

VERANICE SILVIANE BORGES ALVES

EFICIÊNCIA DE GENÓTIPOS DE SOJA NO USO DO FÓSFORO

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Agronomia – Mestrado, área de concentração em Fitotecnia, para obtenção do título de “Mestre”.

Orientadora

Prof^a. Dr^a. Ana Paula Oliveira Nogueira

Co-orientadora

Prof^a. Dr^a. Regina Maria Quintão Lana

UBERLÂNDIA
MINAS GERAIS – BRASIL
2018

VERANICE SILVIANE BORGES ALVES

EFICIÊNCIA DE GENÓTIPOS DE SOJA NO USO DO FÓSFORO

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Agronomia – Mestrado, área de concentração em Fitotecnia, para obtenção do título de “Mestre”.

APROVADA em 28 de Fevereiro de 2018.

Profa. Dra. Roberta Camargos de Oliveira UFS

Prof. Dr. Oswaldo Toshiyuki Hamawaki UFU

Dr. Marcos Vieira de Faria UFU

Prof. Dr^a. Ana Paula Oliveira Nogueira
INGEB-UFU
(Orientadora)

UBERLÂNDIA
MINAS GERAIS – BRASIL
2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

A474e Alves, Veranice Silviane Borges, 1992
2018 Eficiência de genótipos de soja no uso do fósforo / Veranice Silviane
Borges Alves. - 2018.
70 f. : il.

Orientadora: Ana Paula Oliveira Nogueira.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-Graduação em Agronomia.
Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2018.781>
Inclui bibliografia.

1. Agronomia - Teses. 2. Soja - Melhoramento genético - Teses. 3.
Fósforo - Teses. 4. Solo- Fósforo - Teses. I. Nogueira, Ana Paula
Oliveira. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-
Graduação em Agronomia. III. Título.

CDU: 631

Angela Aparecida Vicentini Tzi Tziboy – CRB-6/947

À deus,
À minha família,
Ao meu namorado, Valter Lorrán.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

À Deus pelo amor incondicional e pelos milagres que tem feito em minha vida.

Aos meus pais Léo e Vera por todo o amor, apoio e por sempre terem acreditado na minha capacidade. Aos meus irmãos por terem me amparado, me ouvido e sempre me incentivado.

Ao meu namorado Valter Lorrán pela compreensão, por ter me dado forças e por tudo que tem feito por mim e por nós, desde quando entrou na minha vida.

À universidade Federal de Uberlândia e ao Programa de Pós Graduação em Agronomia pela oportunidade.

À professora Dra. Ana Paula Oliveira Nogueira por ter me acolhido como orientanda, por ter compreendido as minhas dificuldades e por todos os ensinamentos.

À professora Dra. Regina Maria Quintão Lana pela coorientação, pela disposição que sempre teve em ajudar e por todos os conhecimentos transmitidos durante esse tempo.

Ao Dr. Marcos por todo o apoio e orientação durante o desenvolvimento do experimento.

Ao professor Dr. Oswaldo Hamawaki pela oportunidade de participar do programa de melhoramento de soja da UFU.

A professora Dra. Roberta Camargos de Oliveira por ter aceitado o convite para participar da banca examinadora e por todos os conhecimentos transmitidos naquela ocasião.

A todos os meus colegas do programa de melhoramento pela ajuda na condução do experimento, principalmente na etapa final. Em especial a Fernanda, Flaviani, Renato e Makyslano.

À equipe do laboratório de Solos pela ajuda e disponibilidade de materiais.

Aos profissionais da fazenda Capim Branco, especialmente ao “Lukinha”, Frederico e Ramon por todo o auxílio prestado.

Aos colegas de trabalho da Bayer que foram fundamentais para o meu aprimoramento profissional.

A todos que contribuíram para essa realização.

MUITO OBRIGADA!

SUMÁRIO

RESUMO	i
ABSTRACT	ii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 Classificação botânica e morfologia da soja	4
2.2 Importância Econômica, Origem e Expansão da soja	5
2.3 Fatores que influenciam a produtividade de grãos em soja	7
2.3.1 Fatores climáticos	7
2.3.2 Manejo da cultura	8
2.3.3 Fatores nutricionais	9
2.4 Eficiência no uso de nutrientes.....	13
2.5 Melhoramento para eficiência no uso de fósforo	17
2.6 Diversidade genética em soja	20
3. MATERIAL E MÉTODOS	23
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
5. CONCLUSÕES	49
6. REFERÊNCIAS	50

RESUMO

ALVES, VERANICE SILVIANE BORGES. **Eficiência de genótipos de soja no uso do fósforo**. 2018, 70 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Fitotecnia) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil¹.

O desenvolvimento de cultivares eficientes no uso do fósforo (P) é a alternativa para reduzir os custos com adubação fosfatada nas regiões tropicais. O objetivo deste trabalho foi caracterizar genótipos de soja quanto a eficiência no uso de fósforo para fins de seleção de genitores. O experimento foi conduzido em campo entre os meses de dezembro de 2016 a abril de 2017. Os fatores estudados foram oito genótipos de soja (UFUS 8710, UFUS Xavante, UFUS Milionária, UFUS 7910, UFUS 8301, UFUS 6901, UFUS 7415 e UFUS 7401) e 4 doses de P (30, 60, 90 e 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅). Avaliaram-se as seguintes características: altura da planta no florescimento (APF) e maturação (APM); número de nós no florescimento (NNF) e maturação (NNM); índice SPAD; acúmulo de massa da matéria seca na parte aérea (MS) e dos nutrientes: fósforo (P), potássio (K), Cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S); eficiência na absorção de fósforo (EAP); eficiência na utilização interna de fósforo (EUtP) e eficiência no uso de fósforo (EUP). Os dados foram submetidos à análise de variância e, em seguida procedeu o agrupamento de médias pelo teste de Scott Knott. Estimaram-se a distância generalizada de Mahalanobis entre os pares de genótipos, e em seguida obteve-se o dendrograma pelo método UPGMA e pelo Tocher. As análises revelaram existência de variabilidade genética entre os genótipos para quase todas as variáveis analisadas. O genótipo UFUS 6901 é eficiente na absorção e no uso do fósforo, enquanto UFUS 8710 é eficiente na utilização interna desse nutriente. As maiores dissimilaridades foram verificadas entre estes genótipos e entre UFUS 6901 e UFUS Milionária, portanto, esses são potenciais para hibridações visando eficiência em P em termos de desenvolvimento vegetal, sendo as hibridações UFUS 6901 x UFUS Milionária e UFUS 6901 x UFUS 8710 as mais recomendadas. A dose de P correspondente a 50% da recomendada para solos de disponibilidade muito baixa desse elemento é a mais favorável para a seleção de genitores eficientes, pois revelou a máxima dissimilaridade genética entre os genótipos.

Palavras-Chave: melhoramento genético, diversidade genética, acúmulo de nutrientes.

¹Orientadora: Ana Paula Oliveira Nogueira- UFU.

ABSTRACT

ALVES, VERANICE SILVIANE BORGES. **Efficiency of soybean genotypes in the use of phosphorus**, 2018, 70 p. Dissertation (Master Program Agronomy/Crop Science) - Federal University of Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais, Brazil.¹

The development of efficient cultivars in the use of phosphorus (P) is the alternative to reduce costs with phosphate fertilization in tropical regions. The objective of this work was to characterize soybean genotypes regarding phosphorus efficiency for the selection of parents. The experiment was conducted in the field between December 2016 and April 2017. The factors studied were eight soybean genotypes (UFUS 8710, UFUS Xavante, UFUS Milionária, UFUS 7910, UFUS 8301, UFUS 6901, UFUS 7415 and UFUS 7401) and 4 doses of P (30, 60, 90 and 120 kg ha⁻¹ of P₂O₅). The following characteristics were evaluated: plant height at flowering (APF) and maturity (APM); number of nodes in flowering (NNF) and maturity (NNM); SPAD index; (P), potassium (K), calcium (Ca), magnesium (Mg) and sulfur (S); phosphorus absorption efficiency (EAP); efficiency in the internal use of phosphorus (EUtP) and efficiency in the use of phosphorus (EUP). The data were submitted to analysis of variance and then the grouping of means by the Scott Knott test. The generalized distance of Mahalanobis was estimated between pairs of genotypes, and then the dendrogram was obtained by UPGMA method and by Tocher. The analyzes revealed the existence of genetic variability among the genotypes for almost all analyzed variables. The genotype UFUS 6901 is efficient in the absorption and the use of phosphorus, while UFUS 8710 is efficient in the internal use of this nutrient. The greatest dissimilarities were verified between these genotypes and between UFUS 6901 and UFUS Millionaire, therefore, these are potentials for hybridizations aimed at efficiency in P in terms of plant development, being the hybridizations UFUS 6901 x UFUS Milionária and UFUS 6901 x UFUS 8710 the most recommended. The dose of P corresponding to 50% of that recommended for soils of very low availability of this element is the most favorable for the selection of efficient parents, as it revealed the maximum genetic dissimilarity among the genotypes.

Key words: genetic diversity, nutrient accumulation, genetic improvement.

¹Advisor: Ana Paula Oliveira Nogueira.

1. INTRODUÇÃO

A soja [*Glycine max* (L.) Merrill], originária da Ásia, na região do nordeste da China, é considerada uma das culturas de maior importância econômica mundial, com ampla adaptação aos climas tropicais e subtropicais (BEZERRA et al., 2015). O seu cultivo expandiu-se para o Ocidente no final do século XV, e no final do século XVII e início do século XVIII foi levada para a América (FEDERIZZI, 2005; CHUNG; SINGH, 2008; MISSÃO, 2008; SEDIYAMA, 2009). No Brasil, foi introduzida na Bahia em 1882 (SEDIYAMA; SILVA; BORÉM, 2015), mas o primeiro cultivo comercial foi na região Sul em 1914 (DALL'AGNOL, 2016).

Até o final da década de 70 mais de 80% da soja produzida no Brasil era cultivada na região Sul, por volta dos anos 80 e 90, após a sua introdução na região central do país, houve uma rápida expansão da produção (DALL'AGNOL, 2016). Hoje, as regiões Centro-Oeste e Sudeste respondem por mais de 51% da área cultivada, enquanto a região Sul representa cerca de 33% da produção (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO, 2018).

