, P2, P6, P3, P5, P4, P9, P10, P8, P9, L70, L74 e L55) foram classificadas como sendo eficientes e responsivas no uso do nitrogênio.

Dessa forma, a caracterização sistemática de germoplasma adaptados a ambientes com limitada disponibilidade de N, continua sendo uma etapa fundamental de um programa de melhoramento, visando a identificação de fontes de alelos favoráveis para EUN. Assim, o presente estudo buscou avaliar um conjunto diversificado de linhagens endogâmicas de milho-pipoca quanto à resposta a níveis contrastantes de N sob condições de campo, com base nas duas principais características econômicas da cultura – rendimento de grãos e capacidade de expansão – objetivando selecionar linhagens eficientes e responsivas no uso do nitrogênio e que expressem elevados valores de volumes de expansão, para que estas possam ser inseridas em programas de cruzamento para geração híbridos e/ou populações de melhoramento, que agreguem superioridade quanto à eficiência no uso do N com elevada expressão da capacidade de expansão.

3.1.2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1.2.1. Aspectos morfológicos e econômicos do milho-pipoca

O milho-pipoca (*Zea mays* L. var. *Everta*) é um tipo especial de milho, que assim como os demais, pertence à família *Poaceae*, sub-família *Panicoideae* e tribo *Maydeae* (Goodman e Smith, 1987). Esse cereal que tem como centro de origem o continente Americano (Goodman, 1980; Buckler e Stevens, 2005), possui plantas

anuais, monóicas, alógamas e diplóides com $2n = 2x = 20$ cromossomos (Gaut et al., 2000).

A origem genética do milho-pipoca ainda não está muito bem esclarecida. A esse respeito, existem duas hipóteses que são mais citadas. A primeira, supõe que o milho-pipoca pode ter se originado do milho comum tipo *flint*, uma vez que este, também, possui capacidade de estourar, mesmo que baixa (Erwin, 1949). A outra teoria, presume que o ancestral do milho-pipoca é o teosinto, sendo posteriormente, modificado pelo homem ao longo dos anos, através de seleção massal (Goodman e Smith, 1987).

As hipóteses relatadas sobre a origem do milho-pipoca necessitam de maiores informações e explicações para serem conclusivas, porém apesar dessas incertezas, é certo que o milho-pipoca teve um papel importante no desenvolvimento pré-histórico do milho, sendo sua participação essencial para seu desenvolvimento e formação do patrimônio genético atual da espécie *Zea mays* L. (Zinsly e Machado, 1987).

Em comparação ao milho comum, o milho-pipoca possui algumas características peculiares. Dentre essas, destacam-se: menor porte, colmos cilíndricos, compactos e mais finos, precocidade na maturação e na secagem dos grãos, perfilhamento com maior frequência, maior suscetibilidade a doenças e pragas, maior prolificidade, menor número de folhas e tamanho reduzido do grão. As plantas de milho-pipoca também possuem um sistema radicular menos desenvolvido, o que as torna mais suscetíveis ao acamamento e ao estresse hídrico (Zinsly e Machado, 1987; Sawazaki, 2001).

A principal característica que diferencia o milho-pipoca dos outros tipos de milho é a sua capacidade de expandir o endosperma originando a pipoca. Esse processo ocorre devido à presença de óleo e umidade no interior do grão, que quando submetidos a temperatura de aproximadamente 180 °C, exercem pressão sobre o pericarpo até que este se rompa, expondo o endosperma, outrora gelatinoso, que em contato com o ar dá origem a uma estrutura branca e macia (Zinsly e Machado, 1987; Sweley et al., 2013). Essa característica é um dos fatores de maior importância na cultura do milho-pipoca, quando se refere à qualidade, sendo o valor mínimo de 30 mL.g⁻¹ para lançamento de cultivar (Matta e Viana, 2001; Sawazaki, 2001).

A importância econômica do milho-pipoca está vinculada a grande aceitação popular da pipoca, que é amplamente consumida como petisco em lanches rápidos (Rangel et al., 2011; Freitas et al., 2013). Nos últimos anos, essa cultura vem apresentando significativa demanda comercial pela indústria alimentícia, proporcionando no Brasil, um aumento de 223 % da área plantada nos últimos quatro anos (Kist, 2019).

O Brasil é o segundo maior produtor e consumidor de milho-pipoca do mundo, situando-se atrás apenas dos EUA, sendo o estado de Mato Grosso o responsável por cerca de 80 % da produção desse cereal, o qual no ano de 2019, produziu aproximadamente 289,6 mil toneladas de grãos. O cultivo de milho-pipoca no Brasil ocorre predominantemente por meio de um sistema integrado entre a indústria, a qual fornece sementes de elevada qualidade e orientação técnica aos produtores. O sucesso dessa integração pode ser constatado no município de Campo Novo do Parecis – MT, que é destaque como o maior produtor brasileiro de milho-pipoca (Kist, 2019).

Apesar da crescente demanda e expressão econômica da cultura no Brasil, essa produção ainda é considerada limitada, tendo em vista o grande potencial de mercado que esta cultura apresenta. Além disso, comparativamente ao milho comum, ainda há uma baixa disponibilidade de cultivares adaptadas às condições edafoclimáticas tropicais e que reúnam características agronômicas e de qualidade de pipoca favoráveis (Gonçalves et al., 2014; Santos et al., 2017b; Bombonato et al., 2020), o que constitui um grande empecilho para a expansão do cultivo do milho-pipoca no Brasil. Assim, torna-se cada vez mais relevante o desenvolvimento de pesquisas com o melhoramento para o desenvolvimento de cultivares de milho-pipoca adaptadas às condições edafoclimáticas brasileiras.

De forma geral, a cultura do milho é considerada uma das mais dependentes e exigentes em fertilizantes, principalmente os nitrogenados. Desta forma, o N é o nutriente que mais onera a produção agrícola, tendo em vista que em grande parte dos solos agricultáveis este elemento não está disponível em quantidades necessárias para altas produtividades, exigindo aplicações suplementares. Por outro lado, se o empecilho econômico para a aplicação de fertilizantes nitrogenados for superado, podem-se ter problemas de cunho ambiental e na saúde, pois a produção desses compostos é altamente poluente. Assim sendo, o emprego do nitrogênio na agricultura vem cada vez mais adquirindo

importância estratégica para a Ciências Agrárias, no intento de buscar alternativas sustentáveis ao seu uso.

3.1.2.2. Uso e importância do nitrogênio para milho

O nitrogênio (N) é um importante nutriente mineral, sendo o que mais limita o crescimento e o desenvolvimento das culturas em todo mundo (Khan et al., 2017). Nesse aspecto, o milho é considerado uma das culturas mais dependentes e exigentes nesse nutriente (Hafiz et al., 2016).

O N assume grande importância, devido à atuação decisiva no metabolismo, por ser constituinte da clorofila, de aminoácidos, dos ácidos nucleicos e das proteínas. Por conseguinte, o N também está relacionado com processos fisiológicos, tais como, fotossíntese, respiração, desenvolvimento e atividade das raízes, absorção iônica de outros nutrientes, crescimento e diferenciação celular. Dessa forma, esse nutriente representa grande importância no incremento do rendimento de grãos, principalmente no milho (Hirel et al., 2007; Taiz et al., 2017).

A deficiência desse nutriente afeta diretamente na produção de massa seca e na produção de grãos (Lemaire e Gastal, 1997). De acordo com Bänziger et al. (2000), dependendo do tempo de duração do estresse de N e do estágio de desenvolvimento da planta, diferentes fatores determinantes da produção serão afetados. Por exemplo, o estresse de nitrogênio antes do florescimento retarda a divisão celular nos pontos de crescimentos, o que resulta em redução da área foliar, da taxa fotossintética, do número de grãos potenciais e do tamanho da planta. Além disso, a carência desse nutriente durante o enchimento dos grãos acelera a senescência das folhas reduzindo a fotossíntese e o peso de grãos (Bänziger et al. 2000; Badu-Apraku e Fakorede, 2017).

O sinal mais evidente da deficiência de nitrogênio na maioria das espécies é a clorose (amarelecimento das folhas), sobretudo nas folhas mais velhas, pois é possível que nas folhas mais novas o N seja mobilizado a partir das folhas mais velhas. Quando a deficiência de N se desenvolve lentamente, é possível que as plantas apresentem caules pronunciadamente delgados e comumente lenhosos, em virtude do acúmulo em excesso de carboidratos, que não podem ser empregados na síntese de aminoácidos ou outros compostos nitrogenados (Taiz et al., 2017).

As exigências de N pelo milho variam consideravelmente com os diferentes estádios de desenvolvimento da planta, sendo mínimas nos estádios iniciais, aumentando com a elevação da taxa de crescimento e alcançando um pico durante o florescimento até o início de formação dos grãos (Okumura et al., 2011). Sendo assim, é indicada a aplicação de um terço do N no plantio, visto que na fase inicial, as plantas precisam de poucas quantidades deste nutriente e a aplicação do restante em cobertura (Fornasier Filho, 2007).

Como o N determina, principalmente a produtividade da cultura, os produtores em todo o mundo aplicaram N em excesso, levando a uma baixa eficiência de uso de nitrogênio (EUN). A EUN mundial do cereal foi estimada e relatada por Raun e Johnson (1999) em 33 %. Isso implica que 67 % de todo o N aplicado não é contabilizado e pode ser perdido no sistema de solo por lixiviação e, ou formas gasosas, contribuindo potencialmente para a diminuição da qualidade do ar e da água.

Entretanto, a eficiência da recuperação do nitrogênio aplicado pode variar muito, pois essa recuperação depende de inúmeros fatores, como umidade, temperatura e tipo de solo, por exemplo. Em alguns casos, podem-se ter valores inferiores a 50 % de recuperação, sendo que para os cereais essas estimativas são ainda menores, geralmente entre 30-40 %, ou seja, a maior parte do N aplicado não é aproveitada (Raun et al., 2002). Essa baixa taxa de recuperação do nitrogênio pelas plantas está associada a diversos processos de perdas, como a lixiviação de nitrato, volatilização da amônia, desnitrificação, escoamento superficial e competição com a microbiota do solo (Kant et al., 2011).

Embora houvesse grandes avanços na forma de aplicação e o aumento no uso de fertilizantes nitrogenados, o nitrogênio continuará sendo um dos fatores limitantes para a produção de milho, pois exige uma grande participação dos custos de aplicações no valor total da produção e esse valor vem aumentando, podendo, assim, limitar o seu uso no futuro. Estima-se que os fertilizantes de N, respondem por 15 a 20 % dos custos de produção em milho (Plastina, 2015). Nesse aspecto, o nitrogênio tem sido intensamente estudado, no sentido de maximizar a eficiência no seu uso, bem como melhorar a absorção e a metabolização no interior das plantas. Diante disso, a seleção de genótipos com maior eficiência na utilização do nitrogênio é considerada uma das maneiras mais adequadas para diminuir tanto os custos de produção das culturas como os impactos ao meio ambiente.

Com esse enfoque, vários autores vêm realizando a seleção de cultivares de milho comum adaptadas a ambientes deficientes em nitrogênio e, ou a identificação de genótipos responsivos à aplicação deste nutriente (Wu et al., 2011; DoVale et al., 2012; DoVale et al., 2013; Oliveira et al., 2013; Guedes et al., 2015; Heinz et al., 2019; Annor et al., 2020; Ertiro et al., 2020).

Em milho-pipoca, Mundim et al. (2013) estimaram diversidade entre 25 linhagens de milho-pipoca para caracteres de raiz e eficiência na absorção de N, tendo encontrado grupos de linhagens divergentes que podem ser usadas para a geração de híbridos de milho-pipoca e populações segregantes para estudos de herança. Em outra pesquisa com a cultura, Santos et al. (2017a) avaliaram um grupo de linhagens endogâmicas (S_7) de milho-pipoca sob dois níveis contrastante de N, selecionando indivíduos eficientes no uso de nitrogênio e que exibem bons volumes de expansão.

Mais recentemente, Santos et al. (2020) avaliaram um conjunto de híbridos de milho-pipoca sob condições contrastantes de N e constataram que predominantemente, os híbridos superiores quanto à eficiência do uso do nitrogênio foram oriundos de pais contrastantes quanto à eficiência e responsividade do nitrogênio. Destacando 14 híbridos que apresentaram alta produtividade e potencial para serem utilizados comercialmente como híbridos eficientes no aproveitamento do nitrogênio.

3.1.2.3. Melhoramento para Eficiência no Uso do Nitrogênio

O desenvolvimento de cultivares eficientes no uso de nitrogênio (EUN) constitui-se em estratégia importante para a diminuição do uso de fertilizantes, visto que é possível a produção de modo econômico com a utilização de menores quantidades desse nutriente. No entanto, existe dificuldade de encontrar no mercado cultivares que apresentem essa característica, em decorrência do germoplasma ter sido selecionado em condições otimizadas, como acontece nas empresas multinacionais de melhoramento de plantas. Neste sistema, a presença de qualquer variabilidade genética para eficiência no uso do N não será identificada, podendo, de fato, estar-se selecionando para uma reduzida EUN.

Diante disso, os genótipos selecionados em condições ideais de cultivos, geralmente não se mostram adequados para serem utilizados em condições de estresse (Souza et al., 2009). Isso pode ser explicado, porque parte dos alelos que

controlam a expressão de determinado caráter, em baixa suplementação nutricional, são diferentes dos alelos que controlam esse mesmo caráter em condição ideal de suplementação (Souza et al., 2008; Fritsche-Neto et al., 2010).

Muruli e Paulsem (1981) confirmaram esta pressuposição, onde os autores selecionaram genótipos de milho em solos com alta e baixa dose de N e comprovaram a superioridade da seleção específica, uma vez que o material selecionado em baixa dose de N apresentou superioridade produtiva no cultivo em solo pobre, enquanto ocorreu o contrário no cultivo em solo bem adubado, ou seja, o material selecionado na dose alta de N foi superior. Assim, o desenvolvimento de cultivares eficientes ao uso do nitrogênio requer seleção em ambientes específicos para permitir a expressão dos alelos favoráveis que conferem vantagens adaptativas às condições de estresse, possibilitando a seleção de genótipos superiores. Portanto, a seleção de genótipos para EUN deve ser conduzida em ambientes com limitações de disponibilidade desse nutriente.

Entretanto, vale destacar que para a obtenção de sucesso na seleção, o estresse aplicado às plantas deve ter duração prolongada, o suficiente para que o estresse coincida com os estádios críticos de crescimento da planta (V6-V7 – formação do número de fileiras por espigas; V15-VT – formação do número de grãos por fileira). Além disso, sua intensidade deve ser severa o bastante para afetar os caracteres correlacionados com a produtividade, porém brando o suficiente para permitir a verificação de diferenças entre os materiais. Por fim, o manejo do estresse deve ser uniforme no tempo e no espaço, reduzindo o erro experimental e facilitando a estimação de fidedigna variância genética (Fritsche-Neto e Borém, 2011).

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

Nesse contexto, os mesmos autores definiram a EUN como a relação entre a massa de grãos pela quantidade de nitrogênio aplicada no solo. Foi definido também dois componentes primários relacionados diretamente com a eficiência. A eficiência de absorção de nitrogênio (EAbN), que é definida como a habilidade de absorção desse nutriente e a eficiência de utilização de nitrogênio (EUtN), que se refere à capacidade dos genótipos em produzir grãos usando o recurso que foi absorvido. Esse índice é dado pela razão entre a massa de grãos e a quantidade de nitrogênio total na planta no estágio da maturidade (Fritsche-Neto e Borém, 2011).

Cultivares de milho mais eficientes no uso de N podem ser obtidas com o uso do melhoramento genético para seleção quanto à eficiência na absorção e, ou na utilização de N (Gallais e Hirel, 2004; Hirel et al., 2007; Souza et al., 2008; Santos et al., 2019; Khan et al., 2020). Nesse aspecto, Moll et al. (1982) avaliaram híbridos de milho temperado sob níveis contrastantes de N e verificaram que a EUtN foi mais importante para EUN do que EAbN, sob baixa disponibilidade de N. Por outro lado, em condição AN destacou-se a EAbN, sendo responsável por 83% da variação na eficiência no uso do nitrogênio. DoVale et al. (2012) avaliaram linhagens e híbridos de milho comum em estágio de V6 e concluíram que, independente da disponibilidade de N, a eficiência na absorção de N foi mais importante do que a eficiência na utilização. Rodrigues et al. (2017) avaliando um painel de 64 linhagens de milho tropical, verificaram que a contribuição relativa da eficiência na utilização para a variação da eficiência no uso do N foi de 3,2 e 4,2 vezes maior do que a contribuição da EAbN nas condições de alta e baixa disponibilidade de nitrogênio. Em trabalho recente, Mueller et al. (2019) investigando qual o mecanismo proporcional ganho na EUN e rendimento de grãos em híbridos cultivados nos últimos 70 anos nos EUA, verificaram que os híbridos mais modernos produziam mais grãos por unidade de N acumulado em virtude de uma maior eficiência de remobilização do N estocado no colmo e folhas das plantas.

Em relação a milho-pipoca, Almeida et al. (2018a) avaliando 19 linhagens de em estágio vegetativo (V6) e adulto em casa de vegetação e campo, respectivamente, observaram que no estágio adulto a eficiência na absorção do N após a liberação dos estilos-estigmas apresentou alta correlação e efeitos direto sob a EUN em condição de alta e baixa disponibilidade de N. Já em estágio

vegetativo, verificaram que EAbN foi mais importante na explicação da variação da EUN em baixo N, enquanto sob condição AN a EUtN exibiu forte correlação e efeito direto sob a eficiência no uso do nitrogênio. Recentemente, Khan et al. (2020) reportaram resultados semelhantes aos dos autores supracitados, observando alta correlação da eficiência da absorção com a EUN.

Outra abordagem muito importante, diz respeito ao controle genético de caracteres associados à EUN em milho comum. O objetivo principal desse tipo de pesquisa é conhecer qual estratégia mais adequada e quais os principais caracteres a serem considerados em um programa de melhoramento de plantas para eficiência no uso do nitrogênio (Fritsche-Neto e Borém, 2011). O controle genético da EUN é altamente complexo e poligênico, sendo bastante influenciado pelos níveis de N do solo e o germoplasma estudado (Loqué e Von Wirén, 2004; Chun et al., 2005).

Souza et al. (2008) observaram que em condições de baixa disponibilidade de N, houve maior importância dos efeitos aditivos para EUN em milho comum. Corroborando com esse resultado, DoVale et al. (2012) verificaram que efeitos genéticos aditivos têm maior importância para os caracteres associados à eficiência no uso de N, de modo que a seleção pode ser realizada pelo desempenho individual de linhagens. Entretanto, De Lima (2010) observou efeito contrário, ou seja, os efeitos não aditivos foram os mais importantes para a expressão da eficiência do uso do nitrogênio em milho comum. E, nesse caso, a seleção dos genótipos superiores deve ser realizada considerando o desempenho dos híbridos obtidos.

Em trabalho pioneiro com milho-pipoca em condições de campo, Santos et al. (2019), ao avaliarem um dialelo completo 10 x 10, composto por três genitores eficientes e responsivos, três ineficientes e não-responsivos e quatro intermediários, constataram que os efeitos gênicos aditivos foram mais importantes na expressão do rendimento de grãos (RG) em condições de alta e baixa disponibilidade de N. Entretanto, os autores ressaltam que os efeitos não-aditivos não devem ser ignorados para essa característica. Dessa forma, os autores recomendam a utilização da seleção recorrente recíproca como um método de melhoramento para obtenção de maiores ganhos genéticos, tendo em vista que explora tanto a variância aditiva como de dominância.

3.1.3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1.3.1. Material genético e condições experimentais

Foram avaliadas 51 linhagens S₇ de milho-pipoca de diferentes origens, pertencentes ao Banco de Germoplasma da UENF, como descrito na Tabela 1. O experimento foi conduzido durante a safra do ano agrícola 2018/19 em dois ambientes contrastantes quanto a disponibilidade de nitrogênio (alto e baixo N) na Estação Experimental do Colégio Estadual Agrícola Antônio Sarlo, em Campos dos Goytacazes, RJ (Latitude 21° 42' 48" S, Longitude 41° 20' 38" O, 14 m de altitude). O clima desse município é caracterizado como tropical úmido (Aw), apresentando verões quentes e invernos amenos, segundo classificação de Köppen (1948).

Durante o período experimental, foram observadas temperaturas médias de 26,9 °C e precipitação de 291 mm (Figura 1). Antes da implementação dos experimentos, foram realizadas as análises químicas do solo, para a caracterização do solo de cultivo (Tabela 2).

Tabela 1. Linhagens S₇ de milho-pipoca avaliadas, com suas respectivas genealogias e adaptação climática.

Linhagem	Genealogia	País de Origem	Adaptação
L201	IAC 125	Brasil	Temperado/Tropical
L204	IAC 125	Brasil	Temperado/Tropical
L205	IAC 125	Brasil	Temperado/Tropical
L206	IAC 125	Brasil	Temperado/Tropical
L207	IAC 125	Brasil	Temperado/Tropical
L212	IAC 125	Brasil	Temperado/Tropical
L214	IAC 125	Brasil	Temperado/Tropical
L215	IAC 125	Brasil	Temperado/Tropical
L216	IAC 125	Brasil	Temperado/Tropical
L217	IAC 125	Brasil	Temperado/Tropical
L291	URUG 298	Uruguai	Temperado/Tropical
L292	URUG 298	Uruguai	Temperado/Tropical
L293	URUG 298	Uruguai	Temperado/Tropical
L294	URUG 298	Uruguai	Temperado/Tropical
L295	URUG 298	Uruguai	Temperado/Tropical
L296	URUG 298	Uruguai	Temperado/Tropical
L298	URUG 298	Uruguai	Temperado/Tropical
L261	PARA 172	Paraguai	Temperado/Tropical

Tabela 1 – Cont.

Linagem	Genealogia	País de Origem	Adaptação
L262	PARA 172	Paraguai	Temperado/Tropical
L263	PARA 172	Paraguai	Temperado/Tropical
L270	PARA 172	Paraguai	Temperado/Tropical
L272	PARA 172	Paraguai	Temperado/Tropical
L413	PA 170 Roxo	Paraguai	Temperado/Tropical
L509	PA 170 Roxo	Paraguai	Temperado/Tropical
L510	PA 170 Roxo	Paraguai	Temperado/Tropical
L511	PA 170 Roxo	Paraguai	Temperado/Tropical
L351	PR 023	Brasil	Tropical
L353	PR 023	Brasil	Tropical
L360	PR 023	Brasil	Tropical
L366	PR 023	Brasil	Tropical
L471	SE 013	Brasil	Tropical
L472	SE 013	Brasil	Tropical
L476	SE 013	Brasil	Tropical
L477	SE 013	Brasil	Tropical
L326	Barão de Viçosa	Brasil	Tropical
L328	Barão de Viçosa	Brasil	Tropical
L332	Barão de Viçosa	Brasil	Tropical
L592	RS 20	Brasil	Tropical
L593	RS 20	Brasil	Tropical
L594	RS 20	Brasil	Tropical
L381	SAM	Estados Unidos	Temperado/Tropical
L390	SAM	Estados Unidos	Temperado/Tropical
L395	SAM	Estados Unidos	Temperado/Tropical
L652	ARZM 13 050	Argentina	Temperado/Tropical
L655	ARZM 13 050	Argentina	Temperado/Tropical
L562	ARZM 05 083	Argentina	Temperado/Tropical
L623	PA 091	Brasil	Tropical
L624	PA 091	Brasil	Tropical
L236	BOZM 260	Bolívia	Temperado/Tropical
P2	Composto CMS-42	Brasil	Temperado/Tropical
L80	Viçosa:UFV	Brasil	Temperado/Tropical

Tabela 2. Atributos químicos do solo da área experimental do Colégio Estadual Agrícola Antonio Sarlo, em Campos dos Goytacazes, RJ, nas profundidades de 0-10 e 10-20 cm.

Camadas	pH	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	Na	C	MO
	H ₂ O	mg/dm ⁻³		mmol _c /dm ⁻³				g dm ⁻³	
0 - 10 cm	5,9	27,00	3,30	15,80	8,0	0,0	28,5	1,1	12,4	21,
10 - 20 cm	5,8	28,00	2,40	17,60	8,6	0,0	38,1	0,8	13,4	23,

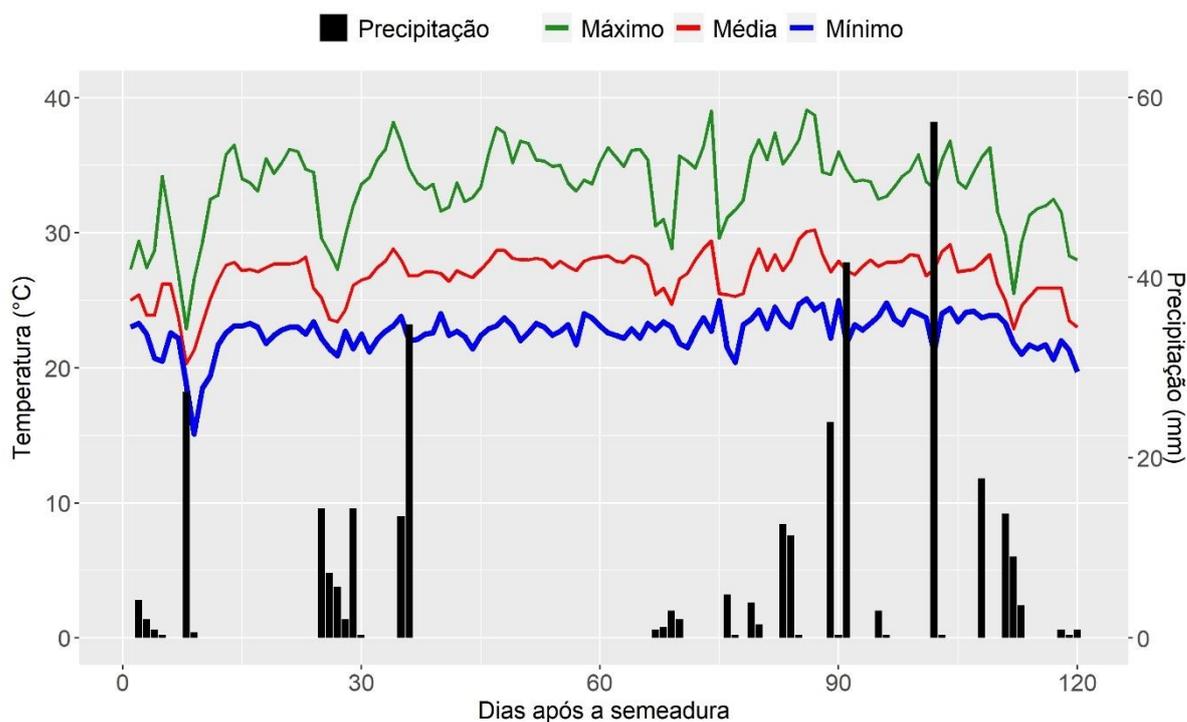


Figura 1. Precipitação (mm), temperatura máxima, média e mínima (°C) observadas durante o período experimental no ano agrícola 2018-2019 em Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro, Brasil. Fonte: Estação de Campos dos Goytacazes (OMM: 83698) e processada pelo banco de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

3.1.3.2. Caracterização dos ambientes em relação à disponibilidade de nitrogênio

A estratégia adotada para diferenciar os ambientes quanto ao nível de disponibilidade de nitrogênio foi a seguinte: a adubação de semeadura foi realizada de acordo com a análise de solo e de maneira semelhante para os dois ambientes, adicionando 32 kg ha⁻¹ de nitrogênio. No ambiente com alta disponibilidade de N (AN), a adubação de cobertura foi dividida em duas vezes nos estádios de quatro (V4) e seis (V6) folhas completamente desenvolvidas, sendo aplicados 118 kg ha⁻¹ de N. No ambiente com baixa disponibilidade de N (BN) a adubação de cobertura constituiu-se de 28,5 kg ha⁻¹, equivalendo a 25 % do quantitativo aplicado no ambiente AN. Para os dois ambientes, utilizou-se a uréia como fonte de nitrogênio.

3.1.3.3. Características avaliadas

Para avaliar a performance de linhagens endogâmicas, as duas principais

características de interesse econômico da cultura foram mensuradas: rendimento de grãos (RG), obtido por meio da produção de grãos da parcela, corrigido para 13 % de umidade e extrapolado para kg ha⁻¹; e capacidade de expansão (CE), que foi aferida para a massa de 30 g de grãos, irradiada em micro-ondas, em saco de papel especial para pipocamento, na potência de 1.000 W, por tempo determinado de um minuto e quarenta e cinco segundos. O volume de pipoca foi quantificado em proveta (mL) (Matta e Viana, 2001). A CE foi determinada pelo quociente do volume obtido de pipoca e a massa do grão, expressa em mL g⁻¹.

3.1.3.4. Classificação das linhagens quanto à eficiência e responsividade ao nitrogênio

A classificação das linhagens quanto à eficiência e responsividade ao uso do N foi realizada com base nos desvios das médias de produtividade de grãos de cada linhagem em relação à média geral de cada ambiente. Esses valores foram plotados em um gráfico de dispersão, em que no eixo das abscissas (X) foram representados os desvios sob alto nível de nitrogênio (responsividade no uso do N) e o eixo das ordenadas (Y) representou os desvios sob baixa disponibilidade de nitrogênio (eficiência no uso do N). Dessa forma, as linhagens foram classificadas em quatro categorias: eficientes e não responsivas (ENR), eficientes e responsivas (ER), ineficientes e não responsivas (INR) e ineficientes e responsivas (IR).

3.1.3.5. Análises estatísticas

Inicialmente foram realizadas as análises de variância individuais para os ambientes AN e BN, posteriormente, procedeu-se a análise de variância conjunta com o intuito de determinar possíveis interações entre genótipos com os níveis de nitrogênio.

A análise de variância conjunta foi realizada de acordo com o seguinte modelo estatístico: $Y_{ijk} = \mu + B/A_{jk} + A_j + G_i + GA_{ij} + \varepsilon_{ijk}$, em que Y_{ijk} é a observação o i-ésimo genótipo no j-ésimo ambiente no k-ésimo bloco; μ é a constante geral; B/A_{jk} é o efeito do k-ésimo bloco dentro do j-ésimo ambiente; A_j é o efeito fixo do j-ésimo ambiente (nível de N); G_i é o efeito fixo do i-ésimo genótipo; GA_{ij} é o efeito fixo da interação ente o i-ésimo genótipo e o com o j-ésimo ambiente;

e ε_{ijk} é o efeito do erro aleatório experimental associado à observação Y_{ijk} , com NID $(0, \sigma^2)$.

Os parâmetros genéticos foram estimados usando os quadrados médios da análise de variância individual. O coeficiente de determinação genotípica (\hat{H}^2) foi estimado usando a seguinte expressão: $\hat{H}^2 = (QMg - QMr)/QMg$, em que QMg : corresponde ao quadrado médio do genótipo; QMr : corresponde ao quadrado médio do erro; coeficiente de variação genotípico (CV_g), obtido por $CV_g = 100 \times \frac{\sqrt{(QMg - QMr)/r}}{\mu}$, onde r e μ correspondem a repetição e média geral, respectivamente; coeficiente de variação experimental (CV_e), obtido por $CV_e = 100 \times \frac{\sqrt{QMr}}{\mu}$; e o índice de variação (\hat{I}_v), estimada por $\hat{I}_v = CV_g/CV_e$.

Para capacidade de expansão (CE), as médias foram agrupadas pelo algoritmo de Scott-Knott (1974) a 5 % de probabilidade. Todas as análises estatísticas foram realizadas com o auxílio dos programas computacionais R (R core Team, 2017) e GENES (Cruz et al., 2013).

3.1.4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1.4.1. Análise de variância e parâmetros genéticos

Houve diferença significativa ($p < 0,01$) entre os genótipos (G) para ambas características avaliadas, revelando a existência de variabilidade genética, condicionante imprescindível para a obtenção de ganhos genéticos com a seleção (Tabela 3). Variabilidade genética para características de importância agrônômica também foram reportadas entre linhagens endogâmicas de milho-pipoca sob níveis contrastantes de nitrogênio em outros trabalhos (Santos et al., 2017; Almeida et al., 2018).

Para a fonte de variação nível de nitrogênio (N) observaram-se efeitos significativos ($p < 0,01$) para rendimento de grãos (RG), evidenciando que as dosagens de N aplicadas foram satisfatórias para proporcionar diferenciação entre os ambientes e, conseqüentemente, discriminar corretamente as linhagens eficientes das ineficientes no uso do nitrogênio.

Tabela 3. Resumo da análise de variância conjunta para rendimento de grãos (RG) e capacidade de expansão (CE) avaliadas em 51 linhagens S₇ de milho-pipoca sob ambientes contrastantes quanto à disponibilidade de nitrogênio no solo.

FV	GL	Estimativas de quadrados médios	
		RG (kg.ha ⁻¹)	CE (mL.g ⁻¹)
Bloco/N	4	46.905,78	1,47
Nitrogênio (N)	1	1.670.663,24**	10,83 ^{ns}
Genótipo(G)	50	1.522.316,24**	191,58**
G x N	50	142.666,58**	0,45 ^{ns}
Resíduo	200	15.299,11	2,10
Média		748,80	22,92
CV (%)		16,52	6,32
Estimativas de Parâmetros Genéticos – Alto N			
\hat{H}^2		0,98	0,98
CVe (%)		14,03	5,70
CVg (%)		70,83	24,14
IV		5,05	4,24
Média		822,69	23,11
Estimativas de Parâmetros Genéticos – Baixo N			
\hat{H}^2		0,96	0,97
CVe (%)		19,47	6,91
CVg (%)		67,13	24,68
IV		3,45	3,57
Média		674,91	22,73

^{ns}: não-significativo; *, **: significativo no nível de 1 % de probabilidade, pelo teste F.

A capacidade de expansão (CE), não foi influenciada pelos níveis de N e tampouco pela interação G x N (Tabela 3), indicando que a seleção das linhagens superiores pode ser realizada considerando a performance média em ambos os ambientes. De forma semelhante, Pricinotto et al. (2014) investigando os efeitos nitrogênio sob as principais características de interesse econômicos no milho-pipoca, observaram que a CE não foi influenciada pelas diferentes doses de N aplicadas. Santos et al. (2017), por sua vez, avaliando um conjunto de 29 linhagens

endogâmicas de milho-pipoca em ambientes contrastantes quanto a disponibilidade de nitrogênio no solo, também constataram que as condições distintas de N não promoveram mudanças significativas nas médias da capacidade de expansão.

Embora a CE apresente padrão de herança quantitativa (Doffing et al., 1991), essa característica exibe alta herdabilidade (Pereira e Amaral Junior, 2001) sendo governada por três a cinco genes de grandes efeitos (Robbins e Ashman, 1984; Ziegler, 2001; Lu et al., 2003, Babu et al., 2006), e portanto, tende a ser pouco influenciada por fatores ambientais. Nesse contexto, Yu-Ling et al. (2006), pesquisando a consistência de QTL's para capacidade de expansão em híbridos avaliados em diferentes ambientes, verificaram pouca variação fenotípica entre genótipos, em relação as épocas diferentes de plantio em que foram cultivados.

Quando se analisa a performance das linhagens sob os diferentes níveis de nitrogênio (G x N), observa-se que houve interações significativas para RG, indicando uma resposta diferencial das linhagens de milho-pipoca em relação aos ambientes AN e BN, ou seja, possivelmente houve uma alteração no ranqueamento dos genótipos entre os ambientes (Tabela 3). Dessa forma, a seleção dos genótipos mais eficientes no uso do N deve ser realizada de maneira específica para cada ambiente e não em função do desempenho médio, pois os alelos que controlam a expressão do caráter sob estresse de N são, pelo menos em parte, diferentes dos alelos que controlam o mesmo caráter em condições ideais de suplementação desse nutriente (Souza et al., 2008; Fritsche-Neto et al., 2010).

Verificou-se uma redução de 18 % na média geral do RG no ambiente de baixo N quando comparada ao ambiente com alto N (Tabela 3). Bolaños e Edmeades (1996) sugerem que para caracterizar o estresse, a média de rendimento de grãos em estresse abiótico deva ser de 20 a 30 % inferior à alcançada pelo mesmo conjunto genético no ambiente sem estresse, considerando os ensaios em um mesmo ano e local. Embora a redução observada na presente pesquisa tenha sido levemente inferior à recomendada pelos autores supracitados, os resultados obtidos foram superiores aos reportados por Guedes et al. (2015) e Heinz et al. (2019), que reportaram decréscimo de rendimento de grãos de apenas 13 e 16 %, respectivamente.

Para realizar a seleção de indivíduos em determinadas condições ambientais, é interessante, inicialmente, conhecer a magnitude da influência

genética e ambiental na variação fenotípica das principais características de interesse (Falconer e Mackay, 1996). Diante do exposto, estimou-se o coeficiente de determinação genotípico (\hat{H}^2), o qual revela a proporção da variância fenotípica devida à variabilidade genotípica entre as médias dos genótipos (Cruz et al., 2014). Verificaram-se elevadas estimativas de \hat{H}^2 ($\hat{H}^2 > 0,96$) para ambas características nos dois níveis de N (Tabela 3). Esse resultado evidencia que os efeitos genéticos foram predominantes sobre os efeitos residuais, implicando em boas perspectivas de obtenção de ganhos genéticos para as duas principais características de importância econômica do milho-pipoca, praticando seleção fenotípica de indivíduos superiores nas duas condições de disponibilidade de N.

É frequentemente relatado em experimentos de milho avaliados sob ambientes contrastantes quanto à disponibilidade de N, que as estimativas de herdabilidade, parâmetro semelhante ao coeficiente de determinação genotípico, são mais baixas em ambientes estressados devido à menor precisão em tais condições experimentais (Bänziger et al., 1997; Gallais and Coque, 2005; Soares et al., 2011; Heinz et al., 2019; Ertiro et al., 2020). Porém, observou-se que as estimativas de \hat{H}^2 foram semelhantes em condições com e sem estresse de N (Tabela 3). Resultados semelhantes foram relatados por Presterl et al. (2003), Ertiro et al. (2017) e Rodrigues et al. (2017).

As estimativas de coeficiente de variação experimental (CV_e) obtidas no ambiente sob estresse de N foram maiores que as observadas na condição de alta disponibilidade de N, para RG e CE, respectivamente (Tabela 3). Essa mudança no CV_e em função do estresse de N corrobora com outros trabalhos encontrados na literatura com a cultura do milho (Bänziger et al., 1997; Santos et al., 1998; Guedes et al., 2015; Almeida et al., 2018; Torres et al., 2019). Uma possível explicação para essa diferença de CV_e é que em ambientes com alto suprimento de nitrogênio, as imperfeições do solo relacionadas à deficiência de N são corrigidas pela adubação, enquanto em ambientes que não foi ofertado esse nutriente, ocorrem as manchas de fertilidade do solo e, conseqüentemente, maior variação ambiental. Aliado a isso, em condições de estresse, as médias são geralmente menores, favorecendo uma maior estimativa de coeficiente de variação experimental (Badu-Apraku et al., 2013).

O índice de variação (IV) é um parâmetro importante, pois possibilita o melhorista ter uma concepção real da situação de cada característica para o

programa de melhoramento. Esse índice revela a proporção dos efeitos genéticos em relação ao erro experimental. Segundo Vencovsky (1987) é desejável que esta estimativa atinja valores próximos ou superiores a um. Para todas as características nas duas condições de N, foram observados valores de IV maiores que a unidade, apesar de que, sob AN as magnitudes tenham sido 46 e 19 % superiores às obtidas em BN para RG e CE, respectivamente (Tabela 3). Esses resultados indicam que embora os erros experimentais tenham sido maiores no ambiente de baixo N, é possível efetuar com sucesso a seleção de linhagens endogâmicas de milho-pipoca com elevado potencial agrônomo para os dois níveis de disponibilidade de N no solo.

3.1.4.2. Seleção das linhagens eficientes e responsivas ao uso do nitrogênio

A identificação de genótipos que apresentem adaptação a ambientes com menor oferta de fertilizantes nitrogenados e que respondam positivamente a potenciais melhorias ambientais, é uma etapa essencial dos programas de melhoramento que visam ao desenvolvimento de cultivares eficientes no uso do nitrogênio (EUN). Neste sentido, para classificar as linhagens quanto ao desempenho em relação aos níveis contrastantes de disponibilidade de N no solo, foi confeccionado um gráfico de dispersão a partir dos desvios das médias de rendimento de grãos de cada linhagem em relação à média de rendimento de grãos de cada ambiente (Figura 2).

Verificou-se que as linhagens L261, P2, L292, L216, L328, L272, L217, L206, L205, L381, L204, L511, L270, L326 e L477 foram classificadas como eficientes e responsivas (ER), por terem expressado produtividade média de grãos superiores às médias dos ambientes com baixa e alta disponibilidade de nitrogênio. Deve-se salientar que esse grupo de linhagens apresentou um diferencial positivo de produtividade que variou de 60 a 2.300,00 kg.ha⁻¹ em relação à média do AN e de 50 a 2.250,00 kg.ha⁻¹ em relação à média do BN (Figura 2). Dessa forma, esses genótipos se destacam como possíveis fontes de alelos favoráveis para aumentar o rendimento de grãos no alto e baixo N e, conseqüentemente, a eficiência no uso desse nutriente.

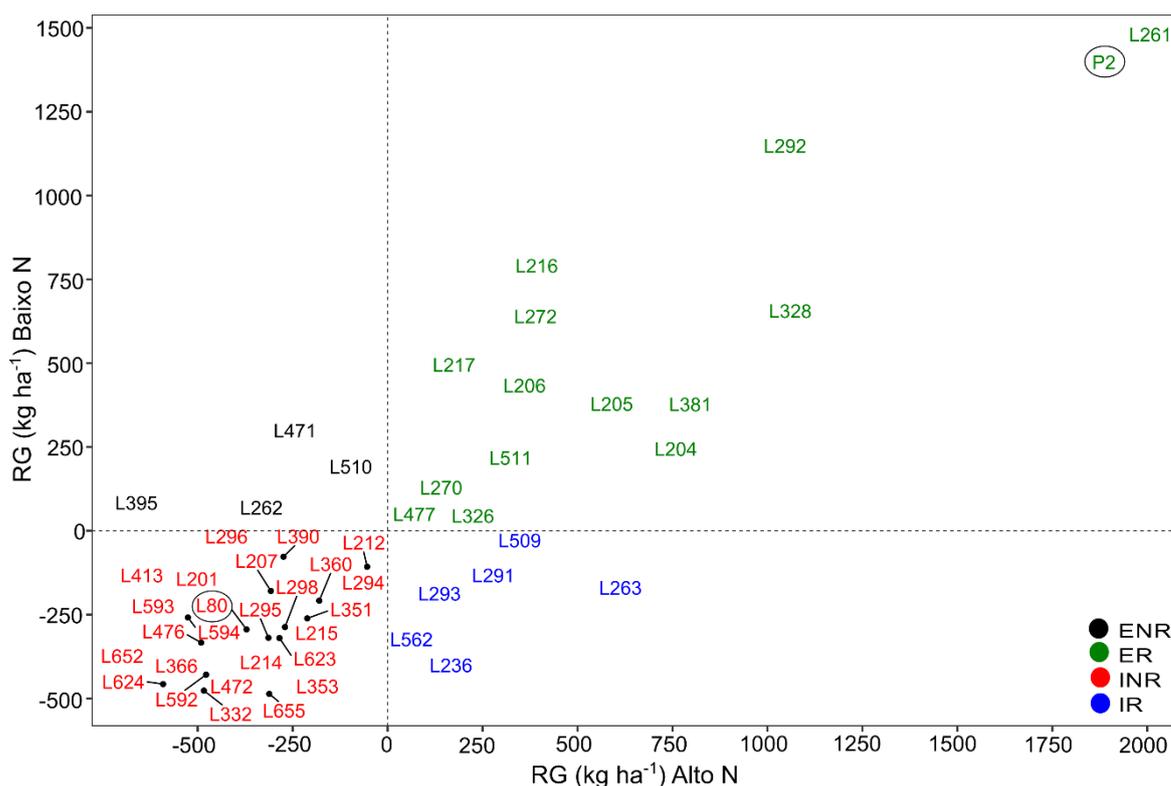


Figura 2. Classificação de 51 linhagens de milho-pipoca quanto à eficiência e responsividade no uso do nitrogênio. ENR: eficiente e não responsiva; ER: eficiente e responsiva; INR: ineficiente e não responsiva; e IR: ineficiente e responsiva.

As linhagens L263, L509, L291, L293, L562 e L236 apresentaram adaptação específica ao ambiente AN, ou seja, foram ineficientes e responsivas ao uso do N, visto que apresentaram produtividade abaixo da média geral do BN e aumentaram a produtividade quando o N foi aplicado. Caso contrário foi observado nas linhagens L510, L262, L471 e L395, que exibiram médias cujos desvios foram positivos em relação à média do ambiente de BN e negativos em relação à média do AN, demonstrando, assim, potencial adaptativo à condição de estresse (Figura 2).

Observou-se que 51 % das linhagens endogâmicas avaliadas apresentaram médias de RG abaixo da média geral dos ambientes de alta e baixa disponibilidade de N, sendo, portanto, classificadas como ineficientes e não responsivas ao uso do nitrogênio (INR) (Figura 2). Assim, esses genótipos são considerados desfavoráveis para serem inseridos como parentais em programas de melhoramento que visem a incrementar a expressão dessa característica em ambientes sob estresse de N.

Vale destacar que as linhagens P2 e L80, foram classificadas como ER e INR, respectivamente (Figura 2). Classificação idêntica foi encontrada por Santos et al. (2017) para P2 e L80, ao avaliarem 29 linhagens de milho-pipoca em estudo realizado a campo sob dois níveis contrastantes de N. Da mesma forma, Khan et al. (2020) avaliando essas mesmas linhagens (P2 e L80) e o híbrido F₁ oriundo do cruzamento entre elas, em experimentos com diferentes doses de N e dois estádios vegetativos (V6 e VT), observaram superioridade do híbrido e da linhagem P2 em relação a L80 para eficiência no uso, absorção e utilização do nitrogênio, independente da dose de N e do estádio vegetativo que as plantas foram avaliadas. Assim, os resultados encontrados no presente estudo ratificam a performance contrastante dessas duas linhagens endogâmicas quanto ao uso do N e, ao mesmo tempo, revelam a confiabilidade na discriminação realizada para o conjunto de genótipos quanto ao uso do N.

O desenvolvimento de híbridos e, ou populações de melhoramento de milho-pipoca adaptadas a ambientes com e sem restrição à oferta de nitrogênio, a partir do cruzamento entre linhagens superiores quanto ao uso do N, selecionadas previamente pelo desempenho *per se*, pode-se constituir em uma estratégia viável de seleção à medida que aumenta a influência da aditividade na expressão da EUN.

Santos et al. (2019), investigando a herança e os efeitos genéticos envolvidos na eficiência e responsividade no uso do N no rendimento de grãos de milho-pipoca, observaram que os efeitos dos genes aditivos foram mais importantes que os efeitos de dominância na expressão da eficiência no uso do nitrogênio em milho-pipoca. No entanto, esses mesmos autores destacam que os efeitos não aditivos dos genes também devem ser levados em consideração ao se praticar a seleção para eficiência no uso do N com base em RG, pois estes são também conhecidos como relevantes nos diferentes níveis de N (Gouda et al., 2013; Abdel-Moneam; et al., 2014). Assim, os dois tipos de ação gênica são importantes na expressão da eficiência no uso do nitrogênio e, portanto, a seleção de linhagens superiores quanto a eficiência no uso do N contribuirá para obtenção de progênies com performances também superiores.

Além desses resultados, Santos et al. (2019) relataram também que genes extra cromossômicos podem influenciar na expressão da EUN em milho-pipoca, uma vez que foram observados efeitos recíprocos significativos para rendimento de grãos. Isso evidencia a importância da escolha correta dos genitores femininos.

Diante disso, a avaliação prévia de linhagens quanto ao desempenho em relação à eficiência no uso do N possibilita ao melhorista planejar melhor a composição dos blocos de cruzamentos, vez que linhagens superiores para EUN devem ser privilegiadas como parentais femininos.

Em milho comum, a eficiência no uso do N é rotineiramente avaliada considerando apenas a produtividade de grãos como característica principal; no entanto, em programas de melhoramento com milho-pipoca que visam a aprimorar a adaptação a ambientes com baixa disponibilidade de nitrogênio, deve ser dada atenção especial também à capacidade de expansão (CE), tendo em vista que esta é a principal característica de qualidade da cultura. Entretanto, a seleção de genótipos que possuam elevada EUN associada a altos valores de CE não é uma tarefa fácil, pois a eficiência no uso do N está diretamente relacionada com o rendimento de grãos, e essa característica é historicamente conhecida por apresentar correlação negativa com a capacidade de expansão (Brunson, 1931; Dofing et al., 1991; Daros et al., 2004; Rangel et al., 2011; Cabral et al., 2016).

A seleção de linhagens com médias elevadas para CE é um critério importante a ser adotado em programas de melhoramento de milho-pipoca, uma vez que nessa característica, os efeitos aditivos são os principais componentes da variação genética (Larish e Brewbaker, 1999; Pereira e Amaral Junior, 2001; Scapim et al., 2006), apesar de trabalhos recentes demonstrarem que a herança desse caráter pode ser do tipo mista, ou seja, tanto ação aditiva quanto de dominância podem ser importantes na expressão da CE, embora se observe dominância em igual ou menor proporção (De lima et al., 2019; Coan et al., 2019).

O fato é que a aditividade ainda parece ser o principal modo de ação gênica para essa característica, e assim, espera-se que híbridos com elevada CE sejam obtidos a partir do cruzamento de linhagens superiores para essa característica, pois, nessa situação, a média da F_1 é igual a média dos genitores (Lyerly, 1942; Cruz et al., 2014). Nesse sentido, para o presente trabalho, considerou-se desejáveis as linhagens que apresentaram valores de CE iguais ou acima de 30 mL.g⁻¹, tendo em vista que uma cultivar de milho-pipoca para ser lançada deve possuir no mínimo, capacidade de expansão de 30 mL.g⁻¹ (Matta e Viana, 2001; Sawazaki, 2001).

A performance média para capacidade de expansão do conjunto de linhagens endogâmicas, considerando a média do AN e BN, estão apresentadas

na Figura 3. Verificou-se que as médias de CE variaram de 10,8 (L296) a 33,2 mL.g⁻¹ (L395), havendo a formação de onze grupos distintos de médias pelo algoritmo de Scott-Knott (1974), confirmando uma considerável variabilidade genética a ser explorada.

Dentre as linhagens classificadas como eficientes e responsivas (ER) ao uso do N (Figura 2), apenas L205, L206 e L217 destacaram-se por apresentar médias maiores que 30 mL.g⁻¹ para CE. Além dessas, a linhagem L395, que apresentou adaptação ao ambiente de baixa disponibilidade de N, apresentou a maior média de capacidade de expansão (33,2 mL.g⁻¹). Dessa forma, esses genótipos destacam-se como fontes promissoras de alelos favoráveis ao uso eficiente de nitrogênio, bem como para capacidade de expansão, demonstrando serem excelentes opções para utilização como genitores em blocos de cruzamentos, visando à obtenção de genótipos eficientes e responsivos ao uso do N e com elevada capacidade de expansão. Resultados semelhantes foram relatados por Santos et al. (2017), que comprovaram a possibilidade de selecionar linhagens endogâmicas de milho-pipoca que apresentam simultaneamente um uso eficiente de N e elevadas estimativas de volume de expansão.

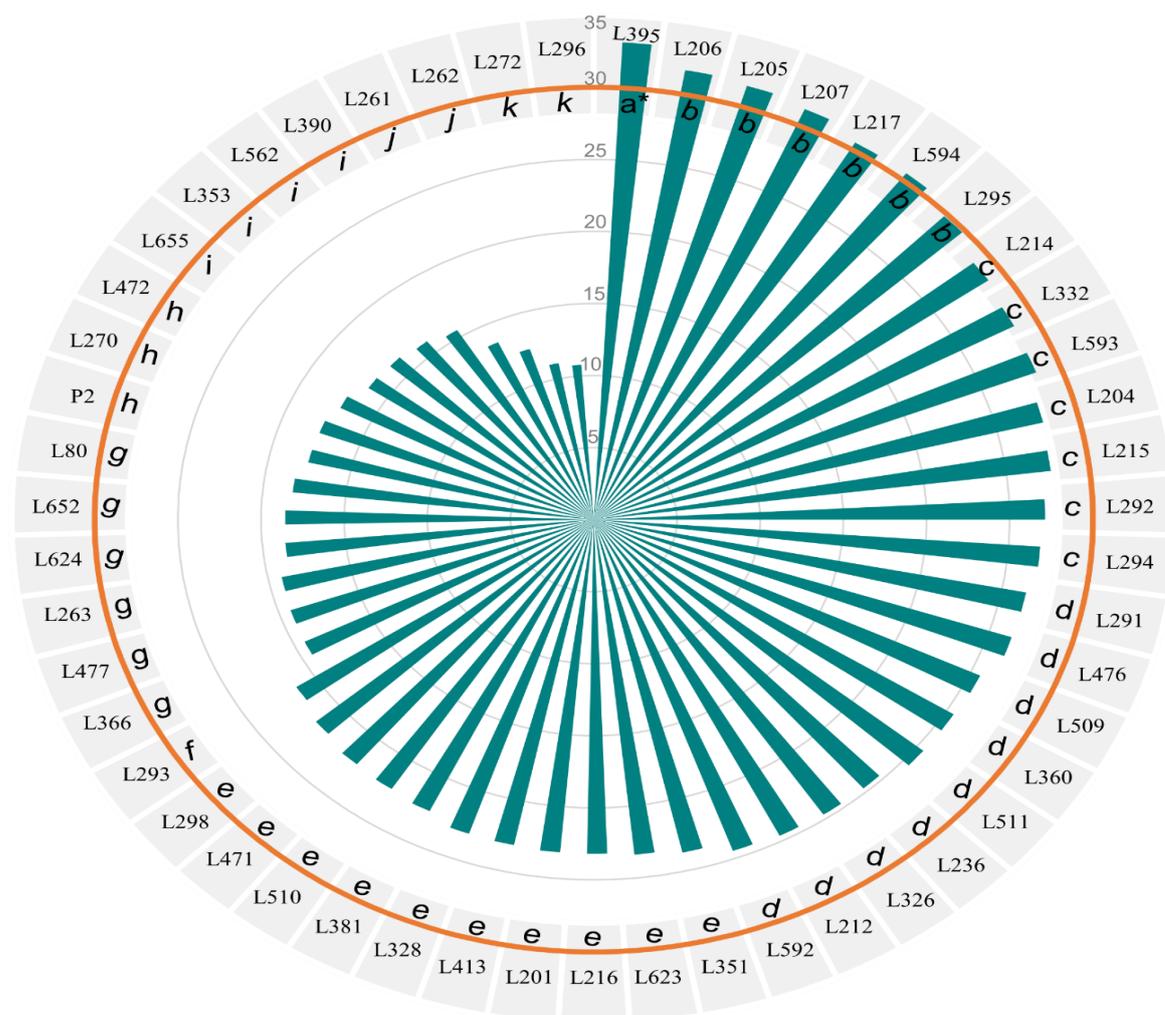


Figura 3. Médias de capacidade de expansão (mL.g^{-1}) das linhagens endogâmicas de milho-pipoca avaliadas sob alta e baixa disponibilidade de nitrogênio no solo. *Barras seguidas da mesma letra, não diferem estatisticamente pelo teste de Scott-Knott em 5 % de probabilidade.

Vale destacar que as linhagens aqui consideradas superiores para eficiência no uso do nitrogênio e para capacidade de expansão, foram extraídas de germoplasma melhorado, como o híbrido *topcross* IAC-125 (L205, L206 e L217) e da variedade de polinização aberta SAM (L395), as quais são cultivares que apresentam bom desempenho agrônomo e que provavelmente contribuíram com alelos favoráveis para rendimento de grãos e capacidade de expansão, no processo de desenvolvimento destas respectivas linhagens. Esse resultado, deixa claro a importância da escolha da fonte de variabilidade para extração de linhagens, uma vez que é o fator que determina o potencial máximo de melhoramento que o programa pode alcançar (Hallauer et al., 2010).

Analisando o contexto genealógico, juntamente com o desempenho das linhagens quanto ao uso do N e capacidade de expansão, diferentes estratégias de recombinação gênicas podem ser adotadas, buscando desenvolver híbridos e, ou populações de melhoramento que expressem conjuntamente médias superiores para as duas principais características de interesse econômico para a cultura, RG e CE. Neste cenário, o cruzamento da linhagem L395, que apresentou mérito para capacidade de expansão e rendimento de grãos em BN, e que pertence a um pool gênico distinto das demais linhagens elites (L205, L206 e L217), mostra-se com alto potencial para exploração da heterose e, conseqüentemente, obtenção de híbridos superiores quanto à eficiência no uso do N e capacidade de expansão.

Adicionalmente, esses cruzamentos podem ser utilizados para a obtenção de populações de melhoramento (populações biparentais), que podem ser utilizadas como germoplasma para extração de novas linhagens de milho-pipoca com alta concentração de alelos favoráveis para rendimento de grãos em condições de alta e baixa disponibilidade de N, bem como para volume de expansão.

3.1.5. CONCLUSÃO

No painel de linhagens de milho-pipoca avaliadas foi possível detectar fontes de alelos favoráveis para eficiência no uso do nitrogênio quanto ao rendimento de grãos e capacidade de expansão, destacando-se as linhagens L205, L206, L217 e L395. Esses genótipos aparecem como potenciais genitores para serem inseridos em blocos de cruzamentos visando a desenvolver híbridos e, ou populações de melhoramento com superioridade para sustentabilidade agrícola em cultivos em solo com déficit de nitrogênio.

3.2. HABILIDADE COMBINATÓRIA DE *TOPCROSSES* DE MILHO-PIPOCA PARA TESTADORES CONTRASTANTES QUANTO À EFICIÊNCIA E RESPONSABILIDADE AO NITROGÊNIO NO SOLO

3.2.1. INTRODUÇÃO

O nitrogênio (N) é um nutriente-chave para o crescimento das plantas e, portanto, um dos principais fatores que podem ser manipulados para aumentar a produtividade das culturas (Erisman et al., 2008). A agricultura praticada nas regiões tropicais do mundo é altamente dependente de aplicação de fertilizantes químicos. No Brasil, essa dependência é maior, pois a maioria dos solos apresenta baixa disponibilidade natural de nutrientes, principalmente o N, o que torna a fertilização nitrogenada uma das práticas mais utilizadas para atingir níveis elevados de produtividade no milho (DeLima e Borém, 2018).