A expansão da soja para a região central do Brasil, inclusive para a região do bioma Cerrado, ocorreu graças ao desenvolvimento de cultivares adaptadas à baixas latitudes (SMALING et al., 2008) e às tecnologias de produção, tais como o manejo da fertilidade dos solos e a mecanização das lavouras (FREITAS, 2011). O manejo da fertilidade foi de fundamental importância, haja vista que os solos do bioma Cerrado apresentam elevada acidez e baixa disponibilidade de nutrientes, com destaque para o elemento fósforo (P), que é um nutriente essencial para as plantas e demandado em grandes quantidades.

O fósforo participa de vários processos metabólicos na planta (VANCE et al., 2003), a sua deficiência influencia todas as fases de desenvolvimento da soja, causa redução do porte da planta, altura de inserção das primeiras vagens, da produção de flores e ocasiona aborto desses órgãos (TANAKA; MASCARENHAS 1992, VENTIMIGLIA et al., 1999), conseqüentemente reduz a produtividade de grãos. Além disso, a deficiência desse elemento provoca atraso na maturação e redução da qualidade de sementes (HYLAND et al., 2005).

Devido a elevada acidez dos solos do cerrado, há grandes concentrações de óxidos e hidróxidos de Ferro (Fe) e Alumínio (Al) que interagem com o P, tornando-o indisponível para as plantas (PINTO, 2012). Em função disso, embora exista de 100 a

2500 kg ha⁻¹ desse elemento na camada arável, somente de 0,1 e 1,0 kg ha⁻¹ encontra-se disponível para as plantas (FURTINI NETO et al., 2001).

Diante disso, para atender a demanda das culturas que estão cada vez mais produtivas e mais exigentes, são necessárias grandes quantidades de fertilizantes fosfatados, o que aumenta os custos de produção. Na cultura da soja, entre os anos-safra 2007/08 e 2015/16, os fertilizantes representaram o maior custo de produção, com média histórica de 27,82% e com valores mais elevados nas regiões do cerrado, devido às condições de baixa fertilidade dos solos (CONAB, 2016).

Entretanto, em condições de solos com baixa fertilidade, as plantas podem desenvolver estratégias de adaptação que culminam em uma maior eficiência no uso do nutriente escasso, entre as quais destacam-se: modificações radiculares, associação com microrganismos, modificações no microambiente da rizosfera e distribuição e remobilização do nutriente na parte aérea (PARENTONI et al., 2011). Uma das mais importantes modificações na rizosfera é a exsudação de ácidos orgânicos que solubilizam o P, tornando-o disponível para as plantas (CHIEN; MENON, 1995).

A eficiência no uso de nutriente se baseia em processos pelos quais as plantas absorvem, translocam, acumulam e usam esse nutriente para melhor produção de matéria seca e/ou grãos em condições de deficiência (PAULA, 2016). Para o elemento fósforo, outros conceitos já foram indicados, tais como maior acúmulo desse elemento em condições de deficiência (CLARK; BROWN, 1974), e o maior acúmulo de matéria seca por unidade de nutriente acumulado (GERLOFF, 1976; MARSCHNER, 2012).

As peculiaridades inerentes às plantas que permitem um melhor uso de nutrientes podem ser utilizadas no melhoramento genético afim de desenvolver cultivares eficientes no uso de nutrientes, que poderão ser recomendadas em função da disponibilidade desse nutriente do solo. Sendo que, para solos de baixa fertilidade, as cultivares mais eficientes são mais viáveis, ao passo que para solos de fertilidade média a alta, as mais responsivas são mais indicadas, haja vista os ganhos em produtividade que poderão ser alcançados.

Otimizar o uso de nutrientes por meio de genótipos eficientes é uma excelente alternativa para uma produção sustentável, além de permitir uma maior competitividade da produção. Contudo, para que sejam desenvolvidas cultivares eficientes, é necessário o conhecimento da diversidade genética que existe para essa característica dentro do germoplasma. O conhecimento dessa variabilidade permitirá os programas de melhoramento direcionarem as hibridações visando desenvolver populações segregantes com variabilidade genética.

Avaliar a variabilidade genética disponível no germoplasma para a eficiência e uso de P é um ponto importante a ser considerado, pois a maioria das técnicas utilizadas ainda não é efetiva na identificação de mecanismos desenvolvidos pelas plantas em condições naturais de campo (SILVA, 2012). A identificação de diferenças genéticas tem sido alvo de projetos em genética com ênfase em nutrição de plantas e, a incorporação dessa variabilidade pode aumentar a adaptabilidade e produtividade das cultivares (BLISS, 1981).

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi caracterizar genótipos de soja quanto a eficiência no uso de fósforo para fins de seleção de genitores.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Classificação botânica e morfologia da soja

A soja [*Glycine max* (L.) Merrill] é considerada uma das culturas agrícolas mais importantes no mundo. Originada de clima temperado, possui ampla adaptação aos climas subtropicais e tropicais (BEZERRA et al., 2015). É uma planta anual, dicotiledônea, pertence ao reino Plantae, divisão Magnoliophyta, classe Magnoliopsida, ordem Fabales, família Fabaceae, Subfamília Faboideaem e gênero *Glycine* (SEDIYAMA et al., 2009).

A soja possui grande diversificação genética e morfológica, mas a evolução tornou a espécie cultivada muito diferente dos seus ancestrais. A espécie cultivada é uma planta herbácea, ereta e ramificada, com altura entre 0,3 e 2,0 metros e ciclo de 80 a 200 dias. Possui raiz pivotante, hastes com pubescência e apresenta três tipos de folha: cotiledonares, unifolioladas ou primordiais e trifolioladas, sendo duas cotiledonares, duas unifolioladas e as trifolioladas, que constituem todas as demais folhas da planta. As flores são completas e desenvolvem em rácermos terminais ou axilares e em número, podendo variar de 2 a 35 por rácermo. Sua coloração pode ser branca ou roxa, com tons variados de roxo, sendo esta relacionada com a coloração do hipocótilo (MULLER, 1981; SEDIYAMA et al., 1985; NOGUEIRA et al., 2009).

A vagem da soja possui coloração verde até a maturação, após esse estágio adquire a coloração típica da cultivar, podendo ser amarelo-palha, marrom ou preta, sendo influenciada pela presença de caroteno ou xantofila; bem como, pela presença ou ausência de antocianina, além das condições ambientais (DESTRO et al., 1990). O comprimento da vagem na maturação varia de 2 a 7 cm e a largura de 1 a 2 cm. O número de sementes por vagem varia de 1 a 5. A semente normalmente possui forma esférica e aplanada, às vezes alongada ou ovalada, com peso entre 2 a 30 g para cada 100 sementes. O tegumento pode apresentar as colorações amarelo, verde, marrom ou preto, com aspecto brilhante ou fosco (SEDIYAMA, 2013).

Quanto aos tipos de crescimento, a soja pode apresentar crescimento determinado, semideterminado e indeterminado. Os tipos determinado e semideterminado possuem inflorescência racemosa terminal e no florescimento possuem respectivamente 90% e 70% da altura e matéria seca final. Por outro lado, as plantas de tipo indeterminado produzem apenas inflorescência axilar, a gema terminal apresenta atividade vegetativa,

que ocasiona um aumento na estatura até o início do enchimento de grãos (MULLER, 1981; NOGUEIRA, 2007; SEDIYAMA et al., 2005; BAIGORRI; GASSEN, 2009).

2.2. Importância econômica, Origem e Expansão da soja

Considerada uma das culturas mais antigas do mundo, a soja cultivada é originária do continente Asiático, seu centro de origem e domesticação é a China, onde crescia em terras baixas e úmidas (FEDERIZZI, 2005). A primeira referência do cultivo da soja data de mais de 5000 anos atrás, por volta de três mil anos espalhou-se no continente asiático e começou a ser usada para o consumo humano (MELO, 2005).

Durante muito tempo a soja ficou restrita a região do Oriente, somente no final do século XV e início do século XVII foi introduzida no Ocidente, de onde foi levada para diversos países da Europa. Chegou na América no final do século XVII e início do século XVIII, onde iniciou seu cultivo em 1804, na Pensilvânia. Até 1940 era utilizada como forrageira, a partir de 1941 o cultivo para grãos superou a forragem (FEDERIZZI, 2005; CHUNG; SINGH, 2008; MISSÃO, 2008; SEDIYAMA, 2009).

No Brasil, a soja foi introduzida no estado da Bahia em 1882, trazida dos Estados Unidos. No ano de 1891, foram conduzidos os primeiros ensaios no Instituto Agrônomo de Campinas visando avaliar cultivares. No início do século XX iniciou o cultivo no estado do Rio Grande do Sul, onde se adaptou muito bem devido à localização geográfica de latitude parecida com a região sul dos EUA (MIYASAKA; MEDINA, 1981).

Inicialmente, a soja era estudada e utilizada somente como uma cultura forrageira e a produção de grãos era mais usada para alimentação animal. A produção comercial de grãos iniciou por volta de 1935 e adquiriu alguma importância econômica somente no final dos anos 40. Até a década de 1950, o aumento da produção de soja no país ocorreu somente devido ao crescimento da área (SEDIYAMA et al., 2009; EMBRAPA, 2004), pois não existiam tecnologias para o manejo da lavoura visando aumento na produtividade.

Durante muito tempo o Cerrado brasileiro era considerado uma área improdutivo, devido as características de elevada acidez e baixa fertilidade dos solos (MARIANO, 2010). Para a cultura da soja, outro fator que limitava a produção nas regiões de baixas latitudes era o fotoperíodo, que era considerado inadequado para a cultura, pois a planta era induzida ao florescimento precocemente, resultando em baixa produção.

Por volta da década de 1960 surgiram políticas governamentais e instituições de pesquisa que incentivaram a produção agrícola nacional. Foram implantados programas de melhoramento que desenvolveram cultivares com o caráter de período juvenil longo, que retarda o florescimento mesmo em condições de fotoperíodo indutor, essa característica possibilitou o cultivo da soja em regiões de baixas latitudes (KIIHL; GARCIA, 1989; SMALING et al., 2008; SEDIYAMA et al., 2009). Além das cultivares adaptadas, o manejo da fertilidade dos solos e a mecanização das lavouras foram fundamentais para o cultivo em baixas latitudes e para a expansão da soja para a região do Cerrado (SMALING et al., 2008; QUEIROZ, 2009).