No entanto, o uso intensivo desses insumos tem causado graves problemas ambientais, como eutrofização da água, acidificação do solo e poluição do ar, além de aumentar significativamente os custos de produção (Hou et al., 2007). Para sobrepujar as deficiências nutricionais do solo, reduzir o consumo de fertilizantes nitrogenados e os impactos ambientais e econômicos deles decorrentes, garantindo a produção agrícola sustentável, torna-se necessário o uso de cultivares eficientes no uso do N (EUN) (Han et al., 2016).

O milho-pipoca é um tipo especial de milho com potencial de movimentar variadas cadeias da economia. Nos Estados Unidos da América, a venda desse

cereal movimentada cerca de um bilhão de dólares anuais e, no Brasil, há uma crescente demanda por esse produto (Kist et al., 2019). Além disso, observa-se um aumento no cultivo do milho-pipoca nas regiões tropicais, o que reforça ainda mais a concepção de que essa cultura deve ser melhorada para condições ambientais limitantes, como a baixa disponibilidade de nitrogênio no solo (Almeida et al., 2018).

Nesse sentido, os programas de melhoramento de milho-pipoca vêm buscando melhorar a eficiência no uso do nitrogênio através da seleção de genótipos superiores, uma vez que há variabilidade genética disponível (Mundim et al., 2013; Santos et al., 2017; Almeida et al., 2018; Santos et al., 2019; Santos et al., 2020). Entretanto, o desenvolvimento de cultivares de milho-pipoca EUN demanda estudos para definir estratégias mais eficientes na escolha de genitores que resultem em híbridos superiores.

A utilização de esquemas de cruzamentos controlados, os chamados delineamentos genéticos, possibilita inferir sobre as capacidades de combinação de genitores e, conseqüentemente, deduzir sobre a ação gênica predominante envolvida na expressão dos caracteres de interesse (Aslam et al., 2015; Maphumulo et al., 2021). Dentre os delineamentos genéticos que podem ser adotados, o uso de *topcross* (Davis, 1927) possui como vantagem a possibilidade de avaliar maior número de híbridos a partir de cruzamentos envolvendo poucos genitores. Além disso, esse esquema de cruzamentos provou ser útil para identificar genitores e híbridos superiores para eficiência no uso do N em milho (Annor et al., 2019; Heinz et al., 2019; Ribeiro et al., 2020) e classificar linhagens endogâmicas em grupos heteróticos (Annor et al., 2020). Por esse motivo, tem sido amplamente utilizado por instituições públicas e privadas.

A escolha de um testador é um ponto chave para determinar o sucesso da metodologia *topcross*. Um bom testador deve ser altamente eficiente na discriminação de genótipos com base em alvos de seleção (Hallauer e Lopes Perez, 1979). As seguintes propriedades adicionais também são essenciais: os testadores devem ser facilmente manipulados, fornecer informações para ajudar a classificar os méritos relativos de diferentes linhagens e maximizar o ganho genético no melhoramento híbrido (Hallauer et al., 2010). Nesse aspecto, Rawlings e Thompson (1962) sugeriram que um testador de baixo rendimento, possuindo uma baixa frequência de alelos dominantes, poderia fornecer uma melhor

capacidade de discriminação da capacidade de combinação entre linhagens endogâmicas de milho.

De modo contrário, Fato et al. (2012) descobriram que um testador com uma alta frequência de alelos favoráveis para a doença de resistência ao míldio em milho era melhor do que um testador suscetível na discriminação de linhagens consanguíneas em termos de resistência à doença sob infecção, dias para antese e rendimento de grãos. Resultados semelhantes foram reportados por Zebire et al. (2020), os quais relataram que testadores com alta frequência de alelos desejáveis para resistência a *S. hermonthica* foram mais eficientes na discriminação do conjunto de linhagens de milho quando comparados com um testador com baixa frequência de alelos favoráveis.

A identificação de melhores testadores tem o potencial de aumentar a taxa de ganho genético em programas de melhoramento (Hallauer et al., 2010). Dessa forma, nota-se uma carência de informações sobre qual o testador adequado para selecionar linhagens com boa capacidade de combinação e desempenho agrônômico superior em híbridos de milho-pipoca para eficiência no uso do nitrogênio.

Diante disso, o objetivo do trabalho foi avaliar a performance de testadores contrastantes quanto a eficiência no uso do nitrogênio para identificar linhagens e híbridos de milho-pipoca superiores para condições ótimas e de deficiência de nitrogênio no solo.

3.2.2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.2.2.1. Aplicação do *topcross* no melhoramento de milho

A possibilidade de utilização de cultivares híbridas de milho foi descrita no início de 1900, com os trabalhos de Shull e East que elucidaram os conceitos de endogamia, hibridação e heterose na cultura, delineando o método de obtenção de híbridos simples (DeLima e Borém, 2018). Entretanto, devido ao baixo vigor das linhagens e a produção de quantidades reduzidas de sementes híbridas, a indústria sementeira não se desenvolveu. Posteriormente, Jones (1918) sugeriu a produção

de híbridos duplos a partir de híbridos simples, viabilizando a adoção imediata desse tipo de cultivar pelos agricultores, uma vez que o custo da semente era bem menor do que o do híbrido simples e as produtividades desses genótipos ainda eram superiores às das variedades de polinização aberta utilizadas comercialmente na época (Hallauer, 1990).

Com o melhoramento das populações-base para extração das linhagens e conseqüentemente, redução da carga genética desses germoplasmas foi possível obter linhagens com menor depressão por endogamia, fato que viabilizou a utilização comercial de híbridos simples, cerca de três décadas após as descobertas de Shull e East (Troyer e Wellin, 2009). Dessa forma, fica claro, que o sucesso de um programa de melhoramento para obtenção de híbridos está diretamente associado a escolha de populações promissoras para extração de linhagens, bem como a avaliação destas, considerando tanto a performance “*per se*” (potencial agrônômico) quanto ao desempenho como genitores em combinações híbridas (potencial genético) (Ferreira et al., 2009).

A avaliação do potencial de um conjunto de linhagens como genitores, eram inicialmente, realizada cruzando-as em todas as combinações híbridas possíveis, também chamado de cruzamentos dialélicos (Jenkins e Brunson, 1932). Entretanto, a utilização desse procedimento tornou-se inviável à medida que aumentou a dimensão dos programas de melhoramento e, conseqüentemente, o número de linhagens desenvolvidas (Hallauer et al., 2010). Alternativamente, Davis (1927) propôs a utilização de cruzamentos *topcrosses*, no qual muitas linhagens são avaliadas cruzando-as com um testador comum. Este método tem por objetivo avaliar a superioridade relativa das linhagens em cruzamentos com testadores, eliminando as que apresentam desempenho agrônômico inferior, tornando mais eficiente a identificação dos melhores híbridos.

O *topcross* consiste na avaliação de linhagens por meio de sua capacidade de combinação com um testador. Sprague e Tatum (1942) definiram a capacidade combinatória como o desempenho de linhagens ou cultivares quando usadas em combinações híbridas. Esta capacidade combinatória pode ser aferida em termos de capacidade geral de combinação (CGC) e capacidade específica de combinação (CEC) (Cruz e Vencovsky, 1989).

A capacidade geral de combinação (CGC) é definida como o desempenho médio do indivíduo quando cruzado com outros indivíduos da população. Ela está

associada ao valor genético aditivo do genitor, ou seja, reflete a porção de seu genótipo capaz de ser transferida aos seus descendentes. A capacidade específica de combinação (CEC) se refere ao rendimento médio da progênie de um cruzamento entre dois parentais específicos e representa o desvio entre tal rendimento e aquele que seria esperado em função da CGC dos parentais envolvidos, sendo associada aos efeitos não aditivos (Sprague e Tatum, 1942; Cruz e Vencovsky, 1989). Neste caso, a combinação híbrida mais favorável é aquela que apresenta maior estimativa de CEC e que seja resultante de um cruzamento em que pelo menos um dos parentais apresente elevada CGC, conforme a característica de interesse em estudo (Cruz et al., 2014).

Em virtude da facilidade de execução, eficiência e confiabilidade dos resultados, o uso do esquema *topcross* é amplamente difundido nos programas de melhoramento de milho para discriminação de linhagens endogâmicas ou parcialmente endogâmicas e híbridos superiores para diversas finalidades, incluindo adaptação a estresses bióticos (Tamirat et al., 2014; Bello, 2017; Bello et al., 2017; Galić et al., 2019; Almeida et al., 2021) e abióticos (Guedes et al., 2015; Menkir et al., 2017; Heiz et al., 2019; Arnnor et al., 2020; Mutimaamba et al., 2020; Ribeiro et al., 2020)

3.2.2.2. Escolha de testadores

Apesar de o método *topcross* ser consolidado para avaliação do desempenho de linhagens, a escolha do testador ideal continua sendo uma preocupação para os melhoristas de milho. Inúmeros estudos foram implementados com o intuito de identificar e usar o testador mais apropriado no melhoramento de híbridos (Matzinger, 1953; Rawlings e Thompson, 1962; Allison e Curnow, 1966; Hallauer e Lopez-Perez, 1979; Hallauer e Miranda Filho, 1988; Hallauer et al., 2010).

Matzinger (1953) e Russel (1961) caracterizaram um testador desejável como aquele que apresenta simplicidade de uso e maximiza a diferença genética expressa entre *testcrosses* de novas linhagens endogâmicas sob avaliação. Rawlings e Thompson (1962) definiram um bom testador como aquele que classifica e discrimina corretamente o desempenho relativo das linhagens em teste. Hallauer (1975) apontou que um bom testador deve apresentar uma maior eficiência na discriminação dos genótipos de acordo com os fins da seleção, ser de

fácil manipulação, fornecer informações que classifiquem o mérito relativo de linhagens e que maximizem o ganho genético.

A depender dos objetivos de cada programa de melhoramento, há várias possibilidades para a escolha de testadores, incluindo aqueles com (i) uma base genética ampla *versus* estreita, (ii) uma alta frequência de alelos favoráveis *versus* baixa, (iii) um alto rendimento *versus* baixo, (iv) uma capacidade geral *versus* específica de combinação, e (v) o uso de muitos testadores *versus* único testador. Além disso, a escolha do testador está relacionada com o estágio de desenvolvimento do programa, o tipo de material em teste e os tipos de híbridos de interesse a serem produzidos (Hallauer e Lopez-Perez, 1979; Hallauer et al., 2010).

Segundo Hallauer e Miranda Filho (1981) a base genética dos testadores impõe diferenças marcantes nas estimativas de capacidade geral e específica de combinação, sendo provocadas em virtude das diferenças das frequências gênicas de testadores de bases genéticas estreita e ampla. Testadores de base genética estreita exibem frequências fixas, considerando cada loco, sendo 0 ou 1 para linhagens e 0, 0,5 ou 1 para híbridos simples. Já testadores de base genética ampla, como populações ou sintéticos, as frequências gênicas dos diferentes locos distribuem-se entre 0 e 1. Em ambos os casos, a seleção pode ocasionar mudança na média da população em função da predominância dos efeitos aditivos, quando são utilizados testadores de base ampla; ou, por outro lado, a predominância dos efeitos de dominância, quando são utilizados testadores de base estreita (Hallauer et al., 2010).

Em relação à quantidade de testadores a ser utilizada, Abel e Pallack (1991) enfatizam que se deve utilizar mais de um testador para classificar corretamente um conjunto de linhagens, uma vez que podem existir grandes diferenças por diferentes testadores. Segundo Ferder e Spague (1947), melhores estimativas de capacidade geral de combinação podem ser alcançadas com o aumento do número de testadores. Dada a ambiguidade e inconsistência associada com a escolha do testador mais apropriado (Hallauer et al., 2010), avaliar a importância relativa de vários tipos de testadores será importante em programas de melhoramento de híbridos (Gutierrez-Gaitan et al., 1986; Li et al., 2007; Hallauer et al., 2010; Guimarães et al., 2012).

Outro requisito que deve ser levado em consideração quanto da escolha do testador, é a frequência de alelos favoráveis desse testador. Rawlings e

Thompson (1962) sugeriram que um testador de baixo rendimento possuindo uma baixa frequência de alelos dominantes poderia fornecer uma melhor capacidade de discriminação da capacidade de combinação entre linhagens de milho, em virtude de um menor grau de mascaramento dos alelos indesejáveis nas linhagens sob teste. Por outro lado, o uso de testadores com alta frequência de alelos favoráveis, como linhagens elites, permite identificar as melhores linhagens com maior capacidade específica de combinação (Halluer et al., 2010; Guimarães et al., 2012)

3.2.2.3. Histórico da população UENF-14: População-base do painel de linhagens avaliadas para o estudo de eficiência no uso do nitrogênio

A formação da população base para a extração do conjunto de linhagens avaliadas na presente pesquisa teve início em 1993, com o composto indígena denominado de UNB-1, o qual foi doado pelo professor Joachim Friedrich Wilhelm Von Bülow à Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF). Na etapa inicial de melhoramento, esse composto foi cruzado com a variedade de milho-pipoca SAM (*South American Mushroom*), cuja geração filial foi cruzada com uma variedade de milho-pipoca que apresentava resistência a *Exserohilum turcicum* (Pass.) K. J. Leonard & E. G. Suggs (helmintosporiose). A população resultante foi, então, conduzida por dois ciclos de seleção massal e, posteriormente, três retrocruzamentos com a variedade Americana, de grãos amarelos, dando origem à UNB-2 (Pereira e Amaral Júnior, 2001) que, por sua vez, foi submetida a dois ciclos de seleção massal, originando a população UNB-2U (Pereira e Amaral Júnior, 2001), sendo esta utilizada para iniciar o programa de seleção recorrente de milho-pipoca da UENF.

Uma vez obtida a população UNB-2U, foi realizado um estudo com intuito de conhecer a estrutura genética da população e determinar a melhor estratégia de melhoramento a ser utilizada, a fim de obter maiores ganhos genéticos nas principais características de interesse econômico da cultura – rendimento de grãos (RG) e capacidade de expansão (CE). Para tanto, Pereira e Amaral Junior (2001), lançaram mão do delineamento genético I de Comstock e Robinson (1948), cujos resultados indicaram que a ação gênica de sobredominância predominou para RG, enquanto para CE a aditividade foi a mais importante. Ademais, foi possível observar que a estratégia de família de irmãos-completos foi a que apresentou as maiores perspectivas de ganhos (9,42 % RG e 27,09 % CE), quando comparada

com a de famílias endogâmicas S_1 (7,93 % GY e 19,54 % CE) de meios-irmãos (6,26 % RG e 18,45 % CE), bem como a seleção massal estratificada (2,33 % RG e 12,13 % CE), e a seleção massal (2,23 % RG e 11,77 % CE). Diante desses resultados, os autores recomendaram que o procedimento de seleção recorrente intrapopulacional com famílias de irmãos-completos fosse adotado no melhoramento da UNB-2U.

Por conseguinte, Daros et al. (2002) realizaram o primeiro ciclo (C_1) de seleção recorrente da população UNB-2U, no qual foram obtidas 75 famílias de irmãos-completos e suas respectivas plantas foram autofecundadas. A avaliação das famílias irmãos-completos foi realizada em dois ambientes, no estado do Rio de Janeiro, no ano agrícola 1998/1999. Para estimar os ganhos genéticos foram selecionadas as 30 famílias superiores, resultando em ganhos de 10,39 % para capacidade de expansão e 4,69 % para rendimento de grãos.

No ano agrícola de 2001/2002, o segundo ciclo (C_2) de seleção recorrente foi conduzido. Este, por sua vez, foi realizado com a utilização de famílias endogâmicas (S_1). Um total de 40 famílias foram selecionadas e os ganhos genéticos foram preditos segundo os critérios estabelecidos pelo índice de Smith (1936) e Hazel (1943), perfazendo um ganho de 17,8 % para capacidade de expansão e de 26,95 % para rendimento de grãos (Daros et al., 2004).

No terceiro ciclo (C_3) de seleção recorrente, a estratégia de famílias de meios-irmãos foi adotada, sendo avaliadas 192 famílias, entre as quais foram selecionadas as 30 melhores com base no índice de seleção de Mulamba e Mock (1978), o que proporcionou ganho de 7,16 % para capacidade de expansão e de 10,00 % para rendimento de grãos (Santos et al., 2007).

Nos ciclos seguintes — C_4 a C_8 —, foram utilizadas famílias de irmãos-completos e a seleção das progênies superiores ocorreu com base no índice de Mulamba e Mock (1978). Os ganhos obtidos foram: 10,58 % para CE e 7,71 % para GY no C_4 (Freitas Júnior et al., 2009); 6,01 % para CE e 8,53 % para GY no C_5 (Rangel et al., 2011); 10,97 % para CE e 15,30 % para GY no C_6 (Ribeiro et al., 2012); 5,11 % para CE e 7,78 % para GY no C_7 (Freitas et al., 2013); e 3,61 % para CE e 4,60 % para GY no C_8 (Guimarães et al., 2018).

Vale destacar que após cinco ciclos seletivos, ou seja, após quatorze anos de evolução progressiva de ganhos genéticos, resultou no lançamento da cultivar UENF-14. Dentre as principais características dessa cultivar, destacam-se o

rendimento de grãos e a capacidade de expansão que apresenta média de 3.047,58 kg ha⁻¹ e 35,69 mL g⁻¹, respectivamente (Amaral Junior et al., 2013).

Ato contínuo, o programa de melhoramento intrapopulacional de milho-pipoca da UENF prosseguiu para mais um ciclo de seleção recorrente. Assim, o nono ciclo (C₉) foi desenvolvido em duas etapas, a primeira realizada por meio de uma seleção baseada em avaliação fenotípica das progênies, para isso foram avaliadas 200 famílias de irmãos-completos oriundas do oitavo ciclo da população UENF-14, a partir das quais 79 famílias superiores foram selecionadas (Guimarães et al., 2019), com ganhos preditos de 2,62 % para capacidade de expansão e de 4,17 % para rendimento grãos.

A segunda etapa foi realizada por meio de uma seleção recorrente genômica (SRG) utilizando a população UENF-14 resultante também do ciclo C₈. Foram realizadas avaliações fenotípicas e análise de um painel denso de SNPs para 98 progênies S₁ e, então, selecionadas 51 famílias superiores (Schwantes et al., 2020). Buscando-se manter a variabilidade na população sob ciclos de seleção recorrente, decidiu-se por juntar as progênies selecionadas por Guimarães et al. (2019) e Schwantes et al. (2020) e, assim foi realizada a recombinação no ano de 2019 para constituir a população de ciclo C₉.

3.2.3. MATERIAL E MÉTODOS

3.2.3.1. Germoplasma em estudo

Foram utilizadas 21 linhagens S₇, sendo 15 delas oriundas da variedade de polinização aberta UENF-14 (ciclo C₅), as quais foram usadas como parentais femininos. Por sua vez, os parentais masculinos (testadores) foram selecionados como base em suas diferentes origens, além de serem contrastantes quanto à resposta no uso do nitrogênio (três eficientes e responsivas e três ineficientes e não responsivas). Essas linhagens foram cruzadas em esquema de dialelo parcial, a fim de se obter 90 híbridos testcrosses.

3.2.3.2. Histórico das linhagens S₇ oriundas de UENF-14

A partir da variedade de polinização aberta UENF-14 de ciclo C₅ (Amaral Junior et al., 2013), iniciou-se na safra de 2011/2012 o processo de extração de linhagens. Esse trabalho de obtenção foi realizado no campo experimental da Escola Estadual Agrícola Antônio Sarlo, em Campos dos Goytacazes, RJ. As primeiras famílias S₁ foram obtidas autofecundando centenas de plantas da população UENF-14 de ciclo C₅. Na geração S₃, foram realizados ensaios com testadores e selecionadas as linhagens mais promissoras com base na capacidade geral de combinação para as principais características da cultura, a saber, rendimento de grãos, capacidade de expansão e volume de pipoca expandida por hectare (Lima et al., 2016; Pena et al., 2016). Após a seleção, avançaram-se gerações de autofecundação, até que sementes S₇ desses materiais fossem colhidas em plantas S₆. Ato contínuo, procedeu-se à multiplicação das sementes S₇. Ao fim desse processo, obtiveram-se 15 linhagens S₇ que foram utilizadas no presente estudo (Tabela 1).

3.2.3.3. Escolha dos Testadores

Foram utilizadas seis linhagens S₇ como testadoras: L59, L70, P7, L54, L75 e L80 (Tabela 1), as quais foram selecionadas por serem não relacionadas com as linhagens extraídas da população UENF-14 e pela resposta quanto à eficiência no uso do nitrogênio, conforme trabalhos realizados por Santos et al. (2017) e Santos et al. (2019). Dessa forma, levando em consideração tanto o desempenho *per se* quanto em combinações híbridas, as quais foram avaliadas em ambientes contrastantes quanto à disponibilidade de N no solo, foram selecionadas três linhagens classificadas como eficientes e responsivas, por apresentarem médias elevadas e estimativas altas e positivas de capacidade geral de combinação (CGC) nos ambientes com alto e baixo N; e três linhagens classificadas como ineficientes e não responsivas, por apresentarem estimativas negativas de CGC e médias inferiores às médias gerais dos ambientes AN e BN.

Tabela 1. Descrição dos genitores avaliados quanto ao tipo de progênie, origem e classificação quanto ao uso do nitrogênio (N).

Testadores	Tipo	Origem	Resposta ao uso do N
L59	Linhagem	Beija Flor	Eficientes e responsivos
L70	Linhagem	BRS Ângela	Eficientes e responsivos
P7	Linhagem	Hibrido Zaeli	Eficientes e responsivos
L54	Linhagem	Beija Flor	Ineficientes e não responsivos
L75	Linhagem	Viçosa	Ineficientes e não responsivos
L80	Linhagem	Viçosa	Ineficientes e não responsivos
Parentais femininos			
L681	Linhagem	UENF-14	Desconhecida
L682	Linhagem	UENF-14	Desconhecida
L683	Linhagem	UENF-14	Desconhecida
L684	Linhagem	UENF-14	Desconhecida
L685	Linhagem	UENF-14	Desconhecida
L686	Linhagem	UENF-14	Desconhecida
L688	Linhagem	UENF-14	Desconhecida
L689	Linhagem	UENF-14	Desconhecida
L690	Linhagem	UENF-14	Desconhecida
L691	Linhagem	UENF-14	Desconhecida
L692	Linhagem	UENF-14	Desconhecida
L693	Linhagem	UENF-14	Desconhecida
L694	Linhagem	UENF-14	Desconhecida
L695	Linhagem	UENF-14	Desconhecida
L696	Linhagem	UENF-14	Desconhecida

3.2.3.4. Obtenção dos híbridos *topcrosses*

Os híbridos foram obtidos no período de abril a julho de 2018 na área experimental do Colégio Agrícola Antônio Sarlo, localizado em Campos dos Goytacazes, RJ. Foram realizados os cruzamentos das 15 linhagens S₇ (parentais femininos) com os seis testadores (L59, L70, P7, L54, L75 e L80) (parentais masculinos), em esquema de dialelo parcial, perfazendo 90 híbridos *topcrosses*.

Para obtenção dos *topcrosses*, as 15 linhagens da UENF-14, foram semeadas manualmente em linhas de 10,00 m de comprimento, espaçadas em 1,00 m entre linhas e 0,40 m entre plantas, utilizando-se três sementes por cova, totalizando 25 plantas por parcela após o desbaste. Já os testadores foram semeados em três linhas de 40,00 m de comprimento, espaçadas em 1,00 m entre

linhas e 0,40 m entre plantas. Vale ressaltar que os testadores foram semeados de forma escalonada, adotando um intervalo de semeadura entre linhas de oito dias; essa tática foi utilizada para garantir a produção de pólen durante todo o processo de obtenção dos híbridos. As adubações de fundação e de cobertura foram realizadas de acordo com a recomendação para a cultura, bem como o controle de plantas daninhas e de pragas.

Os cruzamentos foram realizados de forma manual adotando-se o seguinte procedimento: as linhas femininas foram compostas pelas linhagens UENF-14 sendo receptoras de pólen; e as linhas masculinas, compostas pelos testadores, considerados doadores de pólen. Por ocasião do surgimento das espigas das linhagens, a espiga superior, foi previamente protegida antes da emissão dos estigmas, utilizando-se sacolas plásticas específicas para tanto. Por ocasião da antese, os pendões das linhas masculinas foram cobertos com sacola de papel 'Kraft'. Este procedimento foi realizado sempre no dia anterior ao cruzamento, sendo esse cuidado necessário, uma vez que o pólen perde sua viabilidade após oito horas (Goodman e Smith, 1987); assim, qualquer pólen viável que se encontre no saco de papel no dia seguinte só poderá ter sido proveniente do pendão coberto.

No outro dia, foram realizados os cruzamentos, com um *bulk* de pólen do mesmo testador, ou seja, a mistura do pólen de várias plantas do testador, sendo realizada a polinização das linhagens aptas; em seguida, a espiga foi coberta com a sacola de papel 'Kraft' donde coletou-se o pólen, a qual ficou devidamente protegida até o ato de sua colheita.

3.2.3.5. Avaliação dos híbridos *topcrosses*: caracterização da área e desenho experimental

Os ensaios de avaliação foram implementados na safra de verão do ano agrícola 2019/2020, em dois locais e, em cada local, com dois ambientes contrastantes quanto à disponibilidade de nitrogênio. Os experimentos foram conduzidos no período de agosto a dezembro de 2019 na Estação Experimental Ilha do Pomba, situada no município de Itaocara, RJ (Latitude 21° 38' 50" S, Longitude 42° 03' 46" O, 58 m de altitude) e no período de setembro de 2019 a janeiro de 2020 no Colégio Estadual Agrícola Antônio Sarlo, localizado no município de Campos dos Goytacazes, RJ (Latitude 21° 42' 48" S, Longitude 41° 20' 38" O, 14 m de altitude), esses municípios correspondem as regiões Noroeste e Norte

Fluminense. O clima das regiões é caracterizado como tropical úmido (Aw), segundo a classificação de Köppen (1948).

Para a distinção dos ambientes em relação a disponibilidade de nitrogênio, foram realizadas análises químicas dos solos, a partir de amostras coletadas na camada de 0-20 cm, intercaladas em linhas e entrelinhas formando uma amostra composta a partir de 10 subamostras. As amostras do solo foram analisadas para pH, matéria orgânica, e disponibilidade de P, K, Mg, Al e os resultados estão apresentados na Tabela 2. A adubação foi realizada com base nos resultados das análises químicas, exceto para a adubação nitrogenada.

Tabela 2. Atributos químicos do solo nas áreas experimentais em Itaocara e Campos dos Goytacazes, RJ, nas profundidades de 0-10 e 10-20 cm.

Campos dos Goytacazes										
Camadas	pH H ₂	P mg/dm ⁻³	K	Ca	Mg	Al	H+Al mmol/dm ⁻³	Na	C g dm ⁻³	MO g dm ⁻³
0 - 10	5,6	27	6,0	21,4	10,9	0,0	31,40	2,70	12,90	22,24
10 - 20	5,6	15	5,2	16,9	8,9	0,0	30,30	2,20	12,40	21,38
Itaocara										
Camadas	pH H ₂	P mg/dm ⁻³	K	Ca	Mg	Al	H+Al mmol/dm ⁻³	Na	C g dm ⁻³	MO g dm ⁻³
0 - 10	5,9	27	3,3	17,6	8,0	0,0	38,10	1,10	13,40	23,10
10 - 20	5,8	20	2,4	15,8	8,6	0,0	28,50	0,80	12,40	21,38

Nos ambientes de alto N, foram aplicados 180 kg ha⁻¹ de nitrogênio, sendo 30 kg ha⁻¹ aplicados na semeadura e 150 kg ha⁻¹ na adubação de cobertura, quantidade essa que foi parcelada nos estágios de quatro (V4) e seis folhas (V6) completamente expandidas, utilizando a uréia como fonte de N. Nos ambientes de baixo N, foram aplicados 30 kg ha⁻¹ de N na semeadura e não houve adubação de cobertura. Os demais tratamentos culturais foram realizados de acordo com as recomendações técnicas para cultura na região. Os experimentos receberam irrigação suplementar para evitar a ocorrência de estresse hídrico. A temperatura máxima, média e mínima (°C) e volume diário de chuva (mm) coletados durante o período experimental (Figura 1).

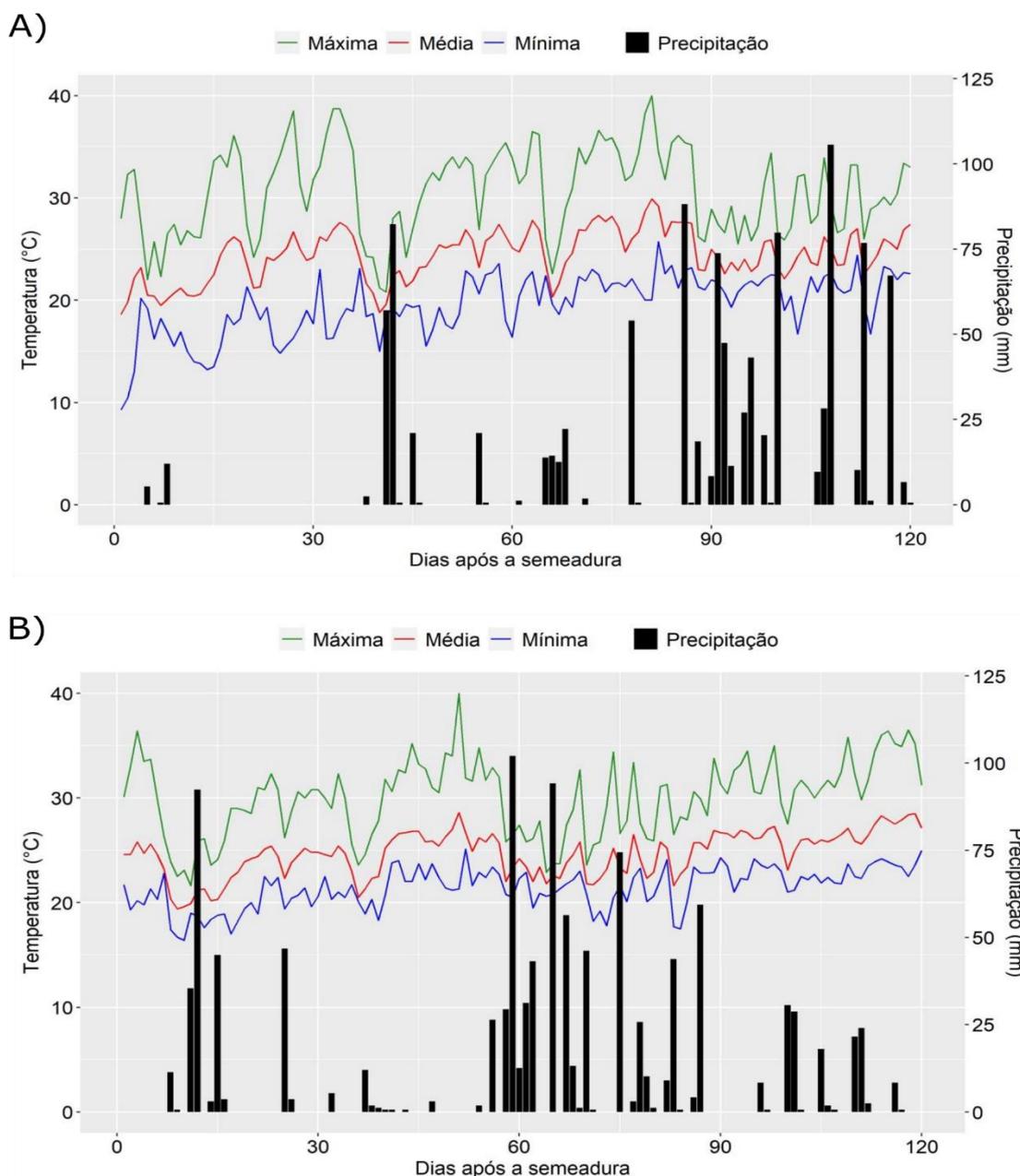


Figura 1. Precipitação (mm), temperatura máxima, média e mínima (°C) observadas durante o período experimental em Itaocara (A) e Campos dos Goytacazes (B), Rio de Janeiro, Brasil. Fonte: INMET.

Os 90 híbridos *topcrosses* obtidos, juntamente com três testemunhas (UENF N01, UENF N02 e UENF 01), foram avaliados em delineamento experimental de blocos completamente casualizados em arranjo de repetição dentro de “sets”. Foram utilizados cinco “sets” com três repetições, sendo que cada “set” conteve 19 híbridos *topcrosses* e três testemunhas. As testemunhas comuns foram inseridas com o intuito de capitalizar o efeito ambiental, para fins de

correções do efeito de “set”, bem como para possibilitar comparações com os híbridos testados.

A unidade experimental foi constituída por uma linha de 3,00 m, espaçada em 0,90 m entre linhas e em 0,20 m entre plantas, totalizando 15 plantas por unidade experimental. Foram semeadas manualmente três sementes por cova, sendo que 21 dias após a emergência, foi realizado um desbaste deixando-se apenas uma planta por cova, perfazendo um estande de 55.555,55 plantas por hectare.

3.2.3.6. Características avaliadas

Foram avaliadas as principais características de interesse econômico da cultura:

Rendimento de grãos (RG) – expresso em $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, obtida por meio da produção de grãos da parcela experimental, corrigido para 13 % de umidade; e Capacidade de expansão (CE) – expressa em $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$, aferida pela massa de 30 g de grãos e levada ao micro-ondas em saco de papel especial para pipocamento, na potência de 1.000 W, por um minuto e quarenta e cinco segundos, e o volume da pipoca foi medido em proveta de 2.000 mL, sendo o quociente do volume pipocado dividido por 30 (massa de grão).

3.2.3.7. Análise genético-estatística

Antes de realizar a análise de variância, procedeu-se a correção do efeito de set na classificação do conjunto de híbridos *topcrosses*, sendo efetuada a partir das médias das testemunhas comuns a todos os sets. O seguinte procedimento foi adotado para o cálculo do fator de correção: obteve-se a média das testemunhas para cada set (MST) e a média geral das testemunhas (MGT) e, posteriormente a relação entre MGT/MTS. Esse procedimento foi adotado por Ribeiro et al. (2009) e Guimarães (2018b).

Após os ajustes dos efeitos de sets no conjunto de dados, todas as características foram submetidas a análise de variância individual para cada local e nível de nitrogênio (N), a fim de testar a homogeneidade das variâncias residuais entre os ambientes. Para isso, foi considerado o seguinte modelo estatístico:

$$Y_{ij} = \mu + B_j + G_i + \varepsilon_{ij},$$

Em que:

Y_{ij} é a observação o i-ésimo genótipo no j-ésimo;

μ é a média geral;

B_j é o efeito do j-ésimo bloco;

G_i é o efeito fixo do i-ésimo genótipo; e

ε_{ij} é o efeito do erro aleatório experimental associado à observação Y_{ij} , com NID $(0, \sigma^2)$.

Posteriormente, realizou-se uma análise conjunta de locais (Campos dos Goytacazes e Itaocara – RJ) dentro de cada nível de N, sendo adotado o seguinte modelo estatístico:

$$Y_{ijk} = \mu + B/A_{jk} + A_j + G_i + GA_{ij} + \varepsilon_{ijk},$$

em que:

Y_{ijk} é a observação o i-ésimo genótipo no j-ésimo ambiente no k-ésimo bloco;

μ é a média geral;

B/A_{jk} é o efeito do k-ésimo bloco dentro do j-ésimo ambiente;

A_j é o efeito fixo do j-ésimo ambiente (Local);

G_i é o efeito fixo do i-ésimo genótipo;

GA_{ij} é o efeito fixo da interação ente o i-ésimo genótipo e o com o j-ésimo ambiente;

e

ε_{ijk} é o efeito do erro aleatório experimental associado à observação Y_{ijk} , com NID $(0, \sigma^2)$.

Na análise conjunta, procedeu-se o desdobramento da soma de quadrados de genótipos em *topcrosses*, testemunhas e seu contraste, bem como a interação destes com o ambiente. Além disso, a soma de quadrados de *topcrosses* foi desdobrada para cada um dos testadores. Foi realizado o agrupamento de médias pelo algoritmo de Scott-Knott (1974) a 5 % de probabilidade.

A análise do dialelo parcial foi realizada a partir das médias dos tratamentos, sendo efetuada para cada nível de nitrogênio (considerando a

interação entre locais). Efetuaram-se as análises de acordo com o método 4 de Griffing (1956), adaptado a dialelos parciais em múltiplos ambientes. As análises foram efetuadas considerando como fixo o efeito de genótipos (*topcrosses*) e ambientes (locais). A soma de quadrados referentes aos genótipos foi decomposta em efeitos de capacidade geral de combinação das progênies S₇ (grupo I) e dos testadores (grupo II) e em capacidade específica de combinação, além disso, avaliou-se a interação desses efeitos com os ambientes. O seguinte modelo genético-estatístico foi adotado:

$$Y_{ijk} = m + l_k + g_i + g'_j + s_{ij} + gl_{ik} + gl_{jk} + sl_{ijk} + \bar{e}_{ijk},$$

em que: Y_{ijk} : valor médio observado da combinação híbrida entre i-ésima progênie S₇ e o j-ésimo testador no k-ésimo local; m : média geral; l_k : efeito fixo do k-ésimo local ($k = 1, 2$); g_i : efeito da capacidade geral de combinação da i-ésima progênie S₇ (grupo I); g'_j : efeito da capacidade geral de combinação do j-ésimo testador (grupo II); s_{ij} : efeito da capacidade específica de combinação entre a i-ésima progênie S₇ do grupo I e o j-ésimo testador grupo II; gl_{ik} : efeito da interação entre a capacidade geral de combinação da i-ésima progênie S₇ e o k-ésimo local; $g'l_{jk}$: efeito da interação entre a capacidade geral de combinação do j-ésimo testador e o k-ésimo local; sl_{ijk} : efeito da interação entre a capacidade específica de combinação entre a i-ésima progênie S₇ e o j-ésimo testador com o k-ésimo local; e \bar{e}_{ijk} : erro experimental médio, obtido a partir da soma dos quadrados médios dos resíduos, ajustado para o número de observações.

As estimativas das capacidades de combinação foram obtidas da seguinte forma:

1. Efeito de CGC da i-ésima progênie S₇ (CGC I):

$$\hat{g}_i = \frac{Y_{i.}}{q} - \frac{Y_{..}}{pq}$$

2. Efeito de CGC do j-ésimo testador (CGC II):

$$\hat{g}_j = \frac{Y_{.j}}{p} - \frac{Y_{..}}{pq}$$

3. Efeito de CEC do cruzamento entre i-ésima progênie S₇ e o j-ésimo testador (CEC):

$$\hat{s}_{ij} = Y_{ij} - \frac{Y_{i.}}{q} - \frac{Y_{.j}}{p} + \frac{Y_{..}}{pq}$$

Em que: Y_{ij} é valor da combinação híbrida entre a i-ésima progênie S₇ e o j-ésimo testador; $Y_{..}$ é o somatório de todas as combinações híbridas envolvendo as i-ésimas progênes S₇ e os j-ésimos testadores; $Y_{i.}$ é o somatório das combinações híbridas da i-ésima linhagem cruzada com os testadores j; $Y_{.j}$ é o somatório das combinações híbridas do j-ésimo testador cruzado com as progênes S₇; p é número de progênes S₇; e q o número de testadores (Vencovsky e Barriga, 1992).

Todas as análises genético-estatísticas foram realizadas com o auxílio dos programas computacionais R (R core Team, 2017) e GENES (Cruz et al., 2013).

3.2.4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.2.4.1. Análise de variância

Houve diferença significativa entre os genótipos em 1 % de probabilidade pelo teste F para as duas características avaliadas nos ambientes de alto e baixo nível de nitrogênio no solo (Tabela 3), indicando a existência de variabilidade genética disponível para ser explorada no processo de seleção dos indivíduos superiores visando obter ganhos em capacidade de expansão e rendimento de grãos.

Procedendo ao desdobramento de genótipos em efeito de *topcrosses* (TC), grupo *topcrosses* provenientes de testadores selecionados como eficientes e responsivos (ER) e ineficientes e não responsivos (INR) e *topcrosses* com cada um dos testadores, detectaram-se diferenças significativas em 1 % de probabilidade para as características avaliadas nas duas condições de disponibilidade de N no solo (Tabela 3), evidenciando a presença de variabilidade genética nos híbridos *topcrosses* independente do tipo de testador que foi utilizado.

Observou-se ainda, que a fonte de variação entre TC ER e TC INR foram altamente significativas para todos os caracteres em AN e BN, indicando que pelo menos uma das combinações difere entre si, dentre os *topcrosses* com os diferentes testadores (Tabela 3).

O contraste entre os grupos de *topcrosses* ER vs INR foi significativo em 1 % de probabilidade para todas as características nos dois níveis de N, sugerindo que pelo menos um híbrido *topcross* proveniente dos testadores ER diferem dos *topcrosses* advindos dos testadores INR (Tabela 3).

No que diz respeito às testemunhas, foram observadas diferenças significativas ($p < 0,01$) para todos os caracteres na condição de alto N (Tabela 3); no entanto, sob condição de estresse, foram detectadas diferenças significativas apenas para CE (Tabela 3). Quanto aos contrastes dos efeitos de *topcrosses* (TC) vs testemunhas (TM), foram discriminadas diferenças significativas nos dois caracteres nos dois níveis de N, demonstrando que em média, os *topcrosses* divergem das testemunhas.

Tabela 3. Resumo da Análise de variância conjunta para as principais características de importância econômica em milho-pipoca, avaliadas em híbridos *topcrosses* e testemunhas sob alto nível de nitrogênio no solo. Campos dos Goytacazes e Itaocara - RJ.

FV	GL	RG (kg.ha ⁻¹)		CE (g.mL ⁻¹)	
		ALTO	BAIXO	ALTO	BAIXO
REP/AMB	4	175.459,25	778.168,50	5,00	1,00
AMB (A)	1	43.271.250,00**	4.958.917,00	515,00**	710,00**
GEN (G)	92	808.709,92**	847.801,64**	94,74**	88,83**
Topcrosses (TC)	89	735.927,47**	854.235,51**	94,38**	87,92**
ER	44	690.685,86**	888.319,84**	87,66**	82,07**
L59	14	507.646,36**	850.875,14**	68,29**	62,74**
L70	14	485.379,50**	527.366,00**	67,50**	66,19**
P7	14	436.607,86**	298.357,43**	76,83**	68,47**
Entre TC ER	2	5.187.652,88**	7.806.846,5**	440,20**	423,90**
INR	44	716.100,10**	733.029,20**	99,25**	92,07**
L54	14	351.450,57**	625.675,07**	97,38**	93,59**
L75	14	494.093,36**	902.272,64**	113,28**	108,13**
L80	14	646.179,00**	624.707,79**	56,83**	48,72**
Entre TC INR	2	5.312.141,69**	1.058.054,00**	311,10**	272,45**
ER vs INR	1	3.598.962,59**	4.687.602,00**	176,00**	163,00**

Tabela 3 – Cont.

FV	GL	RG (kg.ha ⁻¹)		CE (g.mL ⁻¹)	
		ALTO	BAIXO	ALTO	BAIXO
Testemunhas (TM)	2	1.758.588,5**	329.773,50	111,24**	168,60**
TC vs TM	1	5.386.591,17**	1.311.244,00**	93,52**	9,80**
G x A	92	480.686,73**	449.321,49**	7,80**	8,92**
TC x A	89	488.742,26**	461.469,73**	7,69**	8,82**
ER x A	44	513.532,25**	388.322,95**	10,86**	11,50**
L59 x A	14	474.278,14**	336.294,21**	8,91**	12,54**
L70 x A	14	544.544,07**	715.221,57**	7,93**	6,64**
P7 x A	14	583.861,29**	118.833,29	12,54**	12,44**
(Entre TC ER) x A	2	78.925,00	350.661,50	33,35	31,70*
INR x A	44	467.412,95**	536.746,34**	4,50**	5,10**
L54 x A	14	238.637,71**	553.925,43**	6,80**	9,80**
L75 x A	14	667.019,57**	477.970,86**	4,29**	4,36**
L80 x A	14	402.745,14**	574.703,50**	2,05	2,73*
(Entre TC INR) x A	2	1.124.267,96**	562.221,00*	7,05*	11,80**
(ER vs INR) x A	1	336.472,34	367.757,00	8,00*	19,00**
TM x A	2	234.726,50	46.247,50	4,99	8,75
(TC vs TM) x A	1	255.665,00	174.276,00	24,03**	18,50**
Resíduo	368	116.418,46	159.253,18	1,57	1,54
Média Geral		3.049,23	2.276,10	27,82	27,28
CV (%)		11,19	17,53	4,50	4,55

**,*: significativo a 1 e 5 % de probabilidade pelo teste F. RG: rendimento de grãos; CE: capacidade de expansão.

A interação de genótipos x ambientes, assim como TC x A, ER x A, INR x A e as interações dos *topcrosses* de cada testador com o ambiente foram significativas para todas as características nas duas condições de N, exceto para RG dos *testcrosses* do testador P7 no BN (Tabela 3). Esses resultados evidenciam que a maioria dos *topcrosses* não apresentaram a mesma performance relativa frente à variação ambiental a que foram submetidos. Dessa forma, a seleção dos híbridos superiores deve ser realizada especificamente para cada local (Vencovsky e Barriga, 1992).

Tratando-se das testemunhas (TM), não foram detectadas diferenças significativas da interação das mesmas com os ambientes para todas as características, independentemente do nível de N (Tabela 3). Esse resultado pode ser explicado devido a essas testemunhas terem sido desenvolvidas e

recomendadas para a região Norte e Noroeste Fluminense, com base em experimentos realizados nos mesmos locais de avaliação do presente estudo.

Maiores estimativas do coeficiente de variação experimental (CVe %) foram observadas nos ambientes de baixo N (Tabela 3). Em experimentos com estresses abióticos, maiores estimativas de coeficiente de variação experimental são consideradas normais, pois 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 também aumentam (Scapim et al., 1995; Fritsche-Neto et al., 2012). No entanto, de modo geral, os CVes foram de baixa magnitude, indicando boa precisão experimental, conseqüentemente, permitindo uma inferência confiável.

Observando as médias gerais para as características avaliadas, verificou-se que no ambiente sob deficiência de N, houve reduções de 25,35 e 1,94 % para RG e CE, respectivamente, em relação ao ambiente com alta disponibilidade de N (Tabela 3). Diante disso, pode-se notar que a ausência de N foi responsável pela ocorrência das menores médias em BN, sobretudo considerando o rendimento de grãos. Isso aconteceu porque a falta desse nutriente interfere em processos importantes para o crescimento e o desenvolvimento das plantas, afetando diretamente a produtividade das culturas, especialmente o milho, para o qual esse caráter é altamente dependente de elevada disponibilidade do nitrogênio (Asibi et al., 2019).

Em estudos anteriores, Rodrigues et al. (2017) avaliando um conjunto de linhagens endogâmicas de milho tropical, encontraram resultados semelhantes ao presente estudo, com redução de 25 % no rendimento de grãos. Na cultura do milho-pipoca, Santos et al. (2020) verificaram redução de 20 % no RG em condição de BN. Assim, pode-se afirmar que o nível de estresse de N observado no presente estudo é suficiente para selecionar genótipos superiores para eficiência no uso do nitrogênio.

3.2.4.2. Performance média dos *topcrosses*

Em relação ao rendimento médio de grãos (RG) sob a condição AN, observou-se de maneira geral, que os *topcrosses* provenientes do cruzamento dos testadores selecionados como eficientes e responsivos, com exceção de P7,

apresentaram maiores médias em relação aos testadores ineficientes e não responsivos, destacando os *topcrosses* do testador L70 por exibir média geral acima de 3.000,00 kg.ha⁻¹ nos dois locais (Tabela 4). Da mesma forma, sob condição limitante de N, o grupo de híbridos dos testadores eficientes L59 e L70 se sobressaíram em relação aos demais, apresentando médias em Campos de 2.366,36 e 2.614,66 kg.ha⁻¹, respectivamente e em Itaocara de 2.507,68 e 2.633,36 kg.ha⁻¹, respectivamente (Tabela 5).

No que diz respeito a CE, verificou-se que nas duas condições de disponibilidade de N e nos dois locais de avaliação, o grupo de híbridos sintetizados a partir dos testadores P7 e L70 exibiram superioridade em relação aos demais. (Tabelas 4 e 5).

Tabela 4. Valores médios, mínimo e máximo de rendimento de grãos (RG, kg.ha⁻¹) e capacidade de expansão (CE, g.mL⁻¹) dos *topcrosses* de milho-pipoca de seis testadores avaliados sob condição de alta disponibilidade de nitrogênio.

Testador	Local	RG (kg.ha ⁻¹)			CE (g.mL ⁻¹)		
		Média	Min	Max	Média	Min	Max
L59	Campos	2.884,55	2.173,85	3.500,74	27,53	26,56	32,83
	Itaocara	3.425,09	2.302,08	3.916,19	24,43	26,56	30,40
L70	Campos	3.142,41	2.594,63	3.629,37	29,21	21,16	35,93
	Itaocara	3.573,76	2.992,60	4.328,19	28,47	26,56	32,67
P7	Campos	2.616,85	2.126,35	3.399,30	31,56	25,01	37,58
	Itaocara	3.142,57	2.426,96	3.885,90	29,11	26,56	34,18
L54	Campos	2.402,06	1.978,90	2.856,67	29,30	20,72	35,19
	Itaocara	3.002,33	2.286,14	3.521,61	27,27	26,56	32,77
L75	Campos	2.834,12	1.938,96	3.359,51	26,01	18,36	32,91
	Itaocara	3.209,04	2.337,81	3.883,59	24,19	26,56	31,66
L80	Campos	2.768,02	2.189,83	3.526,11	28,84	23,91	34,13
	Itaocara	3.590,00	3.016,57	4.709,96	27,88	26,56	33,37

Tabela 5. Valores médios, mínimo e máximo de rendimento de grãos (RG, kg.ha⁻¹) e capacidade de expansão (CE, g.mL⁻¹) dos *topcrosses* de milho-pipoca de seis testadores avaliados sob condição de baixa disponibilidade de nitrogênio.

Testador	RG (kg.ha ⁻¹)				CE (g.mL ⁻¹)		
	Local	Média	Min	Max	Média	Min	Max
L59	Campos	2.366,36	1.594,33	3.066,72	27,24	20,61	31,87
	Itaocara	2.507,68	1.652,32	3.177,84	23,58	18,56	29,90
L70	Campos	2.614,66	2.123,66	3.136,84	29,12	21,46	35,58
	Itaocara	2.633,36	2.018,05	3.653,29	27,82	22,61	32,27
P7	Campos	1.912,59	1.578,33	2.566,44	30,98	24,79	36,57
	Itaocara	2.180,96	1.788,60	2.615,03	28,23	19,16	32,52
L54	Campos	1.959,81	1.260,20	2.641,42	28,97	20,33	37,47
	Itaocara	2.335,17	1.657,61	2.946,91	26,48	19,10	30,86
L75	Campos	2.156,82	1.171,78	3.033,39	25,67	17,29	32,28
	Itaocara	2.452,46	1.437,88	3.150,13	23,78	17,28	29,68
L80	Campos	2.061,38	1.610,15	2.873,42	28,27	22,95	34,12
	Itaocara	2.131,93	1.452,57	3.273,64	27,21	23,21	32,20

Considerando o RG sob AN e BN, verificou-se maiores amplitudes das médias dos *topcrosses* dos testadores L75 e L80. Já para CE, foi constatada maior variação entre dos híbridos dos testadores L70, L54 e L75 sob condição AN e dos testadores L54 e L75 sob BN nos dois locais (Tabelas 4 e 5).

Variação na performance média das 20 melhores combinações híbridas para RG e CE, avaliadas sob condições de alta e baixa disponibilidade de N no solo, podem ser observadas nas Figuras 2 e 3, respectivamente. Para RG sob condição AN, houve a formação de três e quatro grupos distintos de médias em Campos dos Goytacazes e Itaocara, respectivamente (Tabela suplementar 1). As 20 melhores combinações híbridas exibiram médias de 3.304,51 e 3.982,84 kg.ha⁻¹ em Campos dos Goytacazes e Itaocara, respectivamente. Adicionalmente, verificou-se que todas essas combinações exibiram médias maiores que todas as testemunhas, independente do local de avaliação (Figura 2).

Observou-se, também, que dentre os vinte melhores *topcrosses* para RG sob AN, os híbridos L682 x L59, L682 x L70, L682 x L75, L689 x L59, L688 x L80, L684 x L70 e L689 x L70 se sobressaíram por demonstrarem consistência produtiva nos dois locais de avaliação (Figura 2). Em relação às progênes S₇, as linhagens L682, L684, L686, L688, L689, L691 e L694 destacaram-se como genitoras das melhores combinações híbridas para RG em AN (Figura 2).

A respeito da CE, observou-se que a média geral das vinte melhores combinações híbridas foram de 33,80 e 31,97 g.mL⁻¹ em Campos dos Goytacazes e Itaocara, respectivamente. Além disso, notou-se que os testadores P7, L70 e L54 e as progênes L681, L688 e L689 destacaram-se por serem os pais predominantes dos melhores híbridos nos dois locais de avaliação. Analisando-se a performance das melhores combinações híbridas nos dois locais, constatou-se que houve uma alta coincidência entre os *topcrosses* melhores ranqueados, demonstrando que embora a interação TC x Locais tenha sido significativa (Tabela 3), esta parece ser do tipo simples. Dessa forma, os híbridos L688 x P7 e L690 x L80 destacaram-se sob AN, pois apresentaram elevados índices de CE, posicionando-se entre os cinco primeiros ranqueados nos dois locais (Figura 2).

As combinações híbridas, L694xL70, L689xL59 e L689xP7 merecem destaque por se mostrarem superiores para as RG e CE, simultaneamente sob condição ótima de disponibilidade de N (Figura 2).

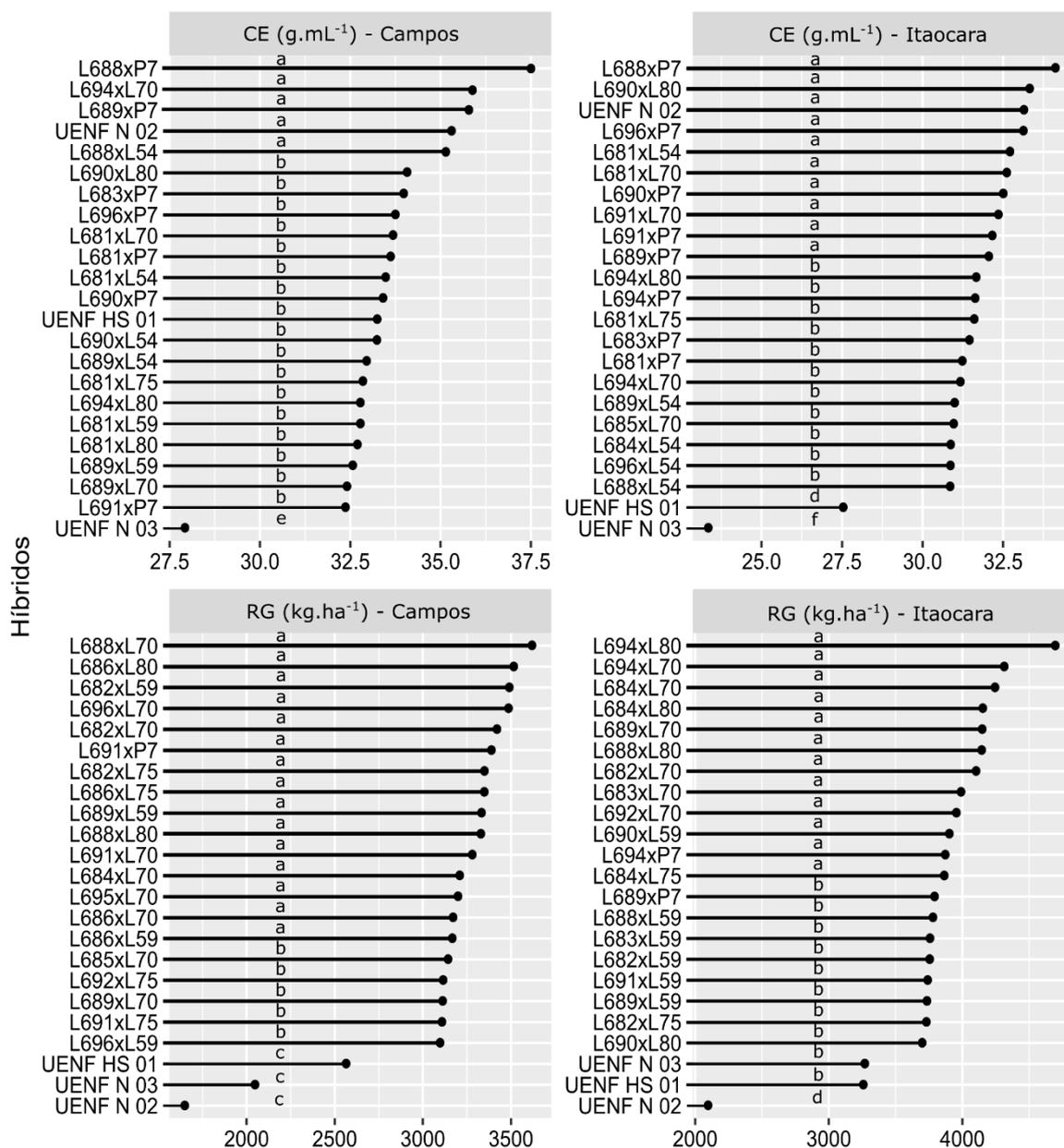


Figura 2. Classificação das 20 melhores combinações híbridas entre os 90 *topcrosses* de milho-pipoca avaliados para rendimento de grãos (RG, kg.ha⁻¹), capacidade de expansão (CE, g.mL⁻¹) sob condições de alta disponibilidade de nitrogênio no solo. Barras seguidas da mesma letra, não diferem estatisticamente pelo teste de Scott-Knott em 5 % de probabilidade.

Em relação a condição de baixa disponibilidade de nitrogênio, verificou-se a formação de três e quatro grupos de médias distintas pelo algoritmo de Scott-Knott (1974) para RG em Campos dos Goytacazes e Itaocara, respectivamente (Tabela suplementar 2). Dentre os híbridos melhores classificados, vale destacar os seguintes *topcrosses* L694xL70, L696xL70, L686xL59, L694xL59, L685xL59,

L684xL70, L688xL54, L695xL54, L685xL75 pois apresentaram superioridade consistente para RG nos dois locais (Figura 3).