Até meados da década de 1970, cerca de 80% da soja produzida no Brasil era cultivada na região Sul (MARTINEZ et al., 2016), hoje a maior parte da produção está concentrada no Cerrado. As regiões Centro-Oeste e Sudeste, com predomínio do Cerrado, respondem por mais de 51% da área cultivada com soja no país, enquanto a região Sul representa cerca de 33% do total (CONAB, 2017a). Nos últimos anos, a soja passou a ser cultivada em quase todos os estados do país, a expansão continua no bioma Cerrado, na região Mapitoba, que envolve os estados Maranhão, Piauí, Tocantins e Bahia, no Norte e Nordeste do país, considerada a mais nova fronteira agrícola (RUFO, 2016).

O complexo soja é de grande importância na balança comercial brasileira, sendo utilizada para diversas finalidades e também na alimentação humana e animal, além de ser uma importante fonte de matéria-prima para agroindústrias. Possui uma composição química quase completa para alimentação, pois é fornecedor de proteínas, ácidos graxos saturados e insaturados, algumas vitaminas e composto polifenólicos, tais como as isoflavonas (ÁVILA et al., 2007; SEDIYAMA et al., 2009). O grão de soja é composto em média 40% de proteínas e 20% de óleo, isso faz da cultura uma importante fonte proteica para complementação da dieta (BEZERRA, 2015).

Os maiores produtores mundiais de soja são Estados Unidos, Brasil e Argentina. A produção mundial na safra 2016/2017 foi de 351,3 milhões de toneladas, em uma área plantada de 120,9 milhões de hectares (DEPARTAMENTO DE AGRICULTURA DOS ESTADOS UNIDOS, 2017). Os Estados Unidos é responsável por cerca de 35% da produção de soja do mundo, o Brasil representa 30% e a Argentina com 17%, juntos respondem por quase 83% da produção mundial (USDA, 2017).

Na safra de 2017, o Brasil alcançou uma produção de 114,1 milhões de toneladas, em 33,9 milhões de hectares cultivados, com produtividade média de 3364,0 kg ha⁻¹ (CONAB, 2018). A região Centro-Oeste é a principal produtora de soja do país, o estado

Mato Grosso é o maior produtor nacional com uma produção de 29082,5 mil toneladas, o segundo é o Paraná com produção de 17024,9 mil toneladas, seguido do Rio Grande do Sul com 17024,9 mil toneladas (CONAB, 2017).

O uso de tecnologias de produção e a expansão das fronteiras agrícolas produtivas criou um cenário promissor para o Brasil, que elevou o país a um patamar de potência agrícola mundial, gerando desenvolvimento em diversas cidades dos estados que hoje são os maiores produtores do país (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO AGRONEGÓCIO, 2017).

2.3. Fatores que influenciam a produtividade de grãos em soja

A produtividade da soja é afetada por fatores genéticos e ambientais. Entre os fatores genéticos destacam-se adaptação ao clima de cultivo (MELO, 2014), resistência a insetos, pragas e doenças (VERNETTI et al., 2009), e produtividade de grãos (KRZYZANOWSKI et al., 2008). Dos fatores ambientais destacam-se o manejo da cultura, as condições nutricionais do solo e o clima, sendo que neste incluem a temperatura, o fotoperíodo e a disponibilidade hídrica (FARIAS, 2007). Contudo, para obter qualidade e boa produtividade da soja, é necessário que as cultivares tenham potencial genético e que os fatores ambientais estejam ideais durante as fases de desenvolvimento e produção da cultura.

2.3.1 Fatores climáticos

A temperatura necessária para que a soja se desenvolva está entre 20°C e 30°C, sendo 30°C a mais adequada. Na maturação, temperaturas mais altas, bem como excesso de umidade, contribuem para redução da qualidade do grão. Baixas temperaturas e período chuvoso no estágio final da cultura podem provocar atraso na colheita, haste verde e retenção foliar. A floração é induzida em condições acima de 13°C, abaixo de 10°C e acima de 40°C ocasiona danos à cultura. Quanto à temperatura do solo, a faixa ideal pode variar de 20 a 30°C, sendo 25°C a temperatura ideal para uma boa emergência (FARIAS, 2007; EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, 2013).

A soja é considerada uma planta de dias curtos, que é induzida ao florescimento em condições de fotoperíodo menor ou igual ao fotoperíodo crítico inerente ao genótipo (SILVA; SEDIYAMA; BORÉM, 2015). Mas existem genótipos de período juvenil curto,

que são induzidos ao florescimento quando o fotoperíodo é menor que crítico da cultivar, e de período juvenil longo, com fase vegetativa insensível ao fotoperíodo, sendo induzidos ao florescimento somente a partir do estágio V5 (SEDIYAMA et al., 2016).

A exigência hídrica é um dos fatores que mais ocasiona variabilidade de rendimentos de grãos. A disponibilidade de água é importante principalmente na fase de germinação e emergência, floração e enchimento de grãos. A soja exige de 450 a 800 mm de precipitação durante todo o ciclo. O excesso e o déficit de água reduz a qualidade e a produtividade de grãos. A exigência hídrica aumenta com o desenvolvimento da planta, atinge o máximo na floração e enchimento de grãos, exigindo nesse período de 1 a 8 mm dia⁻¹ (CÂMARA, 2000; FARIAS, 2007; EMBRAPA, 2013).

2.3.2 Manejo da cultura

O manejo cultural é um dos fatores mais importantes para um bom desempenho da cultura, pois as cultivares com alto potencial genético exigem um bom manejo para atingir alta produtividade de grãos. O manejo da cultura vai desde o preparo do solo até a colheita e quando adotado no momento certo, reduz os custos de produção e possibilita uma maior eficiência do sistema produtivo.

O manejo do solo visa proporcionar condições favoráveis à sementeira e ao desenvolvimento e produção das plantas, podendo ser do tipo convencional, mínimo ou em sistema de plantio direto, devendo ser utilizado a rotação de culturas. Outra prática importante é a correção e manutenção da fertilidade do solo através da prática de calagem e adubação. A adubação deve ser realizada via solo e, para os micronutrientes cobalto e molibdênio, é recomendada a aplicação via foliar (EMBRAPA, 2013). Durante o desenvolvimento da soja, também deve ser feito o manejo fitossanitário com o objetivo de controlar plantas daninhas, microrganismos e pragas que poderão ocorrer na cultura (EMBRAPA, 2013).

1.3.3 Exigência nutricional

Fatores edáficos, tais como compactação, pH e disponibilidade de nutrientes, influenciam o desenvolvimento da cultura. O pH do solo ideal para o cultivo da soja está entre 5,0 e 6,0 (DECICINO, 2016). O pH afeta a disponibilidade de nutrientes no solo, de modo que, abaixo ou acima da faixa ideal para a cultura, o aproveitamento de nutrientes diminui, podendo comprometer a produtividade (FAQUIN, 2005).

O fósforo (P) é um nutriente essencial para as plantas por estar diretamente envolvido no seu metabolismo, é constituinte de várias moléculas e participa de reações. Na ausência desse elemento a planta não consegue completar seu ciclo, pois nenhum outro nutriente é capaz de substituí-lo (ARNON; STOUT, 1939). Os processos metabólicos que envolvem o P são vários, entre os quais destacam-se: transferência de energia (ATP), respiração, síntese de ácidos nucleicos e glicose, síntese e estabilidade de membrana (fosfolipídios), ativação e desativação de enzimas e o processo de fotossíntese (VANCE et al., 2003).

O crescimento e produtividade das plantas dependem da fotossíntese, a qual depende da disponibilidade de fósforo (VENEKLAAS et al., 2012). A maior parte do núcleo das células vegetais possui P, por isso, é necessário um contínuo suprimento desse nutriente para que ocorra a divisão celular, é essencial para a absorção de água e nutrientes do solo e portanto, para o crescimento e desenvolvimento da planta (DEITH et al., 2005).

Segundo Uexkull e Mutert (1995) cerca de 30% de toda área terrestre e 50% das terras agricultáveis do mundo possuem solos ácidos, que são deficientes em nutrientes essenciais, tal como o fósforo (P) (KOCHIAN et al., 2004). Em geral, os solos podem apresentar de 100 a 2500 kg ha⁻¹ de fósforo total na camada arável, porém, a concentração na solução do solo é muito baixa, entre 0,1 e 1,0 kg ha⁻¹ (FURTINI NETO et al., 2001). Isso ocorre devido a dinâmica complexa que esse elemento apresenta nos solos, principalmente nos mais intemperizados, tais como os predominantes no Cerrado, esses possuem elevada acidez e grandes concentrações de óxidos e hidróxidos de Ferro (Fe) e Alumínio (Al), que interagem com P, formando fosfatos de ferro e alumínio, compostos indisponíveis para as plantas (PINTO, 2012).

Os solos altamente intemperizados, como é o caso de Latossolos da região do Cerrado, possuem elevada capacidade de reter o fósforo devido a sua eletropositividade, que favorece a adsorção do íon fosfato que possui carga negativa no solo (NOVAIS et al., 2007). Esse processo de adsorção tem uma fase inicial rápida, ocorre uma atração eletrostática, seguida pela adsorção por óxidos por meio da troca de ligantes (LABOSKI; LAMB, 2003). Em solos com balanço de carga líquida positiva, a adsorção de fosfato aumenta a quantidade de cargas negativas e diminui o excedente de cargas positivas existentes, aumenta a atração eletrostática entre as partículas e diminui a dispersão até o ponto em que o balanço de carga é zero (SILVA et al., 2001), a partir do qual a adsorção de fósforo favorece a desagregação do solo (LIMA et al., 2000).

As principais fontes de fornecimento de fósforo para o solo são os adubos, tais como o superfosfato simples, superfosfato triplo e fosfatos monoamônicos (SILVA et al. 2016a). A aplicação de adubos destina-se a cobrir a diferença que existe entre a exigência da cultura e a quantidade que é fornecida pelo solo (MALAVOLTA, 2006). Quando não se adiciona P nos solos de Cerrado, as produtividades são muito baixas. As maiores produtividades das culturas são alcançadas quando a disponibilidade de P no solo está na classe adequada ou acima dela, ou seja, com teores de P de 15 mg dm⁻³ a 20 mg dm⁻³. Para que isso ocorra, são necessárias adubações corretivas com doses entre 60 a 400 kg ha⁻¹ de P₂O₅ para solos com teores muito baixos (SOUSA et al., 2016).