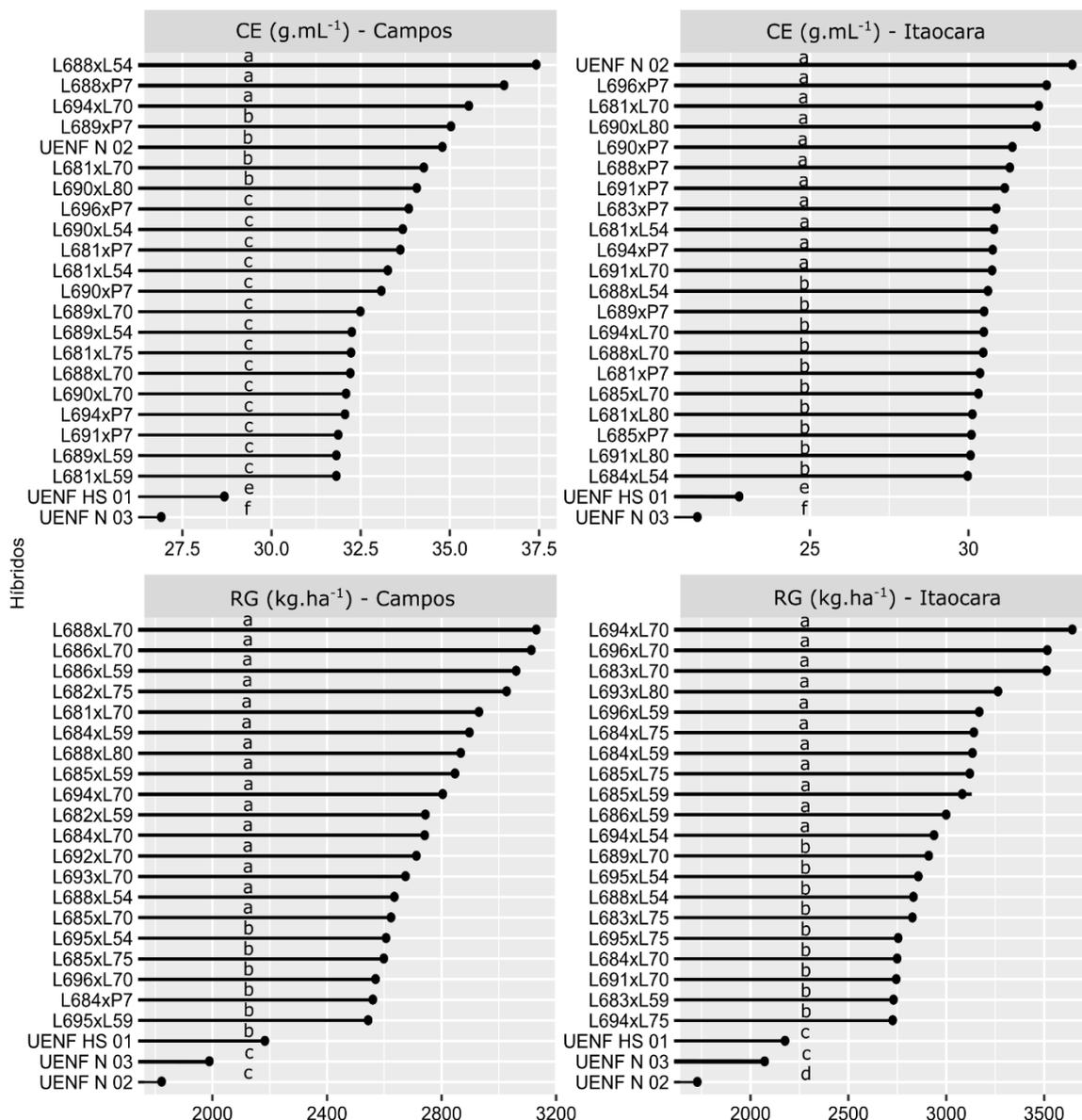


Figura 3. Classificação das 20 melhores combinações híbridas entre os 90 *topcrosses* e testemunhas de milho-pipoca avaliados para rendimento de grãos (RG, kg.ha⁻¹), capacidade de expansão (CE, g.mL⁻¹) sob condições de baixa disponibilidade de nitrogênio no solo. Médias seguidas pela mesma letra na coluna pertencem ao mesmo grupo pelo algoritmo de Scott-Knott (1974), ao nível de 5 % de probabilidade.

Em relação a CE sob BN, constatou-se a formação de onze e sete grupos de médias distintos (Tabela suplementar 2), observando novamente a predominância dos testadores P7, L70 e L54 na composição dos híbridos superiores. Entre a progênie S₇, destacaram as linhagens L688, L681, L694 e L689 como os genitores dos híbridos superiores nos dois locais de avaliação. Dentre os vinte melhores híbridos para BN, as combinações L694xL70, L688xL54 e L688xL70 se destacaram por apresentarem médias elevadas para RG e CE nos dois locais (Figura 3).

De maneira geral, os híbridos L684x70 e L694x70 por terem apresentado desempenho superior para as suas principais características de importância econômica do milho-pipoca – RG e CE – simultaneamente em ambas condições de disponibilidade de nitrogênio (Tabelas 6 e 7) e, portanto, podendo ser opções de cultivo para produtores que dispõem ou não de alto nível tecnológico.

Analisando a contribuição dos diferentes testadores nas vinte melhores combinações híbridas, verificou-se para RG que os testadores selecionados como eficientes e responsáveis contribuíram com 70 % dos híbridos superiores em ambas condições de disponibilidade de N no solo. Vale ressaltar, os genitores L70 (45 e 30 %, Campos dos Goytacazes e Itaocara, respectivamente) e L59 (20 e 30 %, Campos dos Goytacazes e Itaocara, respectivamente), com maiores participações (Figura 4). Esses resultados, demonstram claramente que a inclusão de genitores eficientes no uso do N nos blocos de cruzamentos aumentam as chances de obtenção de híbridos superiores tanto para eficiência quanto responsividade ao uso do nitrogênio.

Considerando a CE, observou-se que o testador P7 seguido do L70 foram os genitores que participaram do maior número de híbridos superiores tanto no alto como no baixo N, sendo esses, genitores promissores para incrementar a média dessa característica nas duas condições de N (Figura 4).

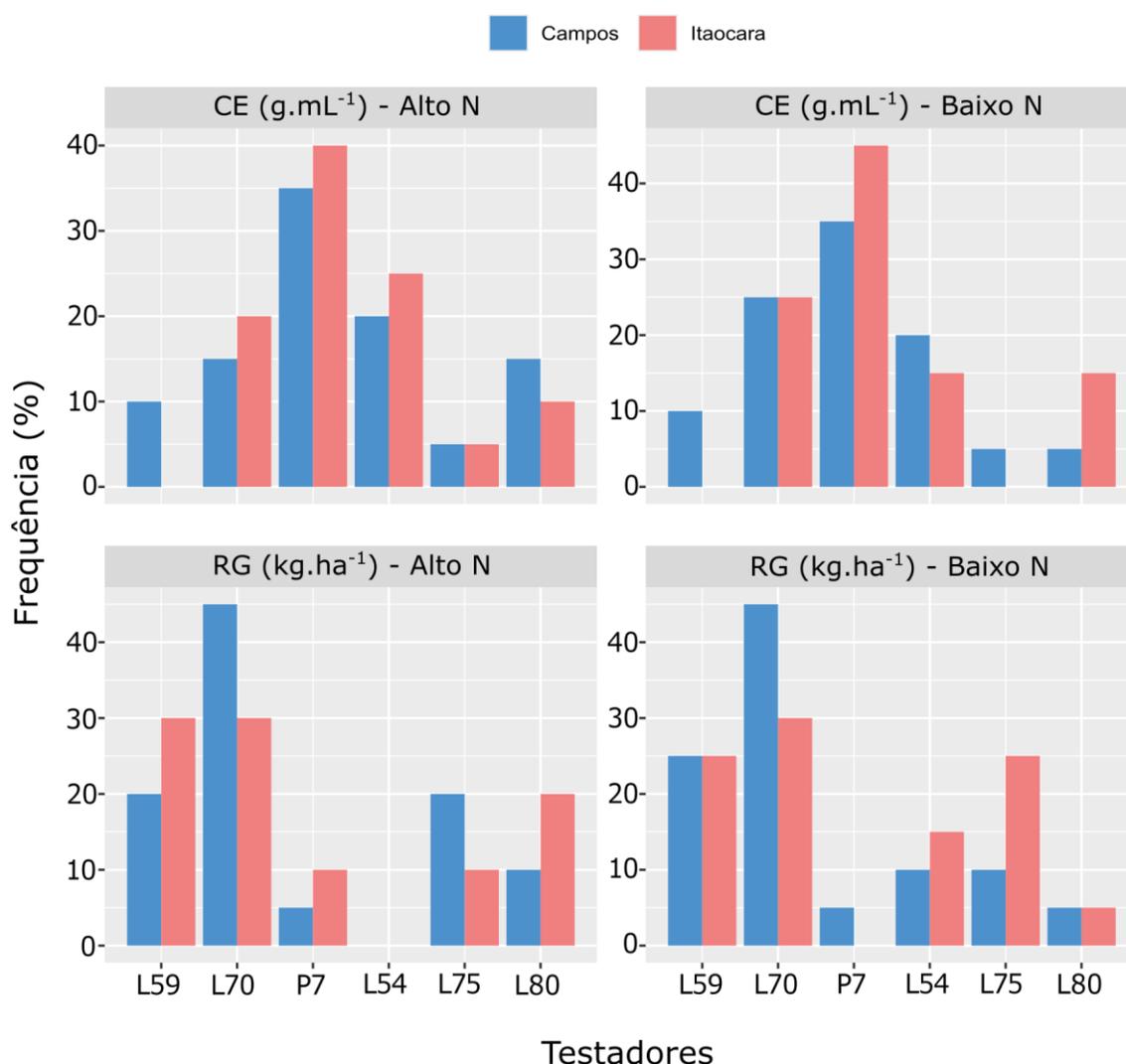


Figura 4. Frequência de participação dos testadores nas melhores combinações híbridas para rendimento de grãos (RG) e capacidade de expansão (CE) sob condições contrastantes de disponibilidade de nitrogênio no solo.

3.2.4.3. Capacidades combinatórias

A decomposição do efeito de *topcrosses* (TC) em capacidade geral de combinação das progênes e testadores (CGCI e CGCII, respectivamente) e capacidade específica de combinação (CEC), revelou diferenças significativas ($p < 0,01$) para todas as características em ambas as condições de disponibilidade de N (Tabela 8). Esses resultados evidenciam que os genitores avaliados diferem quanto a presença de alelos favoráveis, indicando que os mesmos contribuem diferentemente para os cruzamentos em que estão envolvidos. Dessa forma, torna-

se real a possibilidade de obtenção de ganhos genéticos nas principais características de importância econômica de milho-pipoca em AN e, ou BN, através da seleção dos pais superiores. Além disso, a significância de CEC é um indicativo de que as combinações híbridas apresentam performances diferenciais das esperadas somente pelos efeitos das capacidades gerais de combinação (CGCI e CGCII).

Tabela 8. Análise dialélica conjunta para rendimento de grãos (RG, kg.ha⁻¹), capacidade de expansão (CE, g.mL⁻¹) de 90 *topcrosses* de milho-pipoca avaliados em condições de alto e baixo nitrogênio (N) em Campos dos Goytacazes e Itaocara, RJ.

FV	GL	RG (kg.ha ⁻¹)		CE (g.mL ⁻¹)	
		Alto N	Baixo N	Alto N	Baixo N
Topcross (TC)	89	735.927,47**	854.235,51**	94,38**	87,92**
CGC I	14	1.354.904,07**	1.298.523,21**	365,21**	343,21**
CGC II	5	4.919.710,40**	4.483.480,80**	335,60**	311,00**
CEC	70	313.290,51**	506.146,16**	22,99**	20,93**
TC x A	89	488.742,26**	461.469,73**	7,69**	8,82**
A x CGC I	14	1.265.289,43**	1.088.932,71**	10,14**	12,43**
A x CGC II	5	548.571,40**	438.704,40*	17,80**	21,20**
A x CEC	70	329.159,31**	337.603,21**	6,47**	7,21**
Resíduo	356	118.873,29	163.467,21	1,58	1,57
SQ% CGC I		28,96	23,91	60,87	61,41
SQ% CGC II		37,56	29,49	19,98	19,87
SQ% CGC Total		66,52	53,40	80,85	81,28
SQ% CEC		33,48	46,60	19,15	18,72

** : significativo a 1 % de probabilidade pelo teste F

A combinação das significâncias das CGC das progênes e testadores e da CEC para todas as características nas duas condições de N (Tabela 8), sugerem que tanto a ação aditiva quanto a não-aditiva dos genes foram importantes na herança destas características sob alta e baixa disponibilidade de nitrogênio no solo. No entanto, observando a contribuição relativa dos efeitos de capacidade geral e específica de combinação, verificou-se que os efeitos de CGC contribuíram com uma porção maior para os efeitos genéticos totais para todas as características nos dois ambientes. Diante disso, sugere-se que a ação aditiva dos genes modulou amplamente a herança das características estudadas nos ambientes de alta e baixa disponibilidade de N no solo. A importância dos efeitos aditivos dos genes para RG em milho avaliado sob condição ótima e de estresse de N no solo vem sendo

reportada em vários estudos (Worku et al., 2008; DoVale et al., 2012; Badu-Apraku et al., 2013; Ifie et al., 2015; Annor et al., 2019; Ribeiro et al., 2020).

Tratando-se de milho-pipoca, observa-se na literatura uma carência de informações a respeito do controle genético da eficiência no uso do N. Em estudo recente, Santos et al. (2019), visando elucidar os efeitos genéticos e a herança que controla a eficiência e responsividade em milho-pipoca relataram que a ação aditiva dos genes foi mais importante que a ação não-aditiva para RG sob condições contrastantes de N no solo. Dessa forma, híbridos promissores quanto à eficiência e responsividade a esse nutriente podem ser identificados e selecionados com base na previsão dos efeitos de CGC dos genitores, sendo, pois, sintetizados a partir do cruzamento de pais com elevadas estimativas de capacidade geral de combinação (Baker, 1978). No entanto, a previsão do desempenho híbrido com base apenas nos efeitos de CGC nem sempre será suficiente, uma vez que os efeitos de CEC também foram significativos (Tabela 8). Além disso, é amplamente conhecida a importância dos efeitos não-aditivos na expressão do rendimento de grãos, principalmente em condições ideais de N (Pereira e Amaral Júnior, 2001; Betràn et al., 2003; Makumbi et al., 2011; Abdel-Moneam et al., 2014; Noëlle et al., 2017).

Em relação a capacidade de expansão, observou-se predominância dos efeitos aditivos verificada pelas maiores contribuições da soma de quadrados da CGC total em ambas as condições de disponibilidade de N no solo (AN = 80,85 e BN = 81,28) (Tabela 8). Isso indica que o híbrido apresentará um valor de CE igual ou semelhante a média dos seus genitores. Estes resultados corroboram com relatos de diversos autores que investigaram a herança dessa característica em milho-pipoca (Larish e Brewbaker, 1999; Pereira e Amaral Júnior, 2001; Cabral et al., 2016; Gerhardt et al., 2019).

Entretanto, trabalhos recentes vêm demonstrando que o efeito de dominância, embora em menor intensidade, também contribui para a expressão da CE. Oliveira et al. (2018), por meio de análise dialélica de linhagens em S₃ de milho-pipoca, observaram a influência de efeitos de dominância para a capacidade de expansão, recomendando, desta forma, a exploração de híbridos para aumento significativo na característica. Estudando a herança da capacidade de expansão em cruzamentos de milho-pipoca e milho comum do tipo dentado, Coan et al. (2019) sugeriram que esta pode ser mista, apresentando dois tipos: Uma que apresente um grande gene de ação aditiva, junto com poligenes com ação aditiva

e de dominância, e a outra, com apenas poligenes de ação aditiva e de dominância. De lima et al. (2019), objetivando compreender a herança das características de maior importância econômica em milho-pipoca, via metodologia de Hyaman, sob condições hídricas contrastantes, reportaram que os efeitos aditivos e dominância (herança mista) foram importantes para expressão da CE em ambas condições de disponibilidade de água. Santos et al. (2020), por sua vez, desenvolveram um estudo para quantificar o mérito e o controle genético de doenças foliares em milho-pipoca, e para tanto, avaliaram oito linhagens e 56 híbridos oriundos de um esquema de dialelo completo incluindo os recíprocos e detectaram a presença de componente genético de variância dominante para a capacidade de expansão.

O conhecimento da ação gênica envolvida na expressão de uma característica-alvo em uma determinada condição ambiental é importante para que seja elaborada a melhor estratégia de melhoramento para proporcionar os maiores ganhos genéticos. Dessa forma, considerando a maior influência da ação aditiva na expressão das características avaliadas nos dois níveis de N, avanços genéticos podem ser alcançados por meio de seleção durante o processo de desenvolvimento de linhagens e, ou via seleção recorrente. O sucesso de ambas as estratégias pode ser observada pela maior influência da CGC das progênies (CGC II) na expressão da CE nas duas condições N, sendo verificadas contribuições de 60,87 % e 61,41 % para AN e BN, respectivamente (Tabela 8). Esses resultados podem ser explicados uma vez que esse conjunto de linhagens foi extraído da variedade de polinização aberta UENF-14 (Amaral Junior et al., 2013), desenvolvida após cinco ciclos de seleção recorrente intrapopulacional, apresentando então, uma elevada frequência de alelos favoráveis para as principais características de interesse econômico da cultura. Além disso, durante o processo de desenvolvimento dessas linhagens, foi praticada em S₃ uma seleção para CGC, considerando RG, CE e VP (Lima et al., 2016; Pena et al., 2016), ação esta que pode ter contribuído para uma maior expressão da variância aditiva para essas características.

Interações significativas entre CGC I x locais, CGC II x locais e CEC x locais, sugere que os efeitos de CGC associados aos pais e os efeitos de CEC de seus híbridos correspondentes não foram consistentes entre os diferentes locais nas duas condições de manejo de N (Tabela 6). Resultados semelhantes foram obtidos em pesquisas relacionadas a diversos estresses abióticos, tais como:

nitrogênio (Badu-Apraku et al., 2016; Annor et al., 2019), fósforo (Gerhardt et al., 2019), seca (Derera et al., 2008) e acidez do solo (Mutimaamba et al., 2020).

Considerando a significância das interações supracitadas, Makumbi et al. (2011) apontaram para a necessidade de selecionar pais específicos dentro de ambientes, como uma alternativa para maximizar o desenvolvimento de híbridos. Entretanto, identificar genitores que contribuem de maneira estável ao longo dos diferentes ambientes para obtenção de híbridos superiores, surge como uma estratégia viável, uma vez que esses genótipos tenderão a apresentar um efeito menos pronunciado da interação genótipo x ambiente, otimizando o processo de desenvolvimento de sementes para uma determinada macrorregião.

Nesse intuito, para RG verificou-se que as linhagens L682, L684, L686 e L688 em AN (Tabela 9) e as linhagens L684, L685 e L686 em BN (Tabela 10) foram os genitores do grupo I que mais se destacaram, pois apresentaram maior consistência em suas estimativas de \hat{g}_i , uma vez que estas exibiram valores positivos e relativamente elevados nos dois locais de avaliação. Analisando as duas condições de N conjuntamente, constatou-se que apenas as linhagens L684 e L686 mostraram estimativas de CGC positivas para condições ótimas e de estresse de N nos dois locais (Tabela 9 e 10). Esses resultados indicam que essas duas linhagens apresentam maior frequência de alelos favoráveis para eficiência e responsividade no uso do N, sendo então, promissoras para serem utilizadas como potenciais genitores no programa de melhoramento de milho-pipoca visando obtenção de híbridos superiores e estáveis quanto EUN.

A respeito das estimativas de CGC do grupo II, os resultados revelam que dos testadores selecionados como eficientes e responsivos (ER) (L59, L70 e P7) (Santos et al., 2017; Santos et al., 2019), apenas L59 e L70 sobressaíram nos dois locais de avaliação e nas duas condições de N, por exibirem estimativas de \hat{g}_i elevadas e positivas, confirmando a superioridade pré-definida desses genótipos em contribuir com alelos favoráveis para incrementar a eficiência e responsividade no uso do nitrogênio (Tabela 9 e 10). Já, em relação aos testadores ineficientes e não responsivos (INR) (L54, L75 e L80), observou-se que o genitor L54, em ambas condições de N e L80 em BN apresentaram elevadas e negativas estimativas de \hat{g}_i como era esperado ocorrer (Tabela 9 e 10). O testador L75 embora tenha exibido CGC positiva com base na média dos locais em BN, essa estimativa é de baixa

magnitude, e conseqüentemente sua contribuição para incremento da média dessa característica é pouca.

Deve-se salientar que o testador P7 (ER) no AN e BN e L80 (INR) em AN, mostraram resultados contraditórios com os relatados por Santos et al. (2019), os quais verificaram para esses genitores elevadas estimativas de CGC positivas e negativas, respectivamente. Isso pode ser explicado pelo fato de a CGC de uma linhagem não ser uma propriedade fixa desta, dependendo sempre da composição genética do grupo de linhagens ou da população com a qual essa linhagem tenha sido inter cruzada (Kempthorne e Curnow, 1961).

Com relação ao CE, observou-se que apesar da significância dos efeitos da interação CGC x locais nas duas condições de N revelada na análise de variância conjunta (Tabela 7), esta, parece ter sido provocado predominantemente pela interação do tipo simples, uma vez que houve uma maior consistência quanto as estimativas de CGC das progênies e testadores nos locais de avaliação. Observou-se que das 15 progênies avaliadas, nove apresentaram estimativas de \hat{g}_i positivas em ambos locais e disponibilidades de N, destacando as linhagens L681, L690, L688, L689 e L694 por exibirem elevados valores de CGC (Tabela 7 e 8). No que diz respeito aos testadores (CGC II), as estimativas mais elevadas de \hat{g}_i nos dois locais foram exibidas por P7, L70 e L54.

Analisando conjuntamente as características RG e CE, os resultados revelaram que, as progênies S₇ que apresentaram estimativas de \hat{g}_i positivas para RG nas duas condições de N e nos dois locais (L684 e L686), demonstraram estimativas negativas para CE (Tabelas 9 e 10). Esse resultado deixa nítido o grande problema que é historicamente estabelecido na cultura: a existência da correlação negativa entre as características RG e CE (Rangel et al., 2011; Cabral et al., 2016), e, portanto, a necessidade de melhoria contínua das linhagens para essas duas características, a fim de obter híbridos de milho-pipoca eficientes.

Tabela 9. Estimativas dos efeitos médios da capacidade geral de combinação (\hat{g}_i) das progênies S₇ e testadores de milho-pipoca para rendimento de grãos (RG) e capacidade de expansão (CE) avaliados em condição de alto N.

Progênies S ₇	RG (kg.ha ⁻¹)			CE (g.mL ⁻¹)		
	Campos	Itaocara	Média	Campos	Itaocara	Média
L681	-207,21	-334,75	-270,98	4,50	4,64	4,57
L682	338,43	256,71	297,57	-5,38	-3,74	-4,56
L683	-173,81	70,58	-51,62	0,52	0,56	0,54
L684	68,79	219,53	144,16	-1,00	-2,00	-1,50
L685	55,26	-273,42	-109,08	0,53	0,81	0,67
L686	290,45	129,87	210,16	-7,05	-5,43	-6,24
L688	310,45	113,94	212,20	3,48	3,38	3,43
L689	-8,02	277,99	134,99	4,02	1,95	2,99
L690	-586,73	100,29	-243,22	3,60	3,34	3,47
L691	165,53	-302,55	-68,51	0,75	1,95	1,35
L692	-61,35	-222,24	-141,80	-3,12	-2,72	-2,92
L693	-173,72	-508,03	-340,87	-1,51	-2,79	-2,15
L694	-297,81	548,59	125,39	2,54	1,84	2,19
L695	163,37	-14,20	74,58	-2,00	-2,78	-2,39
L696	116,37	-62,32	27,03	0,13	0,98	0,55
Testadores						
L59	109,88	101,29	105,59	-1,211	-2,457	-1,83
L70	367,74	249,96	308,85	0,465	1,58	1,02
P7	-157,82	-181,23	-169,52	2,81	2,2	2,52
L54	-372,61	-321,47	-347,04	0,554	0,372	0,46
L75	59,46	-114,76	-27,65	-2,731	-2,699	-2,72
L80	-6,65	266,20	129,78	0,103	0,983	0,54

Tabela 10. Estimativas dos efeitos médios da capacidade geral de combinação (\hat{g}_i) das progênies S₇ e testadores de milho-pipoca para rendimento de grãos (RG) e capacidade de expansão (CE) e avaliados em condição de baixo N.

Progênies S ₇	RG (kg.ha ⁻¹)			CE (g.mL ⁻¹)		
	Campos	Itaocara	Média	Campos	Itaocara	Média
L681	-104,16	-447,05	-275,60	4,44	4,37	4,40
L682	189,65	-392,44	-101,40	-4,83	-3,23	-4,03
L683	-291,31	247,75	-21,78	0,05	0,38	0,22
L684	223,02	225,01	224,02	-1,54	-2,11	-1,82
L685	161,93	147,88	154,91	0,51	0,93	0,72
L686	406,74	133,27	270,00	-6,98	-4,94	-5,96
L688	442,11	-46,82	197,64	3,92	3,27	3,59
L689	-64,67	140,05	37,69	3,66	1,70	2,68
L690	-248,75	-384,94	-316,85	4,23	3,11	3,67
L691	-175,04	-276,92	-225,98	0,89	1,98	1,43
L692	-178,01	-183,63	-180,82	-3,76	-2,50	-3,13
L693	-123,04	244,33	60,64	-1,50	-2,55	-2,02
L694	-135,67	453,89	159,11	2,31	1,19	1,75
L695	-65,51	-102,57	-84,04	-1,84	-2,76	-2,30
L696	-37,29	242,17	102,44	0,45	1,15	0,80
Testadores						
L59	187,76	134,09	160,92	-1,14	-2,60	-1,87
L70	436,06	259,77	347,91	0,75	1,63	1,19
P7	-266,01	-192,63	-229,32	2,61	2,05	2,33
L54	-218,79	-38,43	-128,61	0,60	0,30	0,45
L75	-21,79	78,87	28,54	-2,71	-2,41	-2,56
L80	-117,23	-241,66	-179,44	-0,10	1,03	0,46

Entretanto, ao observar a performance do conjunto de progênies entre os ambientes nas duas condições de N, verifica-se que L688, L689, L694 e L696, embora não tenham exibido estimativas de \hat{g}_i consistente para RG, apresentaram valores médios de CGC positivos para essas características simultaneamente, e

portanto, não devem ser totalmente desconsideradas do programa de melhoramento de milho-pipoca (Tabela 9 e 10). Dentre os testadores, verificou-se que apenas L70 apresentou estimativas de \hat{g}_i favoráveis para essas duas características simultaneamente em todas as condições de avaliação (Tabela 9 e 10). Assim, esses genitores despontam como promissores para serem incluídos em blocos de cruzamentos visando a obtenção de híbridos superiores para eficiência e responsividade no uso do nitrogênio e capacidade de expansão.

A estimativas de \hat{S}_{ij} revelam as interações específicas entre os genitores envolvidos nos cruzamentos, sendo explicadas pelos efeitos de complementação alélica dos pais (ação de dominância) e o efeito das interações entre os alelos dos diferentes *loci* envolvidos na expressão da característica (epistasia). De acordo com Cruz et al. (2014), altos valores de CEC, independente do sinal, indica que houve um desvio na performance da combinação híbrida do que seria esperado com base na CGC dos pais.

Considerando obter ganhos genéticos nas duas características de maior importância econômica para o milho-pipoca – RG e CE – as melhores combinações híbridas são aquelas que apresentem estimativas de \hat{S}_{ij} elevadas e positivas. Nesse sentido, sob condições AN observou-se 45 estimativas de CEC positivas para RG em Campos dos Goytacazes, as quais variaram de -540,00 kg.ha⁻¹ (L691xL80) a 616,92 kg.ha⁻¹ (L691xP7). Verificou-se ainda, que o testador L75 seguido de L54 e L80 apresentaram o maior número de \hat{S}_{ij} positivas, com dez, oito e oito estimativas, respectivamente (Tabela suplementar 3). Ao analisar essa mesma condição de N em Itaocara, constatou-se 48 estimativas de \hat{S}_{ij} positivas, oscilando de -672,10 kg.ha⁻¹ (L684xL59) a 631,80 kg.ha⁻¹ (L691x L59), sendo os testadores L59, L75 e P7 os que exibiram o maior número de combinações híbridas com estimativas de CEC positivas com dez, nove e oito estimativas, respectivamente (Tabela suplementar 3).

Em relação a CE em AN, constatou-se que das 90 combinações híbridas, 44 apresentaram estimativas de CEC positivas em Campos dos Goytacazes, sendo observada uma variação nessas estimativas de -4,22 g.mL⁻¹ (L695xL54) a 4,19 g.mL⁻¹ (L694xL70). Os testadores que mostraram maior quantidade de \hat{S}_{ij} positivas foram P7 e L59 com dez e oito estimativas, respectivamente (Tabela suplementar 3). Em Itaocara, notou-se que 50 combinações híbridas exibiram estimativas de \hat{S}_{ij} positivas, variando de -7,96 g.mL⁻¹ (L684xP7) a 5,66 g.mL⁻¹ (L684xL54). Das 15

combinações possíveis para cada testador, P7, L59 e L54 destacaram-se por mostrarem dez, nove e nove, respectivamente, estimativas positivas de CEC (Tabela suplementar 3).

Tabela 11. Classificação dos 20 *topcrosses* de melhores estimativas de capacidade específica de combinação (\hat{S}_{ij}) entre os 90 híbridos de milho-pipoca avaliados para rendimento de grãos (RG, kg.ha⁻¹), capacidade de expansão (CE, g.mL⁻¹) sob condições de alta disponibilidade de nitrogênio no solo.

Rank	RG (kg.ha ⁻¹)				CE (g.mL ⁻¹)			
	Campos		Itaocara		Campos		Itaocara	
	Híbrido	CEC	Híbrido	CEC	Híbrido	CEC	Híbrido	CEC
1	L691xP7	616,92	L691xL59 [†]	631,80	L694xL70 [†]	4,19	L684xL54 [†]	5,66
2	L686xL80 [†]	467,64	L685xP7	624,14	L691xL75	3,30	L692xL54	4,02
3	L689xL59 [†]	466,54	L692xL70 [†]	617,58	L684xL75	3,24	L684xL75	3,47
4	L692xL80	371,18	L693xL75	602,34	L684xL54	2,57	L691xL75	3,46
5	L692xL75 [†]	352,39	L694xL80 [†]	571,38	L688xP7 [†]	2,54	L696xP7 [†]	3,08
6	L694xL80	323,67	L684xL70 [†]	464,50	L688xL54 [†]	2,41	L686xL59	3,00
7	L682xL59 [†]	277,76	L684xL75 [†]	455,02	L681xL75 [†]	2,40	L681xL75 [†]	2,83
8	L688xL80 [†]	260,93	L688xL80 [†]	454,40	L686xL59	2,33	L696xL54 [†]	2,67
9	L683xL54	248,25	L683xL54	448,70	L692xL54	2,26	L690xL59	2,64
10	L696xL70 [†]	237,97	L693xL80	443,90	L695xL70	2,20	L683xL59	2,33
11	L686xL75	234,41	L696xL75	441,21	L696xP7 [†]	2,12	L690xL80 [†]	2,16
12	L693xL59	224,23	L695xL54	434,36	L686xL80	2,12	L682xL59	2,06
13	L693xL75	189,41	L681xL54	410,51	L696xL75	1,98	L694xL80 [†]	2,00
14	L682xL75 [†]	186,96	L690xL59 [†]	390,81	L683xP7 [†]	1,96	L691xL70 [†]	1,99
15	L681xL54	186,37	L686xP7	388,46	L683xL70	1,90	L683xP7 [†]	1,84
16	L684xP7	179,70	L689xP7 [†]	385,10	L690xL80 [†]	1,69	L695xL70	1,83
17	L688xL70 [†]	176,51	L683xL70 [†]	359,07	L696xL54	1,55	L689xL54 [†]	1,83
18	L695xL80	172,55	L684xL80 [†]	356,64	L694xL80 [†]	1,45	L686xL70	1,79
19	L695xP7	163,74	L690xL75	332,62	L688xL59	1,36	L685xL70 [†]	1,74
20	L690xL54	163,57	L691xP7 [#]	315,86	L682xL80	1,17	L694xL75	1,72

[†] *Topcrosses* que compuseram o grupo dos top 20 para as médias fenotípicas em AN.

Sob condição de BN verificou-se que das 90 combinações híbridas, 41 estimativas de CEC positivas para RG em Campos dos Goytacazes, as quais oscilaram de $-736,8,00 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ (L690xL75) a $802,44 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ (L690x54). Verificou-se ainda, que os testadores L75 e L59 apresentaram o maior número de \hat{S}_{ij} positivas, com oito estimativas cada (Tabela suplementar 4). Já em Itaocara, constatou-se 44 estimativas de \hat{S}_{ij} positivas, variando de $-818,02 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ (L684xL80) a $897,38 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ (L693x L80). Os testadores L70, L75 e L80 exibiram maior quantidade de estimativas de CEC positiva, com oito estimativas cada um (Tabela suplementar 4).

No que diz respeito a CE sob condição BN, 44 combinações híbridas que apresentaram estimativas de CEC positivas em Campos dos Goytacazes, sendo observada uma variação nessas estimativas de $-4,41 \text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$ (L684xL70) a $4,58 \text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$ (L688xL54) (Tabela suplementar 4). Em Itaocara, notou-se que 50 combinações híbridas exibiram estimativas de \hat{S}_{ij} positivas, variando de $-6,97 \text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$ (L684xP7) a $5,65 \text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$ (L684xL54). Das 15 combinações possíveis para cada testador, P7, L59 e L54 destacaram-se por mostrarem dez, nove e nove, respectivamente, estimativas positivas de CEC (Tabela suplementar X). O testador P7 destacou-se por apresentar o maior *quantum* de \hat{S}_{ij} positivas em ambos locais de avaliação.

Traçando um paralelo entre os grupos de maiores estimativas de CEC sob ambas condições de disponibilidade de N (Tabelas 11 e 12) e de maiores médias (Tabelas 6 e 7), verificou-se que para RG sob condição AN, aproximadamente 50 % das combinações híbridas de maiores estimativas positivas de \hat{S}_{ij} , compuseram o grupo de *topcrosses* de maiores médias fenotípicas, enquanto, sob condição limitante de N, esse comportamento foi observado em cerca de 60 % dos híbridos. Em relação a CE, constatou-se que sob condição ideal de disponibilidade de N, 50 % dos cruzamentos de elevada \hat{S}_{ij} , estavam alocados no grupo de maior média, já sob ambiente estressante, esse padrão foi observado em apenas 25 % das combinações híbridas.

Tabela 12. Classificação dos 20 *topcrosses* de melhores estimativas de capacidade específica de combinação (\hat{S}_{ij}) entre os 90 híbridos de milho-pipoca avaliados para rendimento de grãos (RG, kg.ha⁻¹), capacidade de expansão (CE, g.mL⁻¹) sob condições de baixa disponibilidade de nitrogênio no solo.

Rank	RG (kg.ha ⁻¹)				CE (g.mL ⁻¹)			
	Campos		Itaocara		Campos		Itaocara	
	Híbrido	CEC	Híbrido	CEC	Híbrido	CEC	Híbrido	CEC
1	L690xL54	802,44	L693xL80	897,38	L688xL54 [†]	4,58	L684xL54 [†]	5,65
2	L695xL54 [†]	718,39	L696xL70 [†]	649,93	L694xL70 [†]	4,15	L691xL75	3,50
3	L682xL75 [†]	686,93	L683xL70 [†]	640,79	L691xL75	3,36	L684xL75	3,17
4	L694xL80	569,54	L695xL54 [†]	633,94	L692xL54	3,04	L696xP7 [†]	3,14
5	L683xL80	569,34	L694xL70 [†]	566,03	L686xL80	2,61	L692xL54	2,96
6	L690xL80	495,23	L688xL54 [†]	552,97	L696xP7 [†]	2,47	L688xL59	2,33
7	L684xP7 [†]	430,83	L685xL75 [†]	529,15	L684xL54	2,41	L683xP7 [†]	2,31
8	L681xL70 [†]	426,33	L690xP7	517,08	L682xL70	2,37	L695xL59	2,28
9	L688xL80 [†]	369,94	L684xL75 [†]	472,66	L695xL59	2,27	L693xL59	2,28
10	L696xL75	352,04	L682xL75	453,36	L681xL75 [†]	2,18	L690xL59	2,20
11	L689xP7	349,05	L686xL80	452,44	L696xL75	2,02	L681xL59	1,95
12	L694xL70 [†]	331,41	L681xP7	451,07	L684xL75	2,00	L695xL70	1,92
13	L685xL59 [†]	324,64	L685xL59 [†]	435,71	L683xL70	1,97	L690xL80 [†]	1,87
14	L684xL59 [†]	314,12	L696xL59 [†]	427,98	L688xP7 [†]	1,67	L696xL54	1,83
15	L692xL75	310,89	L695xL75 [†]	413,86	L690xL80 [†]	1,62	L686xL70	1,82
16	L686xL59 [†]	293,63	L684xL59 [†]	410,57	L693xL80	1,58	L690xL75	1,81
17	L685xL75 [†]	285,90	L691xL70 [†]	397,49	L690xL75	1,53	L684xL80	1,80
18	L692xL70 [†]	281,80	L686xL59 [†]	367,78	L689xL75	1,41	L694xL75	1,73
19	L685xL54	264,03	L690xL80	365,58	L685xL59	1,35	L683xL59	1,68
20	L695xL59 [†]	249,14	L695xP7	334,81	L695xL70	1,33	L685xL70 [†]	1,63

[†] *Topcrosses* que compuseram o grupo dos top20 para as médias fenotípicas em BN.

Vale destacar que todos os cruzamentos que exibiram elevadas estimativas de CEC e foram alocados entre os vinte melhores híbridos para RG e CE em ambas condições de N, continuam em suas composições pelo menos um genitor com estimativa de \hat{g}_i elevada e positiva, como, por exemplo, as combinações L684xL70 L694xL70. Esses resultados demonstram a importância dos efeitos aditivos dos alelos envolvidos na expressão da eficiência e responsividade no uso do nitrogênio

e da capacidade de expansão e que para o desenvolvimento de híbridos eficientes no uso do N, os blocos de cruzamentos devem ser compostos por genitores distantes geneticamente e que demonstrem elevadas estimativas de CGC. Assim, em estudos futuros, a identificação de linhagens de outras genealogias que expressem CEC favoráveis com as linhagens L684, L686 L688, L689, L694 e L696 deve contribuir para a obtenção de híbridos superiores para EUN e capacidade de expansão, simultaneamente.

3.2.5. CONCLUSÃO

A utilização de testadores superiores quanto eficiência no uso do nitrogênio e que possuam elevada capacidade geral de combinação em múltiplos ambientes, proporcionou a obtenção de híbridos eficientes e responsivos a esse nutriente.

Ambos os efeitos aditivos e não aditivos foram importantes para a expressão do rendimento de grãos e capacidade de expansão em condições de alta e baixa disponibilidade de nitrogênio.

As linhagens L684 e L686 exibiram efeitos de alta capacidade geral de combinação para rendimento de grãos nas condições de disponibilidade de nitrogênio, sendo candidatas a serem incluídas em blocos de cruzamentos visando o desenvolvimento de híbridos e /ou população de melhoramento eficientes no uso do nitrogênio.

Os híbridos L684xL70 e L694xL70 apresentaram desempenho superior para produtividade de grãos e capacidade de expansão nas duas condições de disponibilidade de nitrogênio e, portanto, podem ser opções de cultivo para produtores que possuem ou não alto nível tecnológico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbasi, M.K., Tahir, M.M., and Rahim, N. (2013) Effect of N fertilizer source and timing on yield and N use efficiency of rainfed maize (*Zea mays* L.) in Kashmir–Pakistan. *Geoderma* 195:87–93
- Abdel-Moneam M.A., Sultan, M.S., Salama, S.M.G., El Oraby, A.M. (2014) Evaluation of combining ability and heterosis for yield and its components traits of five maize inbreds under normal and stress nitrogen fertilization. *Asian Journal Crop Science*. 6:142–149.
- Abel, B.C and Pollack, L.M. (1991) Rank comparisons of unadapted maize populations by testers and per se evaluation. *Crop Science*. 31:650–654.
- Agneessens, L., De Waele, J and De Neve, S. (2014). Review of alternative management options of vegetable crop residues to reduce nitrate leaching in intensive vegetable rotations. *Agronomy* 4:529–55.
- Allison, J.C.S. and Curnow, R.N.(1966) On the Choice of Tester Parent for the Breeding of Synthetic Varieties of Maize (*Zea mays* L.). *Crop Science*, 6: 541.
- Almeida, R.N., Vivas, M., Santos Júnior, D.R., Saluci, J.C.F., Carlos, M.C., Saltires, J.S., Amaral Júnior, A.T., Scapim, C.A. (2021) Combining abilities analysis for ear rot resistance in popcorn hybrids development. *Ceres*, 68:61-70.

- Almeida, V.C., Viana, J.M.S., DeOliveira, H.M., Risso, L.A., Ribeiro, A.F.S., DeLima, R.O (2018) Genetic diversity and path analysis for nitrogen use efficiency of tropical popcorn (*Zea mays* ssp. *everta*) inbred lines in adult stage. *Plant Breeding*, 137:839–847.
- Amaral Junior, 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.
- Annor, B., Badu-Apraku, B., Nyadanu, D., Akromah, R and Fakorede, M.A.B (2020) Identifying heterotic groups and testers for hybrid development in early maturing yellow maize (*Zea mays*) for sub-Saharan Africa. *Plant Breeding*, 139:708-716.
- Annor, B., Badu-Apraku, B., Nyadanu, D., Akromah, R and Fakorede, M.A.B. (2019) Testcross performance and combining ability of early maturing maize inbreds under multiple-stress environments. *Science. Reports*, 9:1–11.
- Asibi, A.E., Chai, Q., and Coulter, J.A. (2019) Mechanisms of nitrogen use in maize. *Agronomy-basel*, 9:775.
- Aslam, M., Sohail, Q., Maqbool, M.A., Zaman, Q.U. and Bano, S. (2015). Combining ability analysis and genetic inheritance of salt tolerance indicators in maize (*Zea mays*) following diallel mating design. *International Journal. Agriculture Biology*, 17: 523–530.
- Babu, R., Nair, S.K., Kumar, A., Rao, H.S., Verma, P., Gahalain, A., Gupta, H.S. (2006) Mapping QTLs for popping ability in a popcorn x flint corn cross. *Theoretical and Applied Genetics*, 112:1392-1399.
- Badu-Apraku, B., and Fakorede, M.A.B. (2017) *Advances in Genetic Enhancement of Early and Extra-Early Maize for Sub-Saharan Africa*,1-600.
- Badu-Apraku, B., Fakorede, M.A.B., Talabi, A.O., Oyekunle, M., Akaogu, I.C., Akinwale, R.O., Annor, B., Melaku, G., Fasanmade, Y and Aderounmu, M. (2016) Gene action and heterotic groups of early white quality protein maize inbreds under multiple stress environments. *Crop Science*, 56:183–199.

- Badu-Apraku, B., Oyekunle, M., Fakorede, M.A.B., Vroh, I., Akinwale, R.O., Aderounmu, M. (2013) Combining ability, heterotic patterns and genetic diversity of extra-early yellow inbreds under contrasting environments. *Euphytica*, 192:413–433.
- 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.
- Bänziger, M., Edmeades, G.O., Beck, D., Bellon, M. (2000). Breeding for drought and nitrogen stress tolerance in maize: From theory to practice. Mexico: Cimmyt. 68p.
- Bello O.B. (2017) Diallelic analysis of maize streak virus resistance in quality protein maize topcrosses. *Euphytica*, 213: 270–279.
- Bello, O.B., Lawal, M., Mahamood, J., Kioko, J.I., Agbolade, J.O., Suleiman, Y.A., Ige, S.A., Segun, A.M., Azeez, H. A. (2017). Genetic of resistance to ear rot causal agent (*Fusarium moniliforme*) in quality protein maize (QPM) using linex tester analysis. *Iranian Journal of Genetics and Plant Breeding*, 6:38-47.
- Betrán, F.J., Beck, D., Bänziger, M and Edmeades, G.O. (2003) Genetic analysis of inbred and hybrid grain yield under stress and nonstress environments in tropical maize. *Crop Science*, 43:807–817.
- Bolaños, J. and Edmeades, G.O. (1996) The importance of the anthesis - silking interval in breeding for drought tolerance in tropical maize. *Field Crops Research*, 48:65–80.
- Bombonato, A.L., Carvalho, H.F., Rocha, D.S., Sawazaki, E., Barros, V.L.N.P., Paterniani, M.E.A.G.Z. (2020) Selection Index and Genetic Parameters in Tropical Popcorn Hybrids. *Tropical Plant Biology*. 13:382–388.
- Brunson, A.M. (1931). Popcorn selection for added popping expansion would pay large growers. *Yearbook of Agriculture*, 16:441-443.
- Buckler, E.S., Stevens, N.M. (2005) Maize Origins, Domestication, and Selection. In: *Genetics and origins of crops*. Chapter IV,67-90.

- 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.
- Carvalho, R. P.; Von Pinho, R. G.; Davide, L. M. C. (2012) Eficiência de cultivares de milho na absorção e uso de nitrogênio em ambiente de casa de vegetação. *Semina*, 33:2125-2136.
- Chun, L., Mi, G., Li, J., Chen, F., Zhang, F. (2005) Genetic analysis of maize root characteristics in response to low nitrogen stress. *Plant and Soil*, 276:369-382.
- Ciampitti, I.A and Vyn, T.J. (2012) Physiological perspectives of changes over time in maize yield dependency on nitrogen uptake and associated nitrogen efficiencies: A review. *Field Crops Research*, 133:48–67.
- Coan, M.M.D., Pinto, R.J.B., Kuki, M.C., Amaral Júnior, A.T., Figueiredo, A.S.T., Scapim, C.A., Warburton, M. (2019) Inheritance Study for Popping Expansion in Popcorn vs. Flint Corn Genotypes. *Agronomy. Journal*, 111:2174.
- 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.
- Cruz, C. D., Venconsky, R. (1989) Comparação de alguns métodos de análise dialélica, *Revista Brasileira de Genética*, 12:425-436.
- Cruz, C.D. (2013) GENES - a software package for analysis in experimental statistics and quantitative genetics. *Acta Scientiarum*, 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.
- 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. (2004) Correlações entre caracteres

- agronômicos em dois ciclos de seleção recorrente em milho-pipoca. *Ciência Rural*, 34:1389-1394.
- Dass, A., Jat, S., and Rana, K.S. (2015) Resource conserving techniques for improving nitrogen use efficiency. In 'Nutrient use efficiency: from basics to advances'. (Eds A Rakshit, HB Singh, A Sen) pp. 45–58.
- Davis, R.L. (1927) Report of the plant breeder, Annual Report Agricultural Experiment Station University of Porto Rico, Rio Piedras, p.14-15.
- De Lima, V.J., Amaral Júnior, A.T., Kamphorst, S.H., Bispo, R.B., Leite, J., Oliveira S.T. (2019). Combined dominance and additive gene effects in trait inheritance of drought-stressed and full irrigated popcorn. *Agronomy-basel*, 9:782.
- De Lima, V. J., Amaral Júnior, A.T, Kamphorst, S. H., Pena, G. F., Leite, J. T., Schmitt, K. F., Vittorazzi, C., and Mora, F. (2016). Combining ability of S₃ progenies for key agronomic traits in popcorn: comparison of testers in top-crosses. *Genetics and molecular research*, 15(4).
- DeLima, R. O. (2010). Herança e correlação de caracteres de raiz e eficiência de uso do nitrogênio em milho. Viçosa: UFV. 38p. (Dissertação de Mestrado).
- DeLima, R.; Borém, A. Melhoria de Milho. 1 ed. Viçosa, MG: UFV, 2018.
- Derera, J., Tongoona, P., Vivek, B.S and Laing, M.D. (2007). Gene action controlling grain yield and secondary traits in southern African maize hybrids under drought and non-drought environments. *Euphytica*, 162:411– 422.
- Dofing, S.M., D`Croz-Mason, N., Thomas-Compton, M.A. (1991) Inheritance o expansion volume and yield in two popcorn x dent corn crosses. *Crop Science*, 31:715–718.
- Dofing, S.M., D`Croz-Mason, N., Buck, J.S. (1991) Inheritance of expansion volume and yield in two popcorn x dent corn crosses. *Crop Science*, 31:715-718.
- DoVale, J.C., Fritsche-Neto, R., Bermudez, F., Miranda, G.V. (2012) Efeitos gênicos de caracteres associados à eficiência no uso de nitrogênio em milho. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 47:385–392.

- DoVale, J.C., Maia, C., Fritsche-Neto, R., Miranda, G.V., Cavatte, P.C. (2013) Genetic responses of traits relationship to components of nitrogen and phosphorus use efficiency in maize. *Acta Scientiarum Agronomy* 35: 31-38.
- Erisman, J., Sutton, M., Galloway, J., Klimont, Z., Winiwaerwe, W. (2008) How a century of ammonia synthesis changed the world. *Nature Geosci*, 1:636–639.
- Ertiro, B. T., Olsen, M., Das, B., Gowda, M., Labuschagne, M. (2020) Efficiency of indirect selection for grain yield in maize (*Zea mays* L.) under low nitrogen conditions through secondary traits under low nitrogen and grain yield under optimum conditions. *Euphytica*, 216:1-12.
- Ertiro, B.T., Beyene, Y., Das, B., Mugo, S., Olsen, M., Oikeh, S., Juma, C., Maryke, L., Prasanna, B.M. (2017) Combining ability and testcross performance of drought-tolerant maize inbred lines under stress and nonstress environments in Kenya. *Plant Breeding*, 136:197-205.
- Erwin, A.T. (1949) The origin and history of popcorn, *Zea mays* L. var. *in durate* (Sturt) Bailey. *Agronomy Journal*, 41: 53-56.
- Fageria, N.D., Kluthcouski, J. (1980) *Metodologia para avaliação de cultivares de arroz e feijão para condições adversas de solo*. Brasília, EMBRAPA/CNPAP: 22p.
- Falconer, D.S., Mackay, T.F.C (1996) *Introduction to quantitative genetics*, 4th edn. Harlow, Longmans Green.
- FAO. 2019. World Fertilizer Trends and Outlook to 2020. Disponível em: <http://www.fao.org/3/a-i6895e.pdf>.
- Fato, P., Derera, J., Tongoona, P., Makanda, I., Sibiyi, J. (2012) Heterotic orientation of tropical maize inbred lines towards populations ZM523 and Suwan-1 under downy mildew infestation. *Euphytica*, 187:381–392.
- Federer, W.T and Sprague, G.F. (1947) A comparison of variance components in corn yield trials. I. Error, tester × line, and line components in top-cross experiments. *Journal of the American Society Agronomy*, 39:453–63.

- Ferreira E.A., Paterniani M.E.A.G.Z., Duarte, A.P., Gallo, P.B. (2009). Desempenho de híbridos top crosses de linhagens S3 de milho em três locais do estado de São Paulo. *Bragantia*, 68:319-327.
- Fornasieri Filho, D (2007). Manual da cultura do milho. Jaboticabal: Funep, 576 p.
- Freitas Júnior, S.P., Amaral Junior, 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.
- Freitas, I.L.J., Amaral Junior, A.T., Viana, A. P., Pena, G. F., Cabral, P. S., Vittorazzi, C., Silva, T.R.C. (2013) Ganho genético avaliado com índices de seleção e com REML/BLUP. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 48:1464- 1471.
- Fritsche Neto, R., Vieira, R. A., Scapim, C. A., Miranda, G. V., Rezende L. M. (2012). Updating the ranking of the coefficients of variation from maize experiments. *Acta Scientiarum Agronomy*, 34:99-101.
- Fritsche-Neto R, Borém A. (2011) Melhoramento de plantas para condições de estresses abióticos. Visconde do Rio Branco: Suprema; 250 p.
- 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.
- Galić, V., Šimić, D., Franić, M., Brkić, A., Jambrović, A., Brkić, J., Ledenčan, T. (2019) Analysis of Fusarium ear rot and fumonisin contamination in testcrosses of a maize biparental population. *Crop Breeding Applied Biotechnology*, 19:40–46.
- Gallais, A., Coque, M. (2005) Genetic variation and selection for nitrogen use efficiency in maize: a synthesis. *Maydica*: 50, 531.
- Gallais, A., Hirel, B. (2004) An approach to the genetics of nitrogen use efficiency in maize. *Journal of Experimental Botany*, 55:295-306.
- Garnett, T., Conn, V., Kaiser, B.N. (2009) Root based approaches to improving nitrogen use efficiency in plant. *Cell and Environment*, 32:1272-1283.

- Gaut, B.S., D'ennequin, M.L.T., Peek, A.S., Sawkins, M.C. (2000) Maize as model for the evolution of plant nuclear genomes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 97:7008-7015.
- Gerhardt, I.F.S., Amaral Junior, A.T., Pena, G.F., Guimarães, L.J.M., Lima, V.J., Vivas, M., Kamphorst, S.H. (2019). Genetic effects on the efficiency and responsiveness to phosphorus use in popcorn as estimated by diallel analysis. *PLoS one*, 14, e0216980.
- Gonçalves, A., Simões, L., Freitas Júnior, S. D. P., Amaral Júnior, A. T., Scapim, C. A.; Rodrigues, R., Marinho, C. D., Pagliosa, E. S. (2014) Estimating combining ability in popcorn lines using multivariate analysis. *Chilean journal of agricultural research*, 74 :10-15.
- Goodman, M.M. (1980) História e Origem do Milho. In: Paterniani, E. (Ed.). *Melhoramento e produção do milho no Brasil*. Campinas, Fundação Cargill, p. 1-31.
- Goodman, M.M., Smith, J.S.C. (1987) Botânica In: Paterniani, E., Viegas, G. P. (Ed.). *Melhoramento e produção de milho*. Campinas: Fundação Cargill, 1987, cap.1, 41-78p.
- Gouda, R.K., Kage, U., Lohithaswa, H.C., Shekara, B.G., Shobha, D. (2013) Combining Ability Studies in Maize (*Zea Mays* L.). *Molecular Plant Breeding*, 4:116–127.
- Guedes, F.L., Ferreira Junior, E.J., Castro, C.E.C., Pereira, C.H., Prado, P.E.R., Souza, J.C (2015) The behavior of maize hybrids generated from contrasting progenies regarding the use of nitrogen. *Acta Scientiarum Agronomy*, 37:45-50.
- 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: e35218.
- Guimarães, A.G., Amaral Júnior, A.T., Lima, V.J., Leite, J.T., Scapim, C.A., Vivas, M. (2018b) Genetic gains and selection advances of the UENF-14 popcorn population. *Revista Caatinga*, 31:271-278.

- Guimarães, A.G., Amaral Júnior, A.T., Pena, G.F., Almeida filho, J.E., Pereira, M.G., Santos, P.H.A.D. (2019) Genetic gains in the popcorn population UENF-14: developing the ninth generation of intrapopulation recurrent selection. *Revista Caatinga*, 32:625-633.
- Guimarães, L.J., Miranda, G.V., DeLima, R.O., Maia, C., Oliveira, L.R., Souza, L.V. (2012) Performance of testers with different genetic structure for evaluation of maize inbred lines. *Ciência Rural*, 42:770–776.
- Gutierrez-Gaitan, M.A., Cortez-Mendoza, H., Wathika, E.N., Gardner, C.O., Oyervides-Garcia, M., Hallauer, A.R. (1986) Testcross Evaluation of Mexican Maize Populations. *Crop Science*, 26:99.
- Haddad N.M., Brudvig L.A., Clobert J., Davies K.F., Gonzalez A., Holt R.D., Lovejoy T.E., Sexton J.O., Austin M.P., et al. (2015) Habitat fragmentation and its lasting impact on Earth's ecosystems. *Science Advances*, 1: 1-9.
- Hafiz, M.H; Wajid, F; Farhat, A; Fahad, S; Shafqat, S; Wajid, N; Hafiz, F.B. (2016) Maize plant nitrogen uptake dynamics at limited irrigation water and nitrogen. *Environment Science Pollution Research*, 24:2549-2557.
- Hallauer, A.R. (1975) Relation of gene action and type of tester in maize breeding procedures. *Annu. Corn Sorghum Res. Conf. Proc.* 30:150–65.
- Hallauer, A.R., Carena, M.J., Miranda Filho, J.B. (2010) *Quantitative Genetics in Maize Breeding*, 3rd ed. Handbook of Plant Breeding Volume 6. Springer, New York. 663p.
- Hallauer, A.R., Lopes Perez, E. (1979) Comparisons among testers for valuating lines of corn. *Proceeding of the Annual Hybrid Corn Industry Research Conference*, Washington, D.C., 34:57-75.
- Hallauer, A.R. (1990) Methods used in developing maize inbreds. *Maydica*, 35:1-16
- Hallauer, A.R., Miranda Filho, J.B. (1981) Quantitative genetics in maize breeding. Ames: Iowa State University Press, 468 p.
- Hallauer, A.R.; Miranda Filho, J.B. (1988) Quantitative Genetics in Maize Breeding; Iowa State University Press: Iowa City, IA, USA.