Em média, a eficiência de uso de fertilizantes fosfatados tem sido relatada como sendo inferior a 10% (BALIGAR et al., 2001). Assim, é necessário buscar meios para aumentar a eficiência de uso deste nutriente nos sistemas de produção, adotando estratégias além da calagem, afim de avançar para uma produção agrícola mais sustentável (CORDELL et al., 2009; ROY et al., 2016). De acordo com Sousa et al. (2004), em 2001, a região do Cerrado foi responsável por 51% do total de P₂O₅ consumido no Brasil. Entre os anos-safras 2007/08 e 2015/16, os fertilizantes representaram o maior custo de produção para a cultura da soja, com média histórica de 27,82% e com valores mais elevados nas regiões do cerrado, devido as condições físico-químicas dos solos (CONAB, 2016).

No solo, o P pode ser classificado em duas frações: lábil e não lábil e nessas frações pode ser classificado em P inorgânico (Pi) e P orgânico (Po) (MENDES, 2003). O Pi é representado pelo P presente na estrutura dos minerais primários e secundários (precipitados), o P adsorvido, pelos óxidos de Fe e Al e argilominerais, além do P da solução do solo (NUNES, 2014). O Po representa os íons fosfatos ligados aos compostos orgânicos. É mais encontrado na forma de fosfatos de inositol, fosfolipídios e ácidos nucleicos (RHEINHEIMER, 2000) e ocorre em teores proporcionais ao conteúdo de matéria orgânica do solo (RESENDE, 2004).

As formas de fósforo P_i e P_o estão em constante transformação, sendo que as concentrações dependem das características do solo, sendo que o Pi pode ser encontrado em várias formas dependendo do pH do solo, mas somente uma quantidade menor que 1 mg L⁻¹ encontra-se na solução do solo em equilíbrio com o P adsorvido pelos coloides (HAVLIN et al., 1999). O equilíbrio dos compostos no solo depende de sua natureza e de sua interação com a fração mineral (PARENTONI et al., 2011). Em solos mais jovens e ricos em matéria orgânica, esse elemento encontra-se mais disponível na forma orgânica,

enquanto que nos solos mais velhos e intemperizados predominam formas inorgânicas ligadas a fração mineral.

Na solução do solo, o fósforo é encontrado na forma de ânion monovalente (H_2PO_4^-) quando em condições de pH abaixo de 7, acima do qual, predomina a forma de ânion divalente (HPO_4^{2-}) e acima de 9, predomina na forma PO_4^{3-} (DECHEN; NACHTIGALL et al., 2007). Em função das interações com os componentes do solo, o suprimento de fósforo até as raízes das plantas ocorre predominantemente pelo mecanismo de difusão. A absorção desse nutriente pelas plantas cria uma zona de depleção em torno da raiz e os íons difundem-se em função do gradiente de concentração até a superfície radicular (BARBER, 1995).

As plantas absorvem o P na forma inorgânica (H_2PO_4^-) originada tanto da solubilização de minerais fosfatados quanto da mineralização da matéria orgânica (GATIBONI, 2003). Nos tecidos da maioria das plantas, a maior parte do P se encontra na forma inorgânica. As concentrações de P inorgânico armazenadas podem variar em função da disponibilidade externa, já as concentrações de P orgânico ativo metabolicamente tendem a ser mais estáveis (GRANT, 2001).

Quando as plantas estão bem nutridas com P, de 85% a 95% do P inorgânico da planta encontra-se nos vacúolos. Quando há redução no suprimento de P, o valor de P_i é reduzido, o mesmo sai do vacúolo e é redistribuído para os órgãos em crescimento, enquanto o P_o permanece inalterado. Em função da fácil redistribuição do fósforo na planta, os sintomas de deficiência ocorrem inicialmente nas folhas mais velhas (GRANT et al., 2001; FAQUIN, 2005).

No desenvolvimento inicial da planta, o P é responsável por promover o enraizamento, aumentar a resistência das plantas ao frio, melhorar a utilização de água, e contribuir para aumento da resistência a doenças, podendo melhorar a qualidade das culturas (MALAVOLTA, 2006). Quando o fósforo encontra-se disponível junto a semente, pode melhorar desenvolvimento inicial de plântulas de soja (MARIN, 2015) e melhorar o vigor do estande, garantindo uma lavoura mais uniforme e mais produtiva (CORRÊA et al., 2004). Maior concentração de P aumenta a disponibilidade de energia para as atividades metabólicas da semente, podendo favorecer o crescimento inicial das plântulas e melhorar o desenvolvimento do sistema radicular, que resulta em uma melhor absorção de nutrientes (TRIGO et al., 1997).

Por outro lado, a baixa disponibilidade de fósforo no início do ciclo vegetativo das plantas pode acometer o seu desenvolvimento a ponto de não haver possibilidade de

recuperação, mesmo aumentando o suprimento a níveis adequados (GRANT et al., 2001). Os sintomas de deficiência de P incluem redução na altura da planta, atraso na emergência de folhas, redução na brotação e desenvolvimento de raízes secundárias, reduz a produção de matéria seca e a produção de sementes (GRANT et al., 2001). A deficiência de fósforo também pode provocar atraso na maturação e redução na qualidade de sementes (HYLAND et al., 2005).

Na cultura da soja os sintomas de deficiência de P foram descritos por Rosolém e Tavares (2006) como: arroxamento e colapso de pecíolos e amarelecimento de folhas mais velhas, que progride para tons avermelhados e arroxeados. Com a deficiência de P ocorre ainda redução do porte da planta, altura de inserção das primeiras vagens, produção de flores e ocasiona maior aborto dessas estruturas (TANAKA; MASCARENHAS 1992, VENTIMIGLIA et al., 1999). Em solos deficientes, pode haver diminuição de fotoassimilados aos nódulos, reduzindo a fixação e assimilação de nitrogênio pela planta (SÁ; ISRAEL, 1995).

A exigência de P pela soja varia em função do genótipo e do estágio fenológico da cultura. Maiores quantidades são demandadas entre os estádios V4 e R6, com absorção de 0, 2 a 0,4 kg ha⁻¹ dia⁻¹, sendo que do total absorvido, 60% ocorre após o estágio R1 (ROSOLÉM, 1982). A diferença na demanda de fósforo entre cultivares pode ser explicada pela diferença do seu potencial produtivo, de forma que quanto maior a produção maior tende a ser a quantidade de nutriente exportado do solo. Segundo Faquin (2001), a quantidade de nutrientes exigida depende dos teores no material vegetal e da matéria seca produzida, como esses fatores variam, as exigências também o fazem.

O fósforo participa com cerca de 2 g kg⁻¹ da massa da matéria seca das plantas (SCHACHTMAN et al., 1998). Na soja, há uma imobilização média de 20 kg ha⁻¹ de fósforo em toda sua biomassa (NOVAIS et al., 2007). Trabalho realizado por Oliveira Junior et al. (2016) demonstrou variação na taxa de extração e exportação de fósforo em três cultivares de soja, maiores exportações e extrações foram verificadas em genótipos mais produtivos. A cultivar mais produtiva (4000 kg ha⁻¹) extraiu 34 kg ha⁻¹ de P, ao passo que a menos produtiva (3000 kg ha⁻¹) extraiu 14 kg ha⁻¹ desse elemento.

Em relação à produtividade da soja, grande parte dos estudos mostram aumento no rendimento em função de níveis de fósforo, mas por outro lado, alguns não mostram diferença. Marin et al. (2015), em experimento realizado em condições de campo em Latossolo Vermelho-Amarelo, não observaram influência das diferentes doses de fósforo no incremento de produtividade. Por outro lado, em pesquisa realizada em vaso com

solução nutritiva, Rosolém e Tavares (2006) encontraram diferença entre os tratamentos com e sem fósforo, sendo que a produtividade foi prejudicada em condição de deficiência de P na fase reprodutiva.

Sabendo das exigências das culturas quanto ao P e que o solo pode apresentar grande quantidade desse nutriente em formas indisponíveis, a utilização de plantas capazes de melhor aproveitar esse elemento representa uma alternativa sustentável, pois permite produzir em solos de baixa fertilidade, resultando não somente em redução de custos de produção, mas na redução de danos ambientais, tendo em vista as contaminações causadas pelo excesso desse nutriente nos mananciais e a possibilidade de esgotamento das reservas minerais.

2.4 Eficiência no uso de nutrientes

As plantas possuem habilidade de desenvolver estratégias de adaptação que possibilitam uma maior tolerância às condições de baixa fertilidade do solo. O conceito de tolerância a um estresse é bastante amplo, mas está relacionado à capacidade da planta para resistir a condições adversas, sobreviver e reproduzir (MAIA, 2011). Essa habilidade pode ser chamada de tolerância (OLIVEIRA et al., 1999), ou pode ser entendida como eficiência de uso de nutrientes (FRITSCHÉ-NETO et al., 2011). Segundo Paula (2016), a eficiência no uso de nutrientes baseia-se em processos pelos quais as plantas absorvem, translocam, acumulam e usam o nutriente para melhor produção de matéria seca e/ou grãos em condições de baixo nível do nutriente.

Em condições de baixa disponibilidade de recursos minerais, as plantas podem adquirir mecanismos que permitem sua sobrevivência, tais como: especialização, quando se adapta a um ambiente específico; a generalização, quando possui adaptação moderada para a maioria dos ambientes; e a plasticidade fenotípica, quando o ambiente interage com o genótipo e estimula a produção de fenótipos alternativos (MAIA, 2011).

As estratégias de adaptação envolvidas na eficiência no uso de nutrientes incluem modificações radiculares, associação com microrganismos, modificações na rizosfera, distribuição e remobilização do nutriente na parte aérea e a capacidade de manter o metabolismo em baixas concentrações do nutriente no tecido (PARENTONI et al., 2011).

Plantas que crescem em solos pobres em fósforo apresentam sistemas radiculares maiores em relação às plantas crescendo em solos férteis, indicando estratégia adaptativa da planta em direção a maior eficiência de exploração do solo (TERUEL, 2001). Segundo

Fan (2003), a formação de aerênquima também representa uma adaptação útil a baixa disponibilidade de fósforo. Outra estratégia importante são os exsudatos radiculares que algumas plantas podem liberar no solo, que auxiliam na disponibilidade de fósforo.

A composição desses exsudatos varia em função da idade, genótipo, do metabolismo, da condição nutricional, tipo de estresse e outros fatores ambientais (LIU et al., 2004; BAREA et al., 2005; RICHARDSON et al., 2009). Segundo Chien e Menon (1995), os exsudatos incluem ácidos orgânicos e enzimas de fosfatase e podem aumentar a aquisição de P pelas plantas. Os ácidos orgânicos aumentam a disponibilidade de nutrientes no solo, tanto por meio de competição pelos sítios de troca como por complexação de íons indesejáveis (PAVINATO, 2008).

Além desses exsudatos, as estrigolactonas, compostos sinalizadores para colonização de micorrizas, também são importantes (AKIYAMA, 2005), uma vez que as associações micorrízicas representam um papel fundamental na absorção de nutrientes, pois liberam substâncias orgânicas que atuam de forma semelhante aos exsudatos radiculares aumentando a disponibilidade de nutrientes pouco móveis no solo, especialmente o P (BRASIL, 2003). Segundo Fageria (1998b), as adaptações das plantas dependem do ambiente, espécie vegetal, ou até mesmo do genótipo e tornam as plantas mais eficientes no uso de nutrientes.

A eficiência nutricional das plantas pode ser explicada de diversas formas, entretanto, quanto a produção, a eficiência nutricional pode ser definida como a capacidade da planta em produzir alto rendimento em um meio desfavorável (MACHADO et al., 2001). Por outro lado, para requerimento interno de nutriente pela planta, a eficiência nutricional pode ser conceituada como a biomassa produzida por unidade de nutriente aplicada no solo, que depende da eficiência de aquisição e da eficiência de utilização (BAILIAN et al., 1991).

Segundo Israel e Rufty (1988), a eficiência nutricional pode ser entendida como a relação entre a biomassa total e a quantidade do nutriente absorvido pela planta. Já Fageria (1998b) definiu a eficiência nutricional como a quantidade de matéria seca ou grãos produzidos por unidade de nutriente aplicado, sendo essa afetada pela variabilidade genética, crescimento das raízes, micorrizas e fixação biológica de nitrogênio.

A eficiência nutricional para o fósforo é um fenômeno complexo e é influenciado aos mecanismos de aquisição e uso desse elemento em nível celular (OZTURK et al.; 2005). A eficiência no uso do fósforo pode ser dividida em eficiência de absorção, que é a capacidade que um genótipo apresenta em acumular P a partir do nutriente aplicado; e

a eficiência de utilização de P, que é a capacidade de um genótipo em produzir matéria seca por quantidade de P acumulado (MARSCHNER, 2012).

A eficiência no uso do P já foi definida por vários autores, para Clark e Brown (1974), plantas eficientes no uso de P são aquelas capazes de acumular maiores concentrações de fósforo em determinado nível do nutriente aplicado. Já Gerloff (1976) definiu que plantas eficientes no uso de P são aquelas que produzem maior quantidade de matéria seca por unidade do nutriente absorvido, também proposto por Siddiqi e Glass (1981). Castro (2009) evidenciou que a produção de matéria seca e o acúmulo de P foram fundamentais para relacionar as diferenças na eficiência ao P entre clones de batata.

Em estudo desenvolvido por Furlani et al. (1983), a matéria seca da parte aérea e das raízes secas foram as características que mais se relacionaram com a eficiência utilização de P e permitiram a diferenciação de genótipos de arroz em solução nutritiva. Fageria et al. (1981) observaram que genótipos de arroz variaram quanto a capacidade de extração do P do solo quando submetidas a baixo nível desse nutriente e que a produção de massa da parte aérea e grãos secos foram as características que possibilitaram a distinção entre eles em eficientes e não eficientes.

A eficiência no uso de fósforo tem sido avaliada em diversas culturas: feijão (FAGERIA, 1998a), arroz (ROTILI, 2010), milho (PARENTONI, 2000) e soja (REINA, 2014). Em feijão, Oliveira (1987) testou cinco cultivares de feijão em dez níveis de adubação fosfatada e encontrou diferença varietal em função das respostas ao fósforo, sendo que algumas apresentam excelente produção com baixos níveis do nutriente. Fageria (1981) encontrou diferença varietal em arroz quanto à exigência e capacidade de extração de fósforo de solo e mencionou que são necessárias diferentes recomendações de adubação fosfatada no mesmo solo para as diferentes cultivares.

Em soja, Silva (2016b) caracterizou sete genótipos de soja quanto à eficiência no uso de fósforo, submetendo-as a condições contrastantes para fósforo e destacou que em condições de baixa disponibilidade de P a eficiência de utilização foi o componente mais importante da eficiência de uso de P, enquanto em condições de alta disponibilidade de P, a eficiência de absorção deve ser o principal componente da eficiência de uso de P. Procópio (2005), em estudo sobre absorção e utilização do fósforo, encontrou relação inversa entre nível de P no solo e eficiência na utilização desse elemento. Segundo Marschner (1991), em condições de baixa fertilidade plantas adaptadas apresentam, em geral, altas concentrações de P e de outros nutrientes na parte aérea, como estratégia para evitar o estresse nutricional.

Tanto para a eficiência na absorção quanto na utilização deste nutriente, as respostas das plantas à deficiência de P atuam em conjunto e também pode ser observado em alterações a nível moleculares, por exemplo, a ativação de genes relacionados à expressão de RNases, fosfatases, transportadores de Pi, Ca-ATPases, entre outros (RAGHOTHAMA, 1999; BALDWIN et al., 2001; BALDWIN et al.; 2008).

O uso de genótipos eficientes no uso de nutrientes é uma importante estratégia visando reduzir os custos de produção e danos ambientais, principalmente em solos do Cerrado. Nesse contexto, trabalhos visando identificar e desenvolver genótipos mais eficientes no uso de P são cada vez mais importantes para a sustentabilidade da produção agrícola (MENDES et al., 2015). Além da eficiência na utilização, a responsividade dos genótipos também é importante (MENDES, 2011), haja vista as melhorias nas características agronômicas da planta, com incrementos na dose do nutriente (FIDÉLIS, 2017).

Segundo Fidélis et al. (2017), genótipos eficientes podem ser recomendados em função do nível de tecnologia do produtor, sendo os eficientes mais indicados para os cultivos de baixa e média tecnologia, onde são utilizadas pequenas doses de adubação e os responsivos, indicados aos produtores de alta tecnologia, que utilizam altas adubações. Essa recomendação também pode ser feita em função do nível do nutriente no solo, pois em solos deficientes, genótipos eficientes são mais viáveis, ao passo que para solos com teores mais elevados do nutriente, é mais apropriado o uso genótipos mais responsivos.

2.5 Melhoramento para eficiência no uso de fósforo

Os programas de melhoramento de plantas visam desenvolver genótipos de altas produtividades, adaptados às diversas condições edafoclimáticas e também resistentes aos fatores bióticos e abióticos. A identificação e seleção de genótipos eficientes em uso de nutrientes tem sido estudado em diversas culturas, cujo elemento P tem merecido destaque em função da sua deficiência generalizada nas zonas tropicais.

Para a eficiência no uso do fósforo (EUP), os conhecimentos referem-se basicamente à quantificação das diferenças entre os genótipos com relação a exigência do nutriente, aos mecanismos responsáveis por estas diferenças e às respostas diferenciais à fertilização fosfatada (MACHADO, 1995).

Estudos relacionados com fatores genéticos envolvidos na absorção de fósforo são realizados há muito tempo. Smith (1934) constatou que em condição de baixa

concentração de fósforo, algumas linhagens de milho cresciam mais que outras e que a característica era herdável e dominante. Na maioria dos estudos essa característica tem mostrado ser quantitativa, apresentando genes com efeito de dominância (MENDES, 2012) e com efeito aditivo (FURLANI et al., 1998).

A base genética da tolerância a baixo P em plantas pode variar entre e dentro de espécies, uma vez que diferentes estratégias ou mecanismos relacionados à tolerância a baixo P em plantas podem apresentar diferentes tipos de controle gênico. Existe uma variação genética em características associadas à eficiência no uso do fósforo nas plantas cultivadas. A análise dessa variação possibilitou a identificação de diversos loci que influenciam essa característica. A capacidade de identificar esses loci de características quantitativas (QTL) sugere que as melhorias na EUP podem ser obtidas pelo programa de melhoramento convencional ou assistido por marcadores, identificação de genes direcionados e engenharia genética, ou por meio da combinação destas abordagens (VENEKLAAS, 2012; WHITE et al., 2012).

Segundo Silva (2012), a avaliação da variabilidade genética disponível no germoplasma quanto à eficiência e uso de P é um ponto importante a ser considerado, pois a maioria das técnicas utilizadas não é efetiva na identificação de mecanismos desenvolvidos pelas plantas em condições naturais de campo. Além disso, falta caráter de fácil avaliação para que possa ser utilizado como critério de seleção de genótipos superiores, bem como o conhecimento da dose de P ideal a ser utilizada. A detecção de diferenças genéticas sob condições nutricionais específicas, particularmente sob estresse, tem sido verificada, a incorporação dessa variabilidade às cultivares pode ampliar a sua adaptabilidade e aumentar a produtividade (BLISS, 1981) e possibilita promover um melhor ajuste da eficiência de uso de fertilizantes (WALKER; RAINES, 1988).

O melhoramento genético da soja envolve várias fases, que vai desde a escolha de genitores e realização de hibridação, até a seleção de genótipos promissores com base na variação genotípica (MATTA, 2008). Para a eficiência no uso de P, as metodologias de avaliação de genitores potenciais ainda estão sendo desenvolvidas. Sabe-se que caracteres envolvidos na tolerância aos estresses são na maioria das vezes poligênicos, de herança quantitativa, assim, a expressão fenotípica é de difícil diferenciação nos indivíduos, uma vez que inclui efeitos dos genes e efeitos devidos a interação genótipo ambiente (SÁNCHEZ, 1987; DUNCAN, 1994).

Para Lião et al. (2006), obter cultivares eficientes no uso do P será possível com o conhecimento das bases fisiológicas e genéticas que governam essa característica.