- Hazel, L.N. (1943) The genetic basis for constructing selection indexes. *Genetics*, 28: 476–90.
- Heinz, R., Ribeiro, L.P., Gonçalves, M.C., Bhering, L.L., Teodoro, P.E. (2019) Selection of maize top-crosses for different nitrogen levels through specific combining ability. *Bragantia*, 78: 208-214.
- Hirel B., Le. Gouis. J., Ney, B., Gallais, A. (2007) The challenge of improving nitrogen use efficiency in crop plants: towards a more central role for genetic variability and quantitative genetics within integrated approaches. *Journal of Experimental Botany*, 58:2369-2387.
- Ifie, B.E., B. Badu-Apraku, V. Gracen, and E.Y. Danquah. 2015. Genetic analysis of grain yield of IITA and CIMMYT early-maturing maize inbreds under *Striga*-infested and low-soil nitrogen environments. *Crop Science*, 55:610–623.
- Jenkins, M.T., Brunson, A. M. (1932) Methods of testing inbred lines of corn in crossbreed combinations. *Journal of the American Society of Agronomy*, 24:523-530.
- Jones, D.F. (1918) The effect of inbreeding and crossbreeding upon development. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Washington, 4:246-250.
- Kant, S., Yong-Mei, B., Steven, J.R. (2011) Understanding plant response to nitrogen limitation for the improvement of crop nitrogen use efficiency. *Journal of experimental Botany*, 62:1499-1509.
- Kempthorne, O and Curnow, R.N. (1961) The partial diallel cross. *Biometrics*, 17:229-250.
- Khan, A., Tan, D.K.Y., Afridi, M.Z., Luo, H., Tung, S.A., Ajab, M., Fahad, S. (2017) Nitrogen fertility and abiotic stresses management in cotton crop: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 24: 14551-14566.
- Khan, S., Amaral Júnior, A. T. D., Ferreira, F. R. A., Kamphorst, S. H., Gonçalves, G. M. B., Freitas, M.S.M., M, Silveira, V., Souza Filho, G.A., Amaral, J.F.T., Smith, R.E.B., Khalil, I.H., Vivas, J.M.S., Souza, Y.P., Peçanha, D.A (2020).

- Limited Nitrogen and Plant Growth Stages Discriminate Well Nitrogen Use, Uptake and Utilization Efficiency in Popcorn. *Plants*, 9-7, 893.
- Kist, B. B., de Carvalho, C., Beling, R. R. (2019). *Anuário brasileiro do milho 2019*. Ed. R., R. (Beling Santa Cruz do Sul: Editora Gazeta).
- Köppen, W. (1948) Climatologia: conun estudio de los climas de La Tierra, México: Fondo de Cultura Económica, 479 p.
- Larish, L.L.B., Brewbaker, J.L. (1999) Diallel analyses of temperate and tropical popcorns. *Maydica*, 44:279-284.
- Lemaire, G., and Gastal, F.N.N. (1997) uptake and distribution in plant canopies. In: LEMAIRE, G. (Ed.) – Diagnosis of the nitrogen status in crops. Berlin, Springer, p. 3-43.
- Li, M.S., Li, X.H., Deng, L.W., Zhang, D.G., Bai, L., Zhang, S.H. (2007) Comparisons of four testers in evaluating 27 CIMMYT and Chinese maize populations. *Maydica*, 52:173–179.
- Li, P., Chen, F., Cai, H., Liu, J., Pan, Q., Liu, Z., Gu, R., Mi, G., Zhang, F., Yuan, L. (2015) A genetic relationship between nitrogen use efficiency and seedling root traits in maize as revealed by QTL analysis. *Journal of Experimental Botany*, 66: 3175–3188.
- Loqué, D., and Von Wirén, N. (2004). Regulatory levels for the transport of ammonium in plant roots: regulatory aspects of nitrogen assimilation. *Journal of Experimental Botany*, 55:1293-1305.
- Lu, H.-J., Bernardo, R., Ohm, H.W. (2003) Mapping QTL for popping expansion volume in popcorn with simple sequence repeat markers. *Theoretical Applied Genetics*, 106: 423–427.
- Lyerly P.J. 1942. Some genetic and morphological characters affecting the popping expansion. *Agronomy Journal*, 34: 986– 999.
- Makumbi, D., Betrán, F.J., Bänzinger, M., Ribaut, J.M. (2011). Combining ability, heterosis and genetic diversity in tropical maize (*Zea mays* L.) under stress and non-stress conditions. *Euphytica*, 180, 143–162.

- Maphumulo, S., Derera, J., Sibiyi, J., Mathew, I. (2021). Combining ability, gene action and heterosis analyses of maize lines that were developed for maize streak virus resistance and acidic soil tolerance. *Euphytica*, 217:1-18.
- Martins, T.G., Freitas Júnior, S.P., Luz, L.N., Marco, C.A., Vásquez, E.M.F. (2018) Inoculation efficiency of *Azospirillum brasilense* on economising nitrogen fertiliser in landrace popcorn. *Revista Ciência Agronômica*, 10.5935/1806-6690.20180032.
- Matta, P.P., and Viana, J.M.S. (2001) Testes de capacidade de expansão em programas de melhoramento de milho-pipoca. *Scientia Agricola*, 58:845- 851.
- Matzinger, D.F. (1953). Comparison of three types of testers for the evaluation of inbred lines of corn. *AgronomyJournal*, 45: 493-495.
- Mendes-Santos, R., Kandasamy, S., Cid-Rigobelo, E. (2017) Ammonium and nitrate levels of soil inoculated with *Azospirillum brasilense* in maize. *African Journal of Agricultural Research*, 12: 863-870.
- Menkir, A., Crossa, J., Meseke, S., Bossey, B., Ado, S.G., Obeng-Antwi, K., Alidu, H. (2016) Comparative performance of top-cross maize hybrids under managed drought stress and variable rainfed environments. *Euphytica*, 212: 455–472.
- Moll, R.H., Kamprath, E.J., Jackson, W.A. (1982) Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen utilization. *AgronomyJournal* 74: 562–564.
- Morosini, J.A., Mendonca, L.F., Lyra, D.H., Galli, G., Vidotti, M., Fritsche-Neto, R (2017) Association mapping for traits related to nitrogen use efficiency in tropical maize lines under field conditions. *Plant Soil*, 421, 453–463.
- Mueller, S., Messina, C. D., & Vyn, T. (2019). Simultaneous gains in grain yield and nitrogen efficiency over 70 years of maize genetic improvement. *Scientific Reports*, 9, 9095.
- Mulamba, N.N., Mock, J.J. (1978) Improvement of yield potential of the ETO blanco maize (*Zea mays* L.) population by breeding for plant traits. *Egypt. J. Genet. Cytol.* 7:40-51.

- Mundim, G.B., Viana, J.M.S., Maia, C., Paes, G.P., DeLima, R.O. (2013). Genetic diversity and path analysis for nitrogen use efficiency in popcorn inbred lines. *Euphytica*, 191:291–299.
- Muruli, B.I., Paulsen, G.M. (1981) Improvement of nitrogen use efficiency and its relationship to other traits in maize. *Maydica*, 26 (2): 63-73.
- Mutimaamba C., MacRobert J., Cairns J.E., Magorokosho, C., Ndhalela, T., Mukungurutse, C., Minnaar-Ontong, A . Labuschagne, M. (2020) Line x tester analysis of maize grain yield under acid and non-acid soil conditions. *Crop Science*, 60:991– 1003.
- Nelson, K. A., P. P. Motavalli, and M. Nathan (2014). Nitrogen fertilizer sources and application timing affects wheat and inter-seeded red clover yields on claypan soils. *Agronomy* 4(4):497–513.
- Noëlle, M.A.H., Richard, K., Vernon, G., Martin, Y.A., Laouali, M.N., Liliane, T.N., Godswill, N.N. (2017) Combining Ability and Gene Action of Tropical Maize (*Zea mays* L.) Inbred Lines under Low and High Nitrogen Conditions. *J. Agric. Sci.* 7: 222–235.
- Okumura, R.S., Mariano, D.C., Zaccheo, P.V.C. (2011) Uso de fertilizante nitrogenado na cultura do milho: uma revisão. *Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias*, 4 (2): 226–244.
- Oliveira, G.H.F., Amaral, C., Revolti, L.T.M., Buzinaro, R and Moro, G.V. (2018) Genetic variability in popcorn synthetic population. *Acta Sci. Agron.* 41:39497.
- Oliveira, L.R., Miranda, G.M., DeLima, R.O., Fritsche-Neto, R., Galvão, J.C.C. (2013) Eficiência na absorção e utilização de nitrogênio e atividade enzimática em genótipos de milho. *Revista Ciência Agronômica*, 44 (3): 614-621.
- Pena, G. F., Amaral Júnior, A. T. D., Gonçalves, L. S. A., Vivas, M., Ribeiro, R. M., Mafra, G. S., Dos Santos, A. & Scapim, C. A. (2016). Comparison of testers in the selection of S₃ families obtained from the UENF-14 variety of popcorn. *Bragantia*, 75(2), 135-144.

- Pereira, M.G., Amaral Júnior, A.T. (2001) Estimation of Genetic Components in Popcorn Based on the Nested Design. *Crop Breeding Applied Biotechnology*, 1, 3–10.
- Plastina A. Estimated Costs of Crop Production in Iowa (2015). Iowa State University Extension & Outreach; 2015.
- Presterl, T., Seitz, G., Landbeck, M., Thiemt, E.M., Schmidt, W., Geiger, H.H. (2003) Improving nitrogen-use efficiency in European maize: Estimation of quantitative genetic parameters. *Crop Science*, 43:1259-1265.
- Pricinotto, L. F., Vidigal Filho, P. S., Scapim, C. A., Marques, O.J.E., Okumura, R. S., Reche, D. L. (2014). Effects of nitrogen rates and application time on popcorn. *African Journal of Agricultural Research*, 9(27), 2132-2141.
- R Development Core Team. (2017). R: a language and environment for statistical computing Vienna: R Foundation for Statistical Computing Vienna.
- 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.
- Raun, W. R.; Solie, J. B.; Johnson, G.V.; Stone, M. L.; Mullen, R.W.; Freeman, K.W.; Thomason, W. E.; Lukina, V. (2002) Improving nitrogen use efficiency in cereal grain production with optical sensing and variable rate application. *Agronomy Journal* 94, 815–820.
- Raun, W.R., Johnson, G.V. (1999) Improving nitrogen use efficiency for cereal production. *Agronomy Journal*, 91: 357-363.
- Rawlings, J.O.; Thompson, D.L. (1962) Performance Level as Criterion for the Choice of Maize Testers. *Crop Science*, 2-217.
- Ribeiro, P. F., Apraku, B. B., Gracen, V., Danquah, E. Y., Afriyie-Debrah, C., Obeng-Dankwa, K., Toyinbo, J. O. (2020). Combining ability and testcross performance of low N tolerant intermediate maize inbred lines under low soil nitrogen and optimal environments. *The Journal of Agricultural Science*, 1-20.

- 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. *Genet. Mol. Res.* 11:1417-1423.
- Ribeiro, E.H., Pereira, M.G., Coelho, K.S., Freitas Júnior, S.P. (2009) Estimativas de parâmetros genéticos e seleção de linhagens endogâmicas recombinantes. *Revista Ceres*, 56:580-590.
- Robbins, W.A., and Ashman, R.B. (1984) Parent-offspring popping expansion correlations in progeny of dent corn x popcorn and flint corn x popcorn crosses.
- Rodrigues, M.C, Rezende, W.M, Silva, M.E.J, Faria, S.V, Zuffo, L.T, Galvão, J.C.C., DeLima, R.O. (2017) Genotypic variation and relationships among nitrogen-use efficiency and agronomic traits in tropical maize inbred lines. *Genetic and Molecular Research*, 16: gmr16039757.
- Russell, W.A. (1961) A Comparison of Five Types of Testers in Evaluating the Relationship of Stalk Rot Resistance in Corn Inbred Lines and Stalk Strength of the Lines in Hybrid Combinations. *Crop Science*, 1:393.
- Santos, A.D., Amaral Júnior, A. T. D., Kamphorst, S. H., Gonçalves, G. M. B., Santos, P. H. A. D., Vivas, J. M. S., Mafra, G. S., Khan, S., Oliveira, F. T. D., Schmitt, K. F. M., Santos Junior, D. R. D., & Mora, F. (2020). Evaluation of popcorn hybrids for nitrogen use efficiency and responsiveness. *Agronomy-Basel*, 10(4), 485.
- Santos, A., Amaral Júnior, A.T., Fritsche-Neto, R., Kamphorst, S.H., Ferreira, F.R.A., Amaral, J.F.T., Vivas, J.M.S., Santos, P.H.A.D., Lima, V.J., Khan, S., Schmitt, K.F.M., Leite, J.T., Junior, D.R.S., Bispo, R.B., Santos, T.O., Oliveira, U.A., Guimarães, L.J.M., Rodriguez, O. (2019) Relative importance of gene effects for nitrogen-use efficiency in popcorn. *PLoS One*, 14:e0222726.
- Santos, A., Amaral Júnior, A.T., Kurosawa, R.N.F., Gerhardt, I.F.S., Fritsche Neto, R. (2017a). GGE Biplot projection in discriminating the efficiency of popcorn lines to use nitrogen. *Ciência Agrotecnologia*, 41, 22–31.

- Santos, F.S., Amaral Júnior, A.T. do., Freitas Júnior, S. de P., Rangel, R.M., 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, J.S., Souza, Y.P., Vivas, M., Amaral Júnior, A.T., Almeida Filho, J.E., Mafra, G.S., Viana, A.P., Gravina, G.A and Ferreira, F.R.A. (2020) Genetic merit of popcorn lines and hybrids for multiple foliar diseases and agronomic properties. *Funct. Plant Breed. J.* 2:33-47.
- 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.
- Sawazaki, E. (2001). A cultura do milho-pipoca no Brasil. *O Agrônomo*, Campinas, 53 (2):11–13.
- Scapim, C.A., Carvalho, C.G.P., and Cruz, C.D. (1995) Uma proposta de classificação dos coeficientes de variação para a cultura do milho. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 30, 683-686.
- Scapim, C.A.; Braccini, A.L.; Pinto, R.J.B.; Amaral Júnior, A.T.; Rodovalho, M.A.; Silva, R.M.; Mortele, L.M. (2006) Average genetic components and inbreeding depression in popcorn populations. *Ciência Rural*, 36:36-41.
- Schwantes, I. A., do Amaral Júnior, A. T., de Almeida Filho, J. E., Vivas, M., Silva Cabral, P. D., Gonçalves Guimarães, A., Alves Ferreira, F. R. (2020). Genomic selection helps accelerate popcorn population breeding. *Crop Science*, 60(3), 1373-1385.
- Scott, A.J., Knott, M. (1974) Cluster Analysis Method for Grouping Means in the Analysis of Variance. *Biometrics*, 30, 507-512.
- Sharma, L.K. and Bali, S.K. (2017) A Review of Methods to Improve Nitrogen Use Efficiency in Agriculture. *Sustainability*, 10, 1-23.
- Silva, A. N.; Schoninger, E. L.; Trivelin, P. C. O.; Dourado-Neto, D.; Pinto, V. M.; Reichardt, K. (2017) Maize response to nitrogen: Timing, leaf variables and grain yield. *Journal of Agricultural Science* 9(1): 85-95.

- Silva, T.R.C., Amaral Júnior, A.T., Almeida Filho, J.E., Freitas, M.S., Guimarães, A.G., Kamphorst, S.H. (2019), contrasting phosphorus environments as indicators for popcorn breeding lines, *Functional Plant Breeding Journal*, 1.
- Smith, H.F. (1936) A discriminant function for plant selection. *Ann. Eugen.* 7:240-250.
- Soares, M.O., Miranda, G.V., Guimarães, L.J.M., Marriel, I.E., Guimarães, C.T. (2011) Parâmetros genéticos de uma população de milho em níveis contrastantes de nitrogênio. *Revista Ciência Agronômica*, 42:168-174.
- Souza, L. V Miranda, G. V., Galvão, J. C. C., Guimarães, L. J. M., Santos, I. C. (2009). Combining ability of maize grain yield under diferente levels of environmental stress. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 44:1297-1303.
- Souza, L. V. de; Miranda, G. V.; Galvão, J. C. C.; Eckert, F. R.; Mantovani, E. E.; DeLima, R. O.; Guimarães, L. J. M. (2008). Genetic control of grain yield and nitrogen use efficiency in tropical maize. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 43:1517-1523.
- 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.
- Sweley, Jess C., Devin J., Rose, and David S, Jackson. (2013) Quality traits and popping performance considerations for popcorn (*Zea mays* Everta), *Food reviews international* 29: 157-177.
- Taiz, L.; Zeiger, E.; Moller, I. M.; Murphy, A. (2017) *Fisiologia e desenvolvimento vegetal*. 6. ed. Porto Alegre: ArtMed, 954 p.
- Tamirat, T., ALAMEREW, S., Wegary, D., Menamo, T. (2014) Test cross mean performance and combining ability study of elite lowland maize (*Zea mays* L.) inbred lines at melkassa, Ethiopia. *Adv Crop Sci Techonology*, 2:1-9.
- Torres, L.G., Caixeta, D.G., Rezende, W.M., Schuster, A., Azevedo, C.F., Silva, F.F, DeLima, R.O. (2019) Genotypic variation and relationships among traits for root morphology in a panel of tropical maize inbred lines under contrasting nitrogen levels. *Euphytica*, 251:1–18.

- United States Department of Agriculture National Agricultural Statistics Service (2019) Field crops statistics, USDA-NASS. <http://www.nass.usda.gov>. Accessed 25 Jun 2020.
- Vencovsky R (1987) Herança quantitativa. In: Paterniani E & Viegas GP (Ed.) Melhoramento e produção do milho. Campinas, Fundação Cargill. p.135-214.
- Vencovsky, R, and Barriga, P. (1992) Genética biométrica no fitomelhoramento, Ribeirão Preto: Sociedade Brasileira de Genética.
- Vidotti MS, Matias FI, Alves FC, Pérez- Rodríguez P, Beltran GA, Burgueño J, et al. (2019) Maize responsiveness to *Azospirillum brasilense*: Insights into genetic control, heterosis and genomic prediction. *PLoS ONE*, 14: e0217571.
- Worku, M., Bänziger, M., Friesen, D., Erley, G.S.A., Horst, W.J and Vivek, B.S. (2008) Relative importance of general combining ability and specific combining ability among tropical maize (*Zea mays* L.) inbreds under contrasting nitrogen environments. *Maydica*. 53:279-288.
- Wu, Y., Liu, W., Li, X., Li, M., Zhang, D., Hao, Z., Weng, J. (2011) Low nitrogen stress tolerance and nitrogen agronomic efficiency among maize inbreds: comparison of multiple indices and evaluation of genetic variation. *Euphytica*, 180:281–290.
- Zebire, D., Menkir, A., Adetimirin, V., Mengesha, W., Meseke, S., Gedil, M. (2020). Effectiveness of Yellow Maize Testers with Varying Resistance Reactions to *Striga hermonthica* for Evaluating the Combining Ability of Maize Inbred Lines. *Agronomy* basel, 10:1276.
- Zeffa, D.M., Fantin, L.H., Santos, O.J.A.P., Oliveira, A.L.M., Canteri, M.G., Scapim, C.A. (2018) The influence of topdressing nitrogen on *Azospirillum* spp. inoculation in maize crops through meta-analysis. *Bragantia*, 77: 493–500.
- Ziegler K.E. 2001. Popcorn. In: A.R. Hallauer, editor, *Specialty corns*. CRC Press, Boca Raton, FL.
- Zinsly, J.R., Machado, J.A. (1987) Milho-pipoca. In: Paterniani, E., Viégas, G. P. (eds.) *Melhoramento e Produção do Milho*. 2. ed. Campinas: Fundação Cargill. p.413-421.

APENDICES

Tabela suplementar 1. Estimativas de médias de rendimento de grãos (RG, kg.ha⁻¹) e capacidade de expansão (CE, g.mL⁻¹) de 90 híbridos *topcrosses* de milho-pipoca cultivadas em ambientes com alta disponibilidade de nitrogênio.

Híbrido	Campos	RG (kg.ha ⁻¹)		Híbrido	Campos	CE (g.mL ⁻¹)	
		Híbrido	Itaocara			Híbrido	Itaocara
L688xL70	3629,37 a	L694xL80	4709,96 a	L688xP7	37,58 a	L688xP7	34,18 a
L686xL80	3526,11 a	L694xL70	4328,19 a	L694xP70	35,93 a	L690xL80	33,37 a
L682xL59	3500,74 a	L684xL70	4257,79 a	L689xP7	35,84 a	UENF N02	33,20 a
L696xL70	3496,74 a	L684xL80	4166,17 a	UENF N 02	35,36 a	L696xP7	33,18 a
L682xL70	3430,73 a	L689xL70	4161,90 a	L688xL54	35,19 a	L681xL54	32,77 a
L691xP7	3399,30 a	L688xL80	4158,34 a	L690xL80	34,13 b	L681xL70	32,67 a
L682xL75	3359,51 a	L682xL70	4116,21 a	L683xP7	34,03 b	L690xP7	32,56 a
L686xL75	3358,99 a	L683xL70	4003,41 a	L696xP7	33,80 b	L691xL70	32,41 a
L689xL59	3343,07 a	L692xL70	3969,10 a	L681xL70	33,74 b	L691xP7	32,22 a
L688xL80	3339,40 a	L690xL59	3916,19 a	L681xP7	33,67 b	L689xP7	32,11 a
L691xL70	3290,74 a	L694xP7	3885,90 a	L681xL54	33,53 b	L694xL80	31,72 b
L684xL70	3219,55 a	L684xL75	3883,59 a	L690xP7	33,46 b	L694xP7	31,69 b
L695xL70	3209,77 a	L689xP7	3805,66 b	UENF HS 01	33,31 b	L681xL75	31,66 b
L686xL70	3181,53 a	L688xL59	3793,65 b	L690xL54	33,29 b	L683xP7	31,51 b
L686xL59	3177,29 a	L683xL59	3771,60 b	L689xL54	33,00 b	L681xP7	31,29 b
L685xL70	3153,07 a	L682xL59	3769,05 b	L681xL75	32,91 b	L694xL70	31,23 b
L692xL75	3125,16 b	L691xL59	3754,34 b	L694xL80	32,83 b	L689xL54	31,05 b
L689xL70	3122,37 b	L689xL59	3748,51 b	L681xL59	32,83 b	L685xL70	31,02 b
L691xL75	3118,37 b	L682xL75	3744,47 b	L681xL80	32,75 b	L684xL54	30,93 b
L696xL59	3108,45 b	L690xL80	3712,71 b	L689xL59	32,62 b	L696xL54	30,92 b
L695xL80	3103,93 b	L696xL59	3666,90 b	L689xL70	32,46 b	L688xL54	30,91 b
L696xL75	3090,04 b	L686xP7	3660,90 b	L691xP7	32,42 b	L691xL80	30,63 b
L692xL80	3077,84 b	L690xL75	3641,95 b	L688xL70	32,38 b	L685xP7	30,62 b
L683xL70	3071,18 b	L686xL70	3639,57 b	L690xL70	32,19 b	L688xL70	30,57 b
L692xL70	3061,74 b	L695xL70	3615,56 b	L689xL80	31,76 c	L690xL70	30,49 b
L693xL70	3021,46 b	L689xL80	3605,01 b	L683xL70	31,62 c	L681xL59	30,40 b
L685xL75	3001,54 b	L694xL59	3595,07 b	L688xL80	31,42 c	L681xL80	30,39 b
L685xL59	2982,38 b	L696xL75	3587,93 b	L694xL54	31,36 c	L683xL70	30,32 b
L695xL59	2954,08 b	L695xL80	3566,91 b	L688xL59	31,34 c	L690xL59	30,10 b
L695xP7	2943,95 b	L695xL59	3533,69 b	L690xL59	31,08 c	L688xL80	29,94 b
L688xP7	2935,30 b	L693xL80	3525,87 b	L685xP7	30,97 c	L688xL59	29,88 b
L693xL59	2935,06 b	L683xL54	3521,61 b	L696xL54	30,97 c	L691xL75	29,61 c
L684xL75	2932,58 b	L686xL75	3497,66 b	L694xP7	30,95 c	L694xL54	29,53 c
L682xP7	2923,68 b	L685xP7	3493,29 b	L684xL54	30,87 c	L689xL80	29,44 c
L682xL80	2921,93 b	L692xL80	3468,65 b	L689xL75	30,87 c	L685xL54	29,21 c
L688xL59	2919,98 b	L682xL80	3466,14 b	L685xL54	30,56 c	L690xL75	29,12 c
L691xL59	2913,52 b	L688xL75	3460,26 b	L691xL80	30,52 c	L692xL54	28,56 c
L684xL59	2910,66 b	L695xL54	3422,48 b	L684xP7	30,33 c	L689xL70	28,22 d
L685xL80	2881,54 b	L690xP7	3408,35 b	L685xL70	30,12 d	L685xL80	27,91 d
L684xP7	2865,33 b	L694xL54	3382,39 b	L693xP7	30,11 d	L692xP7	27,90 d
L688xL54	2856,67 b	L686xL80	3374,71 b	L691xL75	30,06 d	L694xL75	27,75 d
L693xL75	2849,81 b	L696xL80	3362,18 b	L690xL75	29,86 d	L683xL80	27,60 d
L694xL70	2833,64 b	L688xP7	3356,77 b	L691xL70	29,83 d	UENF HS 01	27,58 d

Tabela suplementar 1. Cont.

		RG (kg ha^{-1})		CE (gmL $^{-1}$)			
Híbrido	Campos	Híbrido	Itaocara	Híbrido	Campos	Híbrido	Itaocara
L688xL75	2829,99 b	L682xL54	3336,09 b	L695xP7	29,76 d	L695xL70	27,52 d
L681xL70	2819,55 b	L694xL75	3332,80 b	L685xL59	29,42 d	L684xL80	27,52 d
L689xL80	2816,13 b	L686xL54	3322,55 b	L695xL70	29,41 d	L683xL54	27,24 d
L694xL80	2793,88 b	L691xL80	3313,77 b	L694xL59	28,94 d	L696xL80	27,16 d
L681xL75	2783,47 b	L693xL75	3303,35 b	L685xL80	28,81 d	L693xL70	26,88 d
L684xL80	2770,74 b	L681xL59	3302,21 b	L683xL54	28,75 d	L695xL80	26,58 e
L695xL75	2757,01 b	L685xL59	3290,11 b	L692xP7	28,51 e	L695xP7	26,44 e
L683xL59	2725,39 b	UENF N03	3283,53 b	L692xL54	28,43 e	L682xL70	26,40 e
L683xL75	2687,66 c	UENF HS 01	3271,96 b	L693xL80	28,37 e	L689xL75	26,39 e
L686xP7	2687,44 c	L695xL75	3247,28 c	L691xL54	28,31 e	L688xL75	26,16 e
L695xL54	2659,46 c	L685xL80	3237,63 c	L684xL75	28,25 e	L683xL59	25,94 e
L692xL59	2612,03 c	L686xL59	3226,62 c	L683xL59	28,20 e	L696xL70	25,92 e
L696xP7	2606,36 c	L692xP7	3179,05 c	L696xL75	28,11 e	L691xL54	25,88 e
L690xL70	2594,63 c	L690xL70	3176,08 c	UENF N03	27,97 e	L689xL59	25,87 e
UENF HS 01	2574,97 c	L681xL80	3165,32 c	L695xL59	27,86 e	L690xL54	25,75 e
L696xL54	2555,54 c	L689xL75	3163,83 c	L693xL54	27,65 e	L684xL75	25,67 e
L681xL80	2548,76 c	L691xP7	3155,88 c	L694xL75	27,65 e	L696xL75	25,35 e
L682xL54	2541,99 c	L684xL54	3143,93 c	L695xL80	27,29 e	L682xP7	25,05 e
L689xP7	2535,47 c	L689xL54	3125,83 c	L683xL80	27,13 e	L693xL80	25,03 e
L694xL59	2528,95 c	L685xL70	3122,19 c	L696xL80	27,00 e	L693xP7	25,01 e
L691xL54	2526,20 c	L691xL70	3100,81 c	L682xP7	26,94 e	L685xL75	24,95 e
L685xP7	2494,56 c	L681xL54	3078,08 c	L693xL70	26,83 e	L692xL70	24,90 e
L689xL75	2494,54 c	L696xL70	3064,80 c	L696xL70	26,75 e	L686xL70	24,83 e
L696xL80	2489,08 c	L683xL75	3053,52 c	L692xL70	26,71 e	L696xL59	24,72 f
L693xP7	2484,33 c	L682xP7	3051,05 c	L693xL59	26,56 e	L695xL59	24,65 f
L681xL59	2482,75 c	L688xL70	3035,35 c	L696xL59	26,56 e	L693xL59	24,29 f
L683xL54	2476,49 c	L693xL70	3022,84 c	L684xL80	26,39 f	L692xL80	24,19 f
L685xL54	2466,48 c	L683xL80	3016,57 c	L684xL59	26,08 f	L686xP7	23,79 f
L686xL54	2459,36 c	L683xP7	2999,55 c	L683xL75	25,81 f	L684xL70	23,71 f
L691xL80	2393,06 c	L681xL70	2992,60 c	L691xL59	25,81 f	L682xL54	23,60 f
L681xP7	2388,97 c	L684xL59	2972,53 c	L685xL75	25,72 f	L682xL80	23,42 f
L681xL54	2381,22 c	L696xP7	2970,66 c	L692xL80	25,70 f	UENF N03	23,40 f
L684xL54	2361,85 c	L681xL75	2969,09 c	L688xL75	25,42 f	L693xL54	23,29 f
L683xL80	2353,10 c	L696xL54	2916,41 c	L686xP7	25,01 f	L686xL80	23,24 f
L694xP7	2350,01 c	L692xL54	2863,32 c	L682xL80	24,64 f	L685xL59	22,51 g
L690xL80	2314,93 c	L684xP7	2835,97 c	L684xL70	24,53 f	L684xL59	22,39 g
L683xP7	2291,29 c	L688xL54	2822,06 c	L682xL70	24,42 f	L691xL59	22,32 g
L689xL54	2288,32 c	L685xL54	2821,23 c	L686xL80	23,91 g	L683xL75	22,10 g
L692xP7	2220,36 c	L692xL59	2733,72 c	L693xL75	23,87 g	L692xL59	21,89 g
L693xL80	2189,83 c	L690xL54	2689,24 d	L682xL54	23,70 g	L682xL59	21,33 g
L694xL75	2184,20 c	L691xL75	2516,54 d	L692xL59	23,17 g	L694xL59	20,48 h
L692xL54	2182,75 c	L695xP7	2471,63 d	L695xL54	23,08 g	L693xL75	20,12 h
L690xL59	2173,85 c	L693xP7	2436,92 d	L695xL75	23,06 g	L695xL75	19,89 h
L694xL54	2170,46 c	L681xP7	2426,96 d	L682xL59	21,48 h	L686xL59	19,76 h
L690xP7	2126,35 c	L692xL75	2395,48 d	L692xL75	21,18 h	L686xL54	19,75 h
L693xL54	2125,20 c	L685xL75	2337,81 d	L686xL70	21,16 h	L695xL54	19,58 h

Tabela suplementar 1. Cont.