Segundo Walker e Raines (1988), o reconhecimento e entendimento das diferenças genéticas são capazes de promover um perfeito ajuste da eficiência de uso de fertilizantes. Essa variabilidade genética pode ser identificada submetendo os genótipos a doses crescentes de P (FURLANI et al., 1985).

Segundo Mendes (2012), parâmetros morfológicos e fisiológicos têm sido estudados visando o melhor entendimento da eficiência no uso de nutrientes e também para serem utilizados como indicadores dessa eficiência. Com o objetivo de selecionar genótipos de milho mais eficientes na aquisição de P, Fidélis et al. (2010) avaliaram 47 genótipos em ambientes com baixo e alto nível de fósforo, dos genótipos testados, 8 foram considerados tanto eficientes quanto responsivos ao elemento fósforo.

Em estudo de eficiência e responsividade de genótipos de soja, Paula (2016) classificou as cultivares estudadas em quatro grupos: eficiente e responsivas, eficientes e não responsivas, não eficientes e responsivas e não eficientes e não responsivas. Destacou que seleção de cultivares eficientes ao uso do fósforo em ambiente com baixa disponibilidade de fósforo favoreceu a seleção de cultivares responsivas a disponibilidade desse mineral. Reina et al. (2014) também utilizaram dois níveis de fósforo para avaliar a eficiência para teor de carboidratos de soja e encontraram diferença no comportamento de genótipos em função das doses de fósforo aplicadas.

Estudos sobre diversidade genética em programas de melhoramento quanto ao crescimento de plantas sob baixo P tem sido desenvolvidos, preferencialmente, em condições de cultivo controladas, seja em hidropônica (FURLANI et al., 1985) ou cultivo em vasos (ALVES et al., 1988). Abichequer (1998), estudando resposta de cultivares de trigo quanto ao aproveitamento de fósforo em meio nutritivo, encontrou diferença entre cultivares quanto a capacidade de translocar o fósforo para a parte aérea e utilizá-lo na produção de matéria seca. Também em solução nutritiva, Brasil et al. (2004) avaliaram o efeito do estresse de P sobre atributos morfológicos do sistema radicular de oito genótipos de milho divergentes para essa característica em dois níveis de P e verificaram que genótipos eficientes apresentaram maiores valores de massa seca total e da parte aérea.

Fageria (1998a) avaliou a resposta de genótipos de feijão quanto à eficiência no uso do fósforo em três níveis de fósforo em condição de casa de vegetação e obteve diferença entre os genótipos, concluindo que a produção de matéria seca da parte aérea e o teor de P na parte aérea foram sensíveis à deficiência de fósforo, sendo mais apropriada a avaliação em casa de vegetação. Entretanto, devido a quantidade de fatores envolvidos nessa característica, é importante que os estudos também sejam realizados em campo.

Abichequer (2003) destaca que diferenças intraespecíficas cultivadas em solo podem ser causadas pela presença de pelos radiculares ou micorrizas em solos deficientes em fósforo, fatores que não são expressivos em solução nutritiva.

No programa de seleção para eficiência no uso de P na EMBRAPA-EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, as avaliações de eficiência e responsividade tem sido conduzidas submetendo genótipos simultaneamente em áreas com baixos e altos níveis de P, até a fase de maturação fisiológica da cultura (PARENTONI et al., 2006). A eficiência no uso do P geralmente diminui com o aumento de níveis de nutriente aplicado, pois a disponibilidade do nutriente em níveis adequados inviabiliza a ativação de mecanismos de adaptação (FAGERIA, 1992). Segundo Mendes (2012), genes para eficiência no uso de fósforo deverão ser mais favoravelmente induzidos em condições de deficiência de P. Para Veneklaas et al. (2012), os maiores benefícios da EUP ocorrem em culturas que crescem em solos com conteúdo de P muito baixo e onde pouco ou nenhum fertilizante de P é aplicado.

A variabilidade genética para eficiência no uso do fósforo já tem sido utilizada para desenvolver genótipos eficientes, ou melhorados para condições de baixa fertilidade do solo. Na China foram desenvolvidos genótipos com características de raiz superiores, entre outros caracteres agronômicos importantes que permitiram uma melhor adaptação das cultivares aos solos ácidos. O Ministério de Agricultura chinês aprovou 7 novas cultivares, que mostram ganhos em rendimento de grãos e biomassa em condições de baixo nível de P nos solos (YAN et al., 2006; CHENG et al., 2010).

Estudo desenvolvido por Zhou et al. (2016) no Sudoeste da China, evidenciou diferença genética na eficiência no uso de fósforo em cultivares de soja. Em condição hidropônica os genótipos eficientes foram mais tolerantes à deficiência de P e exibiram adaptações fisiológicas e morfológicas. Houve variação genotípica para rendimento, acumulação de P e características fisiológicas das raízes, tanto em campo e em solução hidropônica. Segundo os autores, as cultivares eficientes poderiam ser materiais potenciais em região agrícola com baixa disponibilidade de fósforo no solo.

Para os programas de melhoramento genético, avaliar a variabilidade genética para a característica de eficiência na absorção de P por meio de metodologias mais simples é de fundamental importância. Genótipos com características relacionadas a eficiência serão alvo de hibridações para o desenvolvimento de cultivares produtivas e ao mesmo tempo eficientes, contribuindo assim para redução de custos de produção e para uma maior competitividade do sistema produtivo.

2.6 Diversidade genética em soja

A expansão da soja e a importância econômica adquirida nas últimas décadas deve-se, entre outros fatores, ao melhoramento genético que tem desenvolvido cultivares mais produtivas e adaptadas a diferentes condições edafoclimáticas. A cada ano são disponibilizadas cultivares cada vez mais produtivas, resistentes a fatores bióticos e com adaptação às novas fronteiras agrícolas.

O melhoramento busca selecionar genótipos superiores em populações originárias de cruzamentos entre parentais divergentes, podendo ser adotados diferentes processos seletivos para obtenção de genótipos superiores (FEHR, 1993). Nesse contexto, o conhecimento da variabilidade genética dentro dos programas de melhoramento é de interesse do melhorista, pois permite conhecer o potencial da população para um melhor planejamento e a obtenção de maiores ganhos genéticos com os processos seletivos. Segundo Arantes e Miranda (1993), muitos programas de melhoramento têm como objetivo principal aumentar a base genética, que é possível por meio do conhecimento da similaridade das cultivares.

A diversidade genética pode ser avaliada de forma quantitativa e preditiva, sendo que a quantitativa inclui análises dialélicas, necessitando assim de cruzamentos entre genitores com posterior avaliação. Já a forma preditiva, baseia-se em avaliar genótipos com base em diferenças morfológicas, relacionadas a produção, fisiológicas, moleculares, quantificadas em medida de dissimilaridade e avaliadas por meio de técnicas de análises multivariadas (CRUZ et al., 2004; CRUZ; REGAZZI; CARNEIRO, 2012; ODA et al., 2015).

Em estudos de diversidade genética em soja, a análise multivariada tem sido muito utilizada (AZEVEDO et al., 2004; MARQUES, 2010; ALMEIDA et al., 2011;) e as técnicas mais comuns são as canônicas, de componentes principais e métodos de agrupamento que utilizam como medidas de dissimilaridade a distância euclidiana ou a distância generalizada de Mahalanobis, a escolha depende da necessidade e da obtenção de dados (CRUZ et al., 2004). Dos métodos utilizados para predição, os métodos de agrupamento são realizados em duas etapas, a primeira é a estimativa da dissimilaridade entre as cultivares, a segunda é a formação de grupos divergentes (RIBEIRO, 2012).

As medidas de dissimilaridades mais utilizadas são: distância generalizada de Mahalanobis e a distância Euclidiana (JOHNSON; WICHERN, 1992; CRUZ; REGAZZI,

2001). Dos métodos de agrupamento, os mais utilizados são os hierárquicos ou de otimização (CRUZ; FERREIRA; PESSONI, 2011), entretanto, quando o material a ser analisado não é conhecido, são mais indicados os de otimização, sendo o método de Tocher o mais comum (CRUZ, 1990). Os métodos hierárquicos são constituídos por dendogramas, onde os genótipos são agrupados em vários níveis, as delimitações são estabelecidas visualmente, estabelecendo pontos de alta mudança de nível (CRUZ; REGAZZI; CARNEIRO, 2012).

Os métodos de otimização se baseiam na partição do conjunto de genótipos em subgrupos, exclusivos e não vazios, por meio da maximização ou minimização da medida de dissimilaridade estabelecida (CRUZ; REGAZZI; CARNEIRO, 2012). Esse método é baseado na formação de grupos em que as distâncias dentro dos grupos sejam menores que as distâncias entre eles (FARIA, 2012).

A análise canônica tem por objetivo avaliar a máxima correlação existente entre combinações lineares de variáveis de grupos distintos, sendo que são formados pares de combinações denominados variáveis canônicas, suas relações são chamadas correlações canônicas e medem o grau máximo de associação entre os grupos (RENCHER, 2002; MANLY, 2004). Essa análise é utilizada com a finalidade de simplificar a estrutura dos dados, resumindo as informações contidas em grupos de variáveis (OLIVEIRA, 2009).

Na área de ciências agrárias, é importante entender a relação que existe entre as diversas variáveis para compreender os fenômenos biológicos. Para tanto, são utilizadas análises multivariadas, que são métodos estatísticos que investigam ao mesmo tempo múltiplas medidas sobre os elementos amostrais (OLIVEIRA, 2009). Segundo Hair Junior et al. (2005), análises envolvendo duas ou mais variáveis ao mesmo tempo, de certo modo, são consideradas análises multivariadas. Mas para a utilização de métodos estatísticos multivariados é necessário que as características observadas nos grupos populacionais estejam correlacionadas entre si (OLIVEIRA, 2009).

3. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi desenvolvido em condições de campo na fazenda experimental Capim Branco, da Universidade Federal de Uberlândia - UFU, município de Uberlândia-MG, situada em altitude de 820 m (latitude 18°53'2,37"S, longitude 48°20'31,14"W) e clima tropical quente e úmido com estação seca, segundo classificação Koppen. O solo da área experimental é classificado como Latossolo Vermelho Escuro, de textura argilosa, com características físicas e químicas descritas na (Tabela 1).

TABELA 1. Características físicas e químicas do solo da área experimental, na Fazenda Capim Branco, em Uberlândia-MG, 2016.

pH H ₂ O	pH CaCl ₂	P meh	P rem	K ⁺	S-SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	K ⁺	Ca ⁺	Mg ⁺	Al ³⁺	H+ Al	V	m
		----- mg dm ⁻³ -----			----- c mol _c dm ⁻³ -----						---- % ----		
5,9	5,3	2,9	13,2	100	12	3,0	0,26	3,0	1,6	0,0	2,5	66	0
Ca/Mg	Ca/K	SB	t	T	M.O	B	Cu	Fe	Mn	Zn	Areia	Silte	Argila
		---- c mol _c dm ⁻³ ----			dag k ⁻¹ g	----- mg d ⁻³ -----				----- g kg ⁻¹ -----			
1,9	11,5	4,84	4,84	7,34	2,6	0,21	8,3	113	13,9	0,7	288	150	562

| SB: Soma de Bases | T: CTC pH 7,0 | V: Sat. Base | m: Sat. Alumínio | P, K: [HCl 0,05 mol L⁻¹ + H₂ SO₄ 0,025 mol L⁻¹] | S-SO₄: [Fosfato Monobásico Cálcio 0,01 mol L⁻¹] | Ca, Mg, Al: [KCL 1 mol L⁻¹] | M.O: Método colorimétrico | H+ Al: [Solução Tampão SMP a pH 7,5] | B: [BaCl₂. 2H₂ O 0,125% à quente] | Cu, Fe, Mn, Zn: [DTPA em pH 7.3]

O experimento foi conduzido em um esquema fatorial (8x4), sendo que o primeiro fator consistiu em 8 genótipos de soja (Tabela 2) e o segundo, 4 doses de adubação fosfata (30, 60, 90 e 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅). O delineamento experimental utilizado foi de blocos completos casualizados, com 4 repetições.

O experimento foi desenvolvido entre os meses de dezembro de 2016 e abril de 2017, sendo a semeadura realizada em 10 de dezembro de 2016. A área utilizada para o experimento apresentava 2500 m², com relevo do tipo suave ondulado, classe B, com declividade de 3 - 8%, de acordo com o sistema de avaliação da aptidão agrícola das terras (RAMALHO FILHO; BEEK, 1995). As condições meteorológicas ocorridas no período do desenvolvimento do experimento estão apresentadas na Figura 1.

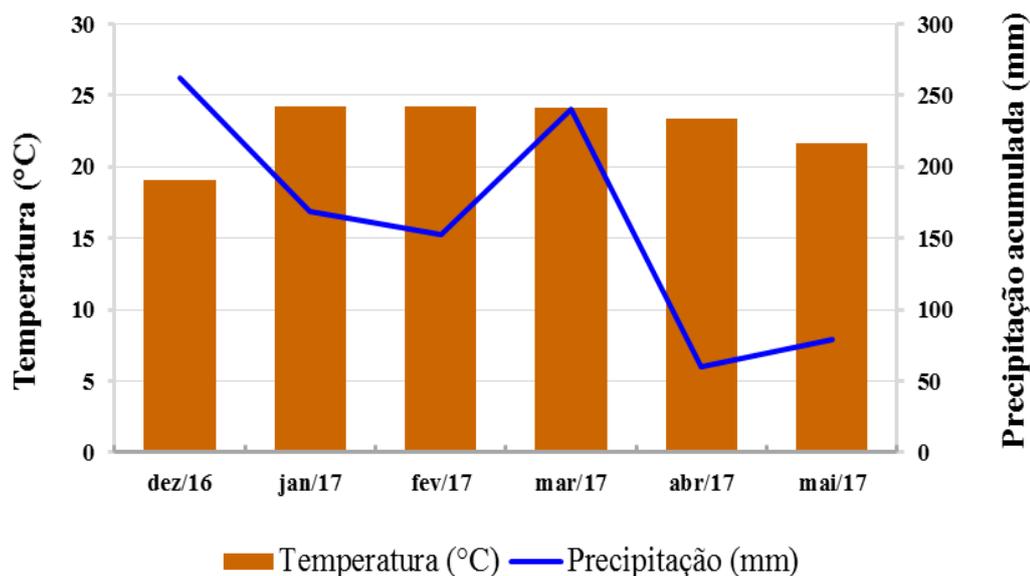


FIGURA 1. Temperatura média e precipitação acumulada entre os meses de dezembro de 2016 e maio de 2017, na Fazenda Capim Branco em Uberlândia-MG, safra 2016/17. Fonte: Estação meteorológica da Fazenda Capim Branco e IMET.

Cada parcela experimental foi composta por 4 linhas de plantas de soja com 5 m de comprimento espaçadas entre si em 0,5 m, totalizando 10 m² e considerou-se como área útil as 2 linhas centrais, desprezando 0,5 m de cada extremidade. Os genótipos utilizados foram: UFUS 8710, UFUS Xavante, UFUS Milionária, UFUS 7910, UFUS 8301, UFUS 6901, UFUS 7401 e UFUS 7415, suas principais características estão descritas na Tabela 2.

TABELA 2. Características dos genótipos utilizados no experimento.

Genótipos	Ciclo	Grupo de maturação	Tipo de crescimento
UFUS 8710	132	8.7	Determinado
UFUS Xavante	128	8.2	Determinado
UFUS Milionária	132	8.5	Determinado
UFUS 7910	115	8.4	Determinado
UFUS 8301	130	8.5	Determinado
UFUS 6901	108	7.0	Indeterminado
UFUS 7415	112	7.2	Semideterminado
UFUS 7401	112	7.5	Determinado

As doses de fósforo utilizadas foram definidas a partir da dose recomendada para a cultura em função da disponibilidade de fósforo no solo, para tanto, seguiu-se a recomendação para o estado de Minas Gerais (EMBRAPA, 2011). A partir da dose recomendada, variou-se os níveis de adubação na proporção 25, 50, 75 e 100%, que equivale a 30, 60, 90 e 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅, respectivamente. A fonte de P utilizada foi superfosfato simples com 18% de P₂O₅, 18% de Ca e 10% de S.

A área experimental foi preparada de forma convencional, com uma aração e duas gradagens, sulcada e efetuadas as adubações conforme as doses do estudo. Antes da semeadura, as sementes foram tratadas com fungicida e, logo após, foram inoculadas com 2 estirpes de *Bradyrhizobium japonicum*. A semeadura foi realizada de forma manual, com o objetivo de chegar a uma densidade de 13 a 18 plantas por metro, com espaçamento de 0.5 m entre linhas. Cerca de 25 dias após a emergência iniciou-se o controle de plantas daninhas, feito por meio de 3 aplicações do herbicida Verdict® (Haloxifope-P-Metílico), na dose de 0,5 L ha⁻¹ e 2 capinas manuais.

A aplicação de Cobalto e Molibdênio foi realizada entre os estádios V5 e V6 (FEHR; CAVINESS, 1977), utilizando o produto Nectar® na dose de 100 mL ha⁻¹.

As principais doenças ocorridas durante o ciclo da cultura foram ferrugem asiática (*Phakopsora pachyrhizi*), percevejo - marrom (*Euschistus heros*) e percevejo verde (*Nezara viridula*). Para o controle da ferrugem asiática foram feitas aplicações do produto Fox® (Trifoxistrobina e Prothioconazol), na dosagem de 0,4 L ha⁻¹, em intervalos de aproximadamente 20 dias e para o controle de percevejo utilizou-se os inseticidas comerciais Acefato (Acheró®) na dose de 0,4 kg ha⁻¹ e Platinum Neo® (tiametoxam+lambdaci-alotrina) na dose de 200 mL ha⁻¹, em intervalos de 20 dias.

Entre os estádios de desenvolvimento R1 e R8 (FEHR; CAVINESS, 1977), avaliou-se em plantas da área útil de cada parcela, as seguintes características:

a) altura de planta no florescimento (APF) e altura da planta na maturação (APM): medida com régua, a partir da região do colo da planta até final da haste, expressa em cm.

b) número de nós no florescimento (NNF) e Número de nós na maturação (NNM): quantidade de nós da haste principal da planta.

c) largura do folíolo (LF) e comprimento do folíolo (CF): medidas no folíolo central do último trifólio completamente desenvolvido, sendo o comprimento tomado na nervura principal da folha até a inserção do pedúnculo e a largura na região mediana do folíolo.

d) Índice Spad (SPAD): a avaliação foi feita no folíolo central do terceiro trifólio completamente desenvolvido, a partir do ápice para a base da planta. Foram avaliadas 3 plantas aleatórias de cada parcela, utilizando o medidor portátil SPAD-502.

e) Acúmulo de matéria seca na parte aérea (MS): foram amostradas 6 plantas da área útil, acondicionadas em saco de papel, determinada a massa e destinadas ao laboratório de solos. As amostras foram submetidas à estufa de circulação forçada de ar, regulada a temperatura de 65°C, por 72 horas. Após atingir peso constante, foram retiradas da estufa e determinado o peso seco. A massa obtida foi extrapolada para produtividade (kg ha⁻¹), considerando uma população de 300 000 plantas por hectare.

f) Acúmulo dos nutrientes fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S) na parte aérea da planta: as amostras foram moídas em moinho Willey, em peneira de 20 mesh e submetidas a digestão nítrico-perclórico (MORAES e RABELO, 1986) para determinação do teor dos nutrientes, seguindo metodologia de Malavolta et al. (1997). Os valores de acúmulo foram obtidos pela multiplicação dos teores obtidos em g kg⁻¹ pela produtividade de matéria seca da parte aérea da planta (kg ha⁻¹).

As avaliações de APF, NNF, LF, CF e SPAD foram realizadas no estádio R1, acúmulo de matéria seca e nutrientes foram avaliados no estádio R4-R5, visto que mais de 70% do acúmulo de nutrientes ocorre entre os estádios de formação de vagens e enchimento de grãos (YAMADA, 2000), e APM e NNM foram avaliadas no estádio R8.