		RG (kg ha^{-1})		CE (gmL $^{-1}$)			
Híbrido	Campos	Híbrido	Itaocara	Híbrido	Campos	Híbrido	Itaocara
UENF N 03	2057,85 c	L693xL54	2303,55 d	L686xL59	20,99 h	L684xP7	19,16 h
L690xL54	1978,90 c	L693xL59	2302,08 d	L686xL54	20,72 h	L682xL75	19,14 h
L690xL75	1938,96 c	L691xL54	2286,14 d	L682xL75	19,01 i	L692xL75	17,60 i
UENF N 02	1659,47 c	UENF N 02	2111,09 d	L686xL75	18,36 i	L686xL75	17,39 i

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

Tabela suplementar 2. Estimativas de médias de rendimento de grãos (RG, kg.ha⁻¹) e capacidade de expansão (CE, g.mL⁻¹) de 90 híbridos *topcrosses* de milho-pipoca cultivadas em ambientes com baixa disponibilidade de nitrogênio.

Híbrido	RG (kg.ha ⁻¹)		CE (g.mL ⁻¹)				
	Campos	Híbrido	Itaocara	Híbrido	Campos	Híbrido	Itaocara
L688xL70	3136.84 a	L694xL70	3653.29 a	L688xL54	37.47 a	UENF N 02	33.33 a
L686xL70	3119.54 a	L696xL70	3525.47 a	L688xP7	36.57 a	L696xP7	32.52 a
L686xL59	3066.72 a	L683xL70	3521.91 a	L694xL70	35.58 b	L681xP70	32.27 a
L682xL75	3033.39 a	L693xL80	3273.64 a	L689xP7	35.08 b	L690xP80	32.20 a
L681xL70	2936.83 a	L696xL59	3177.84 a	UENF N 02	34.85 b	L690xP7	31.44 a
L684xL59	2903.50 a	L684xL75	3150.13 a	L681xL70	34.32 b	L688xP7	31.36 a
L688xL80	2873.42 a	L684xL59	3143.26 a	L690xL80	34.12 b	L691xP7	31.20 a
L685xL59	2852.92 a	L685xL75	3129.50 a	L696xP7	33.90 c	L683xP7	30.93 a
L694xL70	2810.40 a	L685xL59	3091.28 a	L690xL54	33.73 c	L681xP54	30.86 a
L682xL59	2749.99 a	L686xL59	3008.73 a	L681xP7	33.66 c	L694xP7	30.82 a
L684xL70	2747.49 a	L694xL54	2946.91 a	L681xL54	33.31 c	L691xP70	30.80 a
L692xL70	2718.44 a	L689xL70	2919.56 b	L690xP7	33.13 c	L688xP54	30.67 b
L693xL70	2680.51 a	L695xL54	2866.54 b	L689xL70	32.54 c	L689xP7	30.55 b
L688xL54	2641.42 a	L688xL54	2841.32 b	L689xL54	32.30 c	L694xP70	30.54 b
L685xL70	2629.93 a	L683xL75	2836.43 b	L681xL75	32.28 c	L688xP70	30.52 b
L695xL54	2612.69 b	L695xL75	2763.75 b	L688xL70	32.26 c	L681xP7	30.42 b
L685xL75	2604.64 b	L684xL70	2758.50 b	L690xL70	32.14 c	L685xP70	30.37 b
L696xL70	2575.91 b	L691xL70	2753.93 b	L694xP7	32.11 c	L681xP80	30.18 b
L684xP7	2566.44 b	L683xL59	2739.90 b	L691xP7	31.92 c	L685xP7	30.15 b
L695xL59	2549.99 b	L694xL75	2735.77 b	L689xL59	31.87 c	L691xP80	30.12 b
L696xL59	2523.42 b	L693xL70	2726.62 b	L681xL59	31.87 c	L684xP54	30.03 b
L690xL54	2513.50 b	L686xL80	2717.64 b	L690xL75	31.42 d	L681xP59	29.90 b
L694xL80	2495.24 b	L684xL54	2707.04 b	L681xL80	31.42 d	L681xP75	29.68 b
L686xL75	2475.09 b	L689xL54	2678.60 b	L688xL80	31.22 d	L689xP54	29.59 b
L696xL75	2471.57 b	L686xP7	2615.03 b	L683xL70	31.14 d	L694xP80	29.56 b
L688xL75	2437.56 b	L693xL75	2613.48 b	L694xL80	31.11 d	L696xP54	29.46 b
L693xL59	2411.94 b	L694xL80	2603.32 b	L690xL59	31.07 d	L690xP70	29.35 b
L688xL59	2407.46 b	L694xL59	2601.41 b	L683xP7	31.04 d	L691xP75	29.25 b
L691xL70	2390.24 b	L692xL70	2600.53 b	L688xL59	30.95 d	L683xP70	29.24 b
L685xL54	2385.77 b	L685xL80	2561.58 b	L685xP7	30.87 d	L688xP59	29.18 b
L683xL70	2371.30 b	L696xL75	2559.48 b	L689xL75	30.74 d	L688xP80	29.04 b
L689xL70	2362.31 b	L693xL59	2545.70 b	L685xL54	30.51 d	L685xP54	28.95 b
L686xL80	2339.96 b	L688xL59	2537.57 b	L694xL54	30.23 d	L690xP59	28.90 b
L683xL80	2339.41 b	L688xL75	2527.08 b	L685xL70	30.14 d	L690xP75	28.70 c
L682xL70	2310.05 b	L682xL75	2513.39 b	L691xL80	30.06 d	L689xP80	28.36 c
L690xL80	2307.85 b	L686xL54	2504.88 b	L691xL75	29.91 d	L694xP54	28.10 c
L695xL70	2306.43 b	L689xL75	2502.23 b	L684xL54	29.84 d	L689xP70	27.79 c
L686xL54	2302.48 b	L696xL80	2456.59 b	L693xP7	29.81 d	L685xP80	27.74 c
L684xL75	2291.64 b	L692xL59	2436.43 b	L684xP7	29.76 d	L683xP54	26.98 c
L692xL75	2289.69 b	L694xP7	2424.23 b	L695xP7	29.75 d	L695xP70	26.97 c
L689xL75	2287.40 b	L695xP7	2413.20 b	L689xL80	29.69 d	L692xP54	26.94 c
L691xL59	2265.38 b	L692xL75	2364.52 c	L691xL70	29.26 e	L684xP80	26.91 c
L688xP7	2227.54 b	L693xP7	2355.21 c	L696xL80	29.14 e	L696xP80	26.85 c
L686xP7	2208.24 b	L689xL80	2342.84 c	L685xL59	29.10 e	L692xP7	26.82 c

Tabela suplementar 2. Cont.

Híbrido	RG (kg.ha ⁻¹)			CE (g.mL ⁻¹)			
	Campos	Híbrido	Itaocara	Híbrido	Campos	Híbrido	Itaocara
L689xP7	2196.97 b	L681xL59	2342.23 c	L691xL54	28.86 e	L694xP75	26.70 c
UENF HS 01	2189.68 b	L683xL54	2325.49 c	UENF HS 01	28.73 e	L689xP75	26.66 c
L682xL54	2181.61 b	L689xL59	2321.81 c	L696xL54	28.65 e	L693xP70	26.32 c
L694xL59	2125.39 c	L689xP7	2316.86 c	L694xL59	28.61 e	L688xP75	25.97 d
L690xL70	2123.66 c	L690xP7	2313.10 c	L695xL70	28.61 e	L695xP80	25.94 d
L691xL75	2119.08 c	L683xL80	2306.97 c	L683xL54	28.52 e	L695xP7	25.82 d
L693xL75	2092.26 c	L685xL70	2297.34 c	L693xL80	28.35 e	L682xP70	25.74 d
L692xL59	2083.39 c	L690xL70	2296.54 c	L692xL54	28.25 e	L683xP80	25.67 d
L681xL75	2070.16 c	L684xP7	2293.79 c	L696xL75	28.13 e	L683xP59	25.65 d
L684xL54	2052.41 c	L692xL54	2263.14 c	L683xL59	28.02 e	L696xP70	25.58 d
L683xL59	2032.03 c	L682xL70	2256.64 c	L695xL59	27.67 f	L696xP75	25.28 d
L689xL59	2007.65 c	L691xL59	2217.50 c	L685xL80	27.59 f	L691xP54	25.28 d
L681xL54	2003.84 c	L688xP7	2211.51 c	L695xL80	27.11 f	L690xP54	25.21 d
UENF N 03	1995.58 c	L693xL54	2192.89 c	L683xL80	27.02 f	L684xP75	24.84 d
L689xL80	1980.04 c	L696xL54	2186.64 c	UENF N 03	26.96 f	L682xP7	24.84 d
L693xP7	1980.04 c	L681xP7	2184.99 c	L693xL70	26.79 f	L685xP75	24.71 d
L682xL80	1969.87 c	UENF HS 01	2182.15 c	L682xL70	26.66 f	L686xP70	24.70 d
L682xP7	1964.57 c	UENF N 03	2167.34 c	L696xL59	26.58 f	L692xP80	24.53 d
L691xL80	1956.35 c	L686xL75	2139.14 c	L696xL70	26.53 f	L692xP70	24.48 d
L692xL80	1936.65 c	L685xP7	2116.70 c	L694xL75	26.48 f	L693xP80	24.44 d
L695xL80	1926.79 c	L690xL80	2112.58 c	L682xP7	26.41 f	L693xP7	24.37 d
L681xL59	1921.23 c	L688xL70	2095.10 c	L693xL54	26.39 f	L689xP59	24.37 d
L681xP7	1904.47 c	L686xL70	2055.78 c	L692xL70	26.23 f	L696xP59	24.32 d
L690xP7	1867.98 c	L691xL54	2046.25 c	L684xL80	26.16 f	L686xP80	23.48 e
L696xL54	1864.24 c	L695xL70	2021.22 c	L684xL75	26.13 f	L682xP54	23.36 e
L689xL54	1849.24 c	L681xL70	2018.05 c	L693xL59	25.96 f	L693xP59	23.31 e
L684xL80	1848.25 c	L682xL54	2008.70 c	L684xL59	25.95 f	L682xP80	23.21 e
UENF N 02	1827.53 c	L682xP7	2003.35 c	L692xP7	25.89 f	L686xP7	23.14 e
L696xL80	1804.46 c	L683xP7	1997.39 c	L691xL59	25.56 g	L695xP59	23.10 e
L685xP7	1801.88 c	L691xL80	1979.06 c	L688xL75	25.28 g	L693xP54	22.93 e
L694xL75	1785.13 c	L685xL54	1932.48 d	L685xL75	25.10 g	UENF HS 01	22.83 e
L685xL80	1768.03 c	L690xL59	1902.77 d	L686xP7	24.79 g	L684xP70	22.61 e
L693xL80	1764.18 c	L695xL59	1896.49 d	L683xL75	24.78 g	L691xP59	22.32 e
L683xP7	1705.09 c	L690xL54	1869.08 d	L682xL80	24.23 g	L692xP59	21.84 f
L692xP7	1702.10 c	L691xP7	1860.60 d	L693xL75	23.95 g	L682xP59	21.52 f
L691xP7	1701.36 c	L692xP7	1819.88 d	L686xL80	23.90 g	UENF N 03	21.51 f
L695xP7	1675.57 c	L681xL75	1791.45 d	L692xL59	23.19 h	L683xP75	20.95 f
L683xL75	1615.74 c	L696xP7	1788.60 d	L684xL70	23.18 h	L684xP59	20.94 f
L681xL80	1610.15 c	L688xL80	1748.06 d	L682xL54	23.18 h	L685xP59	20.76 f
L696xP7	1608.29 c	L691xL75	1722.70 d	L695xL75	23.08 h	L693xP75	20.45 f
L695xL75	1607.10 c	L695xL80	1664.97 d	L695xL54	23.00 h	L686xP54	19.80 g
L690xL59	1594.33 c	L681xL54	1657.61 d	L692xL80	22.95 h	L695xP75	19.61 g
L691xL54	1588.97 c	L692xL80	1655.28 d	L682xL59	21.52 i	L684xP7	19.16 g
L694xP7	1578.33 c	L682xL59	1652.32 d	L686xL70	21.46 i	L686xP59	19.11 g
L694xL54	1463.09 c	UENF HS 02	1648.13 d	L692xL75	21.15 i	L682xP75	19.10 g
L693xL54	1404.44 c	L681xL80	1564.98 d	L686xL59	20.61 j	L695xP54	19.10 g

Tabela suplementar 2. Cont.

RG (kg.ha⁻¹)				CE (g.mL⁻¹)			
Híbrido	Campos	Híbrido	Itaocara	Híbrido	Campos	Híbrido	Itaocara
L692xL54	1273.26 c	L684xL80	1538.93 d	L686xL54	20.33 j	L694xP59	18.56 g
L683xL54	1260.20 c	L682xL80	1452.57 d	L682xL75	19.25 j	L692xP75	17.51 g
L690xL75	1171.78 c	L690xL75	1437.88 d	L686xL75	17.29 k	L686xP75	17.28 g

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

Tabela suplementar 3. Estimativas dos efeitos da capacidade específica de combinação (\hat{S}_{ij}) para rendimento de grãos (RG) e capacidade de expansão (CE) em condição de alta disponibilidade de nitrogênio no solo.

Híbrido	RG			CE		
	Campos	Itaocara	Média	Campos	Itaocara	Média
L681 x L59	-194,58	211,88	8,65	0,8	1,33	1,07
L682 x L59	277,76	87,26	182,51	-0,67	0,63	-0,02
L683 x L59	14,66	275,93	145,3	0,15	0,95	0,55
L684 x L59	-42,67	-672,1	-357,4	-0,45	-0,05	-0,25
L685 x L59	42,57	138,44	90,51	1,36	-2,74	-0,69
L686 x L59	2,29	-328,3	-163	0,51	0,76	0,63
L688 x L59	-275	254,62	-10,2	0,33	2,06	1,2
L689 x L59	466,54	45,43	255,99	1,07	-0,52	0,28
L690 x L59	-124	390,81	133,42	-0,04	2,33	1,14
L691 x L59	-136,6	631,8	247,62	-2,47	-4,07	-3,27
L692 x L59	-211,2	-469,1	-340,1	-1,24	0,17	-0,53
L693 x L59	224,23	-615	-195,4	0,54	2,64	1,59
L694 x L59	-57,79	-378,6	-218,2	-1,13	-5,8	-3,46
L695 x L59	-93,83	122,81	14,49	2,33	3	2,66
L696 x L59	107,53	304,13	205,83	-1,09	-0,7	-0,9
L681 x L70	-115,6	-246,4	-181	0,04	-0,44	-0,2
L682 x L70	-50,11	285,74	117,82	0,59	1,66	1,13
L683 x L70	102,59	359,07	230,83	1,9	1,29	1,59
L684 x L70	8,36	464,5	236,43	-3,68	-2,77	-3,22
L685 x L70	-44,6	-178,2	-111,4	0,39	1,74	1,06
L686 x L70	-251,3	-64,06	-157,7	-1	1,79	0,4
L688 x L70	176,51	-652,4	-237,9	-0,31	-1,28	-0,8
L689 x L70	-12,02	310,15	149,06	-0,76	-2,21	-1,49
L690 x L70	38,96	-498	-229,5	-0,61	-1,32	-0,97
L691 x L70	-17,2	-170,4	-93,8	-0,13	1,99	0,93
L692 x L70	-19,31	617,58	299,14	0,63	-0,85	-0,11
L693 x L70	52,77	-42,89	4,94	-0,87	1,2	0,17
L694 x L70	-10,96	205,84	97,44	4,19	0,92	2,55
L695 x L70	-96	56	-20	2,2	1,83	2,02
L696 x L70	237,97	-446,6	-104,3	-2,58	-3,54	-3,06
L681 x P7	-20,66	-380,9	-200,8	-2,39	-2,46	-2,42
L682 x P7	-31,6	-348,2	-189,9	0,76	-0,33	0,21
L683 x P7	-151,7	-213,6	-182,7	1,96	1,84	1,9
L684 x P7	179,7	-526,1	-173,2	-0,23	-7,96	-4,09
L685 x P7	-177,6	624,14	223,3	-1,12	0,7	-0,21
L686 x P7	-219,9	388,46	84,3	0,5	0,11	0,3
L688 x P7	8	100,26	54,13	2,54	1,69	2,11
L689 x P7	-73,36	385,1	155,87	0,26	1,04	0,65
L690 x P7	96,23	165,49	130,86	-1,69	0,11	-0,79
L691 x P7	616,92	315,86	466,39	0,11	1,15	0,63
L692 x P7	-335,1	258,72	-38,21	0,08	1,51	0,79
L693 x P7	41,2	-197,6	-78,21	0,06	-1,32	-0,63
L694 x P7	30,97	194,74	112,86	-3,15	0,74	-1,21
L695 x P7	163,74	-656,7	-246,5	0,2	0,11	0,15

Tabela suplementar 3. Cont.

Híbrido	RG			CE		
	Campos	Itaocara	Média	Campos	Itaocara	Média
L696 x P7	-126,9	-109,6	-118,2	2,12	3,08	2,6
L681 x L54	186,37	410,51	298,44	-0,26	0,87	0,3
L682 x L54	-198,5	77,06	-60,72	-0,22	0,07	-0,07
L683 x L54	248,25	448,7	348,47	-1,06	-0,58	-0,82
L684 x L54	-109	-77,93	-93,46	2,57	5,66	4,12
L685 x L54	9,16	92,32	50,74	0,74	1,14	0,94
L686 x L54	-233,2	190,35	-21,4	-1,53	-2,08	-1,8
L688 x L54	144,16	-294,2	-75,03	2,41	0,27	1,34
L689 x L54	-105,7	-154,5	-130,1	-0,31	1,83	0,76
L690 x L54	163,57	-413,4	-124,9	0,4	-4,85	-2,23
L691 x L54	-41,39	-413,6	-227,5	-1,74	-3,34	-2,54
L692 x L54	-158	83,24	-37,36	2,26	4,02	3,14
L693 x L54	-103,1	-190,8	-147	-0,14	-1,19	-0,66
L694 x L54	66,21	-168,5	-51,16	-0,47	0,43	-0,02
L695 x L54	94,03	434,36	264,2	-4,22	-4,9	-4,56
L696 x L54	37,11	-23,6	6,76	1,55	2,67	2,11
L681 x L75	156,56	94,81	125,68	2,4	2,83	2,62
L682 x L75	186,96	278,73	232,84	-1,62	-1,32	-1,47
L683 x L75	27,35	-226,1	-99,37	-0,72	-2,65	-1,68
L684 x L75	29,67	455,02	242,35	3,24	3,47	3,36
L685 x L75	112,16	-597,8	-242,8	-0,82	-0,05	-0,44
L686 x L75	234,41	158,75	196,58	-0,6	-1,37	-0,99
L688 x L75	-314,6	137,28	-88,65	-4,07	-1,41	-2,74
L689 x L75	-331,6	-323,2	-327,4	0,84	0,24	0,54
L690 x L75	-308,4	332,62	12,1	0,26	1,59	0,92
L691 x L75	118,72	-390	-135,6	3,3	3,46	3,38
L692 x L75	352,39	-591,3	-119,5	-1,71	-3,87	-2,79
L693 x L75	189,41	602,34	395,87	-0,63	-1,28	-0,96
L694 x L75	-352,1	-424,8	-388,5	-0,9	1,72	0,41
L695 x L75	-240,5	52,45	-94,02	-0,95	-1,52	-1,24
L696 x L75	139,55	441,21	290,38	1,98	0,17	1,08
L681 x L80	-12,05	-89,92	-50,98	-0,59	-2,12	-1,36
L682 x L80	-184,5	-380,6	-282,5	1,17	-0,72	0,23
L683 x L80	-241,1	-644	-442,6	-2,23	-0,84	-1,53
L684 x L80	-66,06	356,64	145,29	-1,46	1,64	0,09
L685 x L80	58,26	-78,95	-10,34	-0,56	-0,78	-0,67
L686 x L80	467,64	-345,2	61,24	2,12	0,8	1,46
L688 x L80	260,93	454,4	357,67	-0,91	-1,32	-1,11
L689 x L80	56,13	-263	-103,4	-1,1	-0,39	-0,75
L690 x L80	133,64	22,42	78,03	1,69	2,16	1,92
L691 x L80	-540,5	26,32	-257,1	0,93	0,8	0,86
L692 x L80	371,18	100,9	236,04	-0,02	-0,97	-0,49
L693 x L80	-404,5	443,9	19,72	1,04	-0,06	0,49
L694 x L80	323,67	571,38	447,52	1,45	2	1,73
L695 x L80	172,55	-8,88	81,83	0,44	1,49	0,97
L696 x L80	-395,3	-165,5	-280,4	-1,97	-1,7	-1,83

Tabela suplementar 4. Estimativas dos efeitos da capacidade específica de combinação (\hat{S}_{ij}) para rendimento de grãos (RG) e capacidade de expansão (CE) em condição de baixa disponibilidade de nitrogênio no solo.

Híbrido	RG			CE		
	Campos	Itaocara	Média	Campos	Itaocara	Média
L681 x L59	-340,97	281,59	-29,69	0,2	1,95	1,07
L682 x L59	193,99	-462,90	-134,5	-0,88	1,16	0,14
L683 x L59	-43,02	-15,54	-29,28	0,74	1,68	1,21
L684 x L59	314,12	410,57	362,35	0,25	-0,54	-0,14
L685 x L59	324,64	435,71	380,18	1,35	-3,75	-1,2
L686 x L59	293,63	367,78	330,7	0,35	0,46	0,41
L688 x L59	-401,00	76,71	-162,2	-0,2	2,33	1,06
L689 x L59	-294,00	-325,90	-310	0,97	-0,92	0,03
L690 x L59	-523,3	-220,00	-371,6	-0,39	2,2	0,9
L691 x L59	74,06	-13,26	30,4	-2,56	-3,24	-2,9
L692 x L59	-105,00	112,38	3,71	-0,28	0,76	0,24
L693 x L59	168,62	-206,30	-18,84	0,22	2,28	1,25
L694 x L59	-105,30	-360,20	-232,7	-0,94	-6,22	-3,58
L695 x L59	249,14	-508,60	-129,7	2,27	2,28	2,28
L696 x L59	194,35	427,98	311,17	-1,1	-0,41	-0,76
L681 x L70	426,33	-168,30	129,03	0,76	0,09	0,42
L682 x L70	-494,30	15,71	-239,3	2,37	1,15	1,76
L683 x L70	47,95	640,79	344,37	1,97	1,04	1,51
L684 x L70	-90,19	-99,88	-95,03	-4,41	-3,1	-3,76
L685 x L70	-146,70	-483,90	-315,3	0,51	1,63	1,07
L686 x L70	98,15	-710,90	-306,4	-0,69	1,82	0,57
L688 x L70	80,08	-491,40	-205,7	-0,78	-0,57	-0,68
L689 x L70	-187,70	146,14	-20,77	-0,25	-1,73	-0,99
L690 x L70	-242,30	48,11	-97,07	-1,21	-1,58	-1,4
L691 x L70	-49,38	397,49	174,05	-0,75	1,01	0,13
L692 x L70	281,80	150,80	216,3	0,87	-0,84	0,02
L693 x L70	188,89	-151,10	18,91	-0,83	1,05	0,11
L694 x L70	331,41	566,03	448,72	4,15	1,53	2,84
L695 x L70	-242,70	-509,60	-376,2	1,33	1,92	1,62
L696 x L70	-1,46	649,93	324,23	-3,04	-3,39	-3,21
L681 x P7	96,03	451,07	273,55	-1,76	-2,18	-1,97
L682 x P7	-137,70	214,82	38,58	0,26	-0,17	0,05
L683 x P7	83,81	-431,30	-173,8	0,02	2,31	1,16
L684 x P7	430,83	-112,20	159,32	0,32	-6,97	-3,33
L685 x P7	-272,6	-212,20	-242,4	-0,62	0,99	0,18
L686 x P7	-111,10	300,80	94,85	0,79	-0,16	0,31
L688 x P7	-127,20	77,37	-24,89	1,67	-0,15	0,76
L689 x P7	349,05	-4,16	172,44	0,44	0,61	0,53
L690 x P7	204,14	517,08	360,61	-2,08	0,09	-0,99
L691 x P7	-36,19	-43,44	-39,82	0,05	0,99	0,52
L692 x P7	-32,48	-177,50	-105	-1,33	1,08	-0,12
L693 x P7	190,49	-70,08	60,2	0,33	-1,32	-0,49
L694 x P7	-198,60	-210,60	-204,6	-1,18	1,39	0,1
L695 x P7	-171,50	334,81	81,65	0,61	0,35	0,48

Tabela suplementar 4. Cont.

Híbrido	RG			CE		
	Campos	Itaocara	Média	Campos	Itaocara	Média
L696 x P7	-267,00	-634,50	-450,8	2,47	3,14	2,8
L681 x L54	148,18	-230,50	-41,17	-0,1	0,01	-0,04
L682 x L54	32,15	65,96	49,06	-0,96	0,1	-0,43
L683 x L54	-408,30	-257,40	-332,9	-0,5	0,11	-0,19
L684 x L54	-130,40	146,86	8,22	2,41	5,65	4,03
L685 x L54	264,03	-550,60	-143,3	1,03	1,54	1,28
L686 x L54	-64,07	36,44	-13,82	-1,66	-1,75	-1,71
L688 x L54	239,50	552,97	396,24	4,58	0,92	2,75
L689 x L54	-45,90	203,38	78,74	-0,33	1,41	0,54
L690 x L54	802,44	-81,15	360,64	0,53	-4,39	-1,93
L691 x L54	-195,80	-12,00	-103,9	-1	-3,18	-2,09
L692 x L54	-508,50	111,60	-198,5	3,04	2,96	3
L693 x L54	-432,30	-386,60	-409,5	-1,08	-1	-1,04
L694 x L54	-361,10	157,85	-101,6	-1,05	0,42	-0,32
L695 x L54	718,39	633,94	676,16	-4,13	-4,62	-4,38
L696 x L54	-58,28	-390,70	-224,5	-0,77	1,83	0,53
L681 x L75	17,50	-214,00	-98,23	2,18	1,54	1,86
L682 x L75	686,93	453,36	570,15	-1,58	-1,46	-1,52
L683 x L75	-249,80	136,22	-56,78	-0,93	-3,21	-2,07
L684 x L75	-88,20	472,66	192,23	2	3,17	2,58
L685 x L75	285,90	529,15	407,53	-1,08	0	-0,54
L686 x L75	-88,46	-446,60	-267,5	-1,4	-1,57	-1,48
L688 x L75	-161,40	121,44	-19,96	-4,3	-1,08	-2,69
L689 x L75	195,25	-90,29	52,48	1,41	1,18	1,3
L690 x L75	-736,30	-629,60	-683	1,53	1,81	1,67
L691 x L75	137,30	-452,80	-157,8	3,36	3,5	3,43
L692 x L75	310,89	95,69	203,29	-0,75	-3,77	-2,26
L693 x L75	58,49	-83,31	-12,41	-0,22	-0,78	-0,5
L694 x L75	-236,00	-170,60	-203,3	-1,5	1,73	0,12
L695 x L75	-484,20	413,86	-35,18	-0,75	-1,41	-1,08
L696 x L75	352,04	-135,20	108,44	2,02	0,35	1,19
L681 x L80	-347,10	-119,90	-233,5	-1,29	-1,4	-1,34
L682 x L80	-281,20	-286,90	-284	0,79	-0,78	0,01
L683 x L80	569,34	-72,72	248,31	-1,3	-1,93	-1,61
L684 x L80	-436,20	-818,00	-627,1	-0,57	1,8	0,61
L685 x L80	-455,30	281,76	-86,76	-1,19	-0,4	-0,8
L686 x L80	-128,20	452,44	162,14	2,61	1,2	1,9
L688 x L80	369,94	-337,10	16,44	-0,97	-1,45	-1,21
L689 x L80	-16,67	70,85	27,09	-2,24	-0,56	-1,4
L690 x L80	495,23	365,58	430,4	1,62	1,87	1,75
L691 x L80	70,01	124,05	97,03	0,9	0,93	0,92
L692 x L80	53,29	-293,00	-119,9	-1,56	-0,19	-0,87
L693 x L80	-174,20	897,38	361,61	1,58	-0,23	0,68
L694 x L80	569,54	17,49	293,51	0,53	1,15	0,84
L695 x L80	-69,08	-364,40	-216,7	0,68	1,49	1,08
L696 x L80	-219,60	82,48	-68,57	0,42	-1,51	-0,55