A partir dos resultados para acúmulo de MS e P, foram estimados os índices de eficiência no uso do fósforo – EUP, eficiência na absorção de fósforo (EAP) e eficiência na utilização do fósforo (EUtP), seguindo a metodologia de Moll et al. (1982) por meio das seguintes equações:

$$EUP = \frac{MS \text{ (kg)}}{P \text{ aplicado (kg)}}$$

$$EAP = \frac{P \text{ acumulado (kg)}}{P \text{ aplicado (kg)}}$$

$$EUtP = \frac{MS \text{ (kg)}}{P \text{ acumulado (kg)}}$$

Os dados obtidos foram submetidos a análise de variância, utilizou-se o teste de Scott-Knott para análise dos genótipos, e ajustaram-se regressões para o estudo das doses de P. Utilizou-se a distância generalizada de Mahalanobis para estimar a dissimilaridade genética entre os genótipos, e esses foram agrupados pelo método hierárquico da Ligação Média entre Grupos (UPGMA) e pelo método de Tocher.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As análises revelaram efeito da interação entre genótipos x doses para as variáveis largura de folíolo (LF), índice SPAD, e eficiência na utilização do fósforo (EUtP), e efetivo isolado dos fatores para as variáveis número de nós no florescimento (NNF), número de nós na maturação, matéria seca (MS), eficiência na absorção de fósforo (EAP) e eficiência no uso de fósforo (EUP) (Tabela 3).

TABELA 3. Resumo da análise de variância para caracteres agrônômicos, acúmulo de nutrientes e componentes da eficiência no uso de fósforo, em genótipos de soja, cultivada em Uberlândia-MG, safra-2016/2017.

Fonte de variação	GL	QM						
		APF	APM	NNF	NNM	AIPV	LF	CF
Dose	3	155,03 ^{ns}	182,39 ^{ns}	5,17 ^{**}	16,65 [*]	64,06 [*]	0,58 ^{ns}	0,70 ^{ns}
Genótipo	7	91,88 ^{ns}	1683,29 ^{**}	6,95 ^{**}	32,27 ^{**}	15,18 ^{ns}	7,60 ^{**}	9,59 ^{**}
Dose x Genótipo	21	146,91 ^{ns}	359,14 ^{ns}	1,24 ^{ns}	6,07 ^{ns}	27,26 ^{ns}	1,60 [*]	2,44 ^{ns}
Bloco	3	418,56	358,83	16,56	4,75	10,85	5,94	14,63
Resíduo	93	91,33	343,47	1,25	4,72	18,58	0,88	1,94
CV (%)		18,44	28,98	9,22	14,58	44,16	16,78	14,37
Média		51,83	63,95	12,11	14,90	9,76	5,59	9,71
Fonte de variação	GL	P	K	Ca	Mg	S		
Dose	3	75,72 ^{**}	7558,44 ^{**}	1119,04 ^{**}	291,07 ^{**}	22,28 ^{**}		
Genótipo	7	74,41 ^{**}	581,25 ^{ns}	276,84 ^{**}	64,59 ^{**}	16,87 ^{**}		
Dose x Genótipo	21	11,80 ^{ns}	481,63 ^{ns}	135,09 ^{ns}	14,53 ^{ns}	3,39 ^{ns}		
Bloco	3	37,78	1628,93	372,83	120,22	6,70		
Resíduo	93	7,55	383,60	89,57	17,14	2,10		
CV (%)		30,73	18,89	23,90	20,72	36,16		
Média		8,94	103,68	39,76	19,98	4,01		
Fonte de variação	GL	SPAD	MS	EAP	EUtP	EUP		
Dose	3	861,53 ^{**}	17467532,24 ^{**}	1,11 ^{**}	41186,53 ^{ns}	276618,15 ^{**}		
Genótipo	7	1516,28 ^{**}	2080755,75 [*]	0,10 ^{**}	142779,13 ^{**}	4203,50 ^{**}		
Dose x Genótipo	21	305,53 ^{**}	737491,70 ^{ns}	0,01 ^{ns}	30928,00 [*]	1319,37 ^{ns}		
Bloco	3	926,12	4727225,74	0,04	65614,05	4093,14		
Resíduo	93	144,86	789488,89	0,01	17609,37	1062,34		
CV (%)		17,89	18,45	33,85	22,64	18,23		
Média		67,27	178,75	0,33	586,21	178,75		

APF: Altura da planta no florescimento, APM: Altura da planta na maturação, NNF: número de nós no florescimento, NNM: número de nós na maturação, LF: largura de folíolo, CF: comprimento de folíolo, AIPV: altura de inserção da primeira vagem. P: fósforo, K: potássio, Ca: cálcio, Mg: magnésio, S: enxofre, SPAD: índice SPAD, MS: matéria seca da parte aérea, EAP: eficiência na absorção de fósforo, EUtP: eficiência na utilização do fósforo, EUP: eficiência no uso do fósforo, CV: coeficiente de variação, GL: graus de liberdade, QM: quadrado médio. ** e *, significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

Verificou-se ainda, que para as variáveis altura da planta na maturação (APM) e comprimento de folíolo (CF), houve efeito somente dos genótipos e, para a altura de inserção da primeira vagem (AIPV), somente das doses. Não houve diferença entre os tratamentos para a variável altura da planta no florescimento (APF) (Tabela 3).

As diferenças encontradas sugerem que há variabilidade genética entre os genótipos estudados para a maioria dos caracteres estudados, especialmente para eficiência no uso de P e essa variabilidade evidencia a possibilidade de seleção de genitores para fins de melhoramento, visando obtenção de populações segregantes.

Para a variável APM, os genótipos foram agrupados em 2 grupos, sendo que UFUS 8710 obteve média de 87,04 cm, enquanto os demais apresentaram médias entre 54, 89 a 66,33 cm (Tabela 4).

TABELA 4. Altura de genótipos de soja, em diferentes níveis de fósforo, cultivados em Uberlândia-MG, na safra 2016/2017.

Doses (P ₂ O ₅)	Genótipos							
	UFUS 8710	UFUS Xavante	UFUS 6901	UFUS 7910	UFUS 8301	UFUS 7401	UFUS 7415	UFUS Milionária
	APM							
30	92,10	69,88	51,15	53,15	73,45	68,90	47,90	60,28
60	104,55	68,95	56,55	63,15	55,50	51,68	47,65	63,25
90	67,93	66,85	55,65	49,48	66,33	57,15	51,25	71,50
120	83,60	52,20	59,20	68,10	63,50	62,40	72,75	70,30
Média	87,04A	64,69B	55,64B	58,47B	64,69B	60,03B	54,89B	66,33B

Médias seguidas de letras distintas nas linhas não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott, a 5% de probabilidade.

A altura média das cultivares comerciais de soja situa-se entre 60 e 120 cm, com altura ideal entre 70 e 80 cm, e plantas com alturas superiores a 100 cm são propícias ao acamamento (MATSUO; FERREIRA; SEDIYAMA, 2015). Dessa forma, a maioria dos genótipos apresentaram médias dentro do esperado para a cultura. Com destaque para o genótipo UFUS 8710, que apresentou média mais próxima da ideal. As médias inferiores encontradas para alguns genótipos justificam-se por se tratar de uma característica quantitativa, sendo influenciada por diversos fatores relacionados ao ambiente de cultivo.

Para a variável NNF, os genótipos UFUS Xavante, UFUS 6901 e UFUS 7910 apresentaram-se superiores aos demais (Tabela 5).

TABELA 5. Número de nós no florescimento (NNF) de genótipos de soja, em diferentes níveis de fósforo, cultivados em Uberlândia-MG, na safra 2016/2017.

Doses (P ₂ O ₅)	Genótipos							
	UFUS 8710	UFUS Xavante	UFUS 6901	UFUS 7910	UFUS 8301	UFUS 7401	UFUS 7415	UFUS Milionária
	NNF							
30	11,60	12,20	13,00	11,85	11,55	12,15	11,45	12,00
60	10,95	13,10	12,60	12,40	11,95	11,95	10,55	11,80
90	10,05	13,00	12,50	12,75	11,50	12,05	11,55	11,45
120	12,00	13,75	12,75	13,90	11,70	11,60	12,55	13,45
Média	11,15B	13,01A	12,74A	12,73A	11,68B	11,94B	11,53B	12,18B

Médias seguidas de letras distintas nas linhas não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

Os genótipos UFUS Xavante e UFUS 7910 também apresentaram médias elevadas para a variável NNM (Tabela 6). Além destes, UFUS 8710, UFUS 8301 e UFUS Milionária também ficaram no grupo de maiores médias.

TABELA 6. Número de nós na maturação (NNM) de genótipos de soja, em diferentes níveis de fósforo, cultivados em Uberlândia-MG, na safra 2016/2017.

Doses (P ₂ O ₅)	Genótipos							
	UFUS 8710	UFUS Xavante	UFUS 6901	UFUS 7910	UFUS 8301	UFUS 7401	UFUS 7415	UFUS Milionária
	NNM							
30	18,15	17,28	12,45	14,65	16,25	13,65	12,70	16,32
60	13,85	16,35	13,95	15,65	12,55	12,73	12,10	15,55
90	14,53	15,65	13,05	13,88	16,40	14,00	12,05	17,00
120	17,90	16,15	16,20	16,95	14,45	13,33	14,00	17,00
Média	16,11A	16,36A	13,91B	15,28A	14,91A	13,43B	12,71B	16,47A

Médias seguidas de letras distintas nas linhas não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

Os genótipos classificados com maiores médias apresentaram valores próximos aos 17 nós, que é o ideal para uma cultivar com alto potencial produtivo (SEDIYAMA; SILVA; BORÉM, 2015).

Existe uma relação entre as características de altura e número de nós da planta. Entretanto, verificou-se nesse trabalho que, com exceção do genótipo UFUS 8710, os genótipos que apresentaram maior número de nós não apresentaram maior altura. Esse

resultado justifica-se pela diferença no comprimento dos internódios que existem entre os genótipos, fazendo com que algumas apresentem maior número de nós e sejam baixas.

Os níveis de P no solo influenciaram o número de nós da planta tanto no florescimento quanto na maturação, de modo que para NNF a menor média pode ser verificada na dose correspondente a 53 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e para NNM, na dose equivalente a 72,4 kg ha⁻¹ de P₂O₅, seguindo por aumento nas doses mais elevadas (Figura 2).

Paula (2006), em avaliação da resposta de genótipos de soja em dois níveis de fósforo (alto e baixo), verificou interação entre os genótipos e os níveis de P, sendo que o baixo teor de P no solo reduziu o número de nós para a maioria dos genótipos, ainda que algumas tiveram comportamento oposto com maior número de nós em nível mais baixo desse elemento.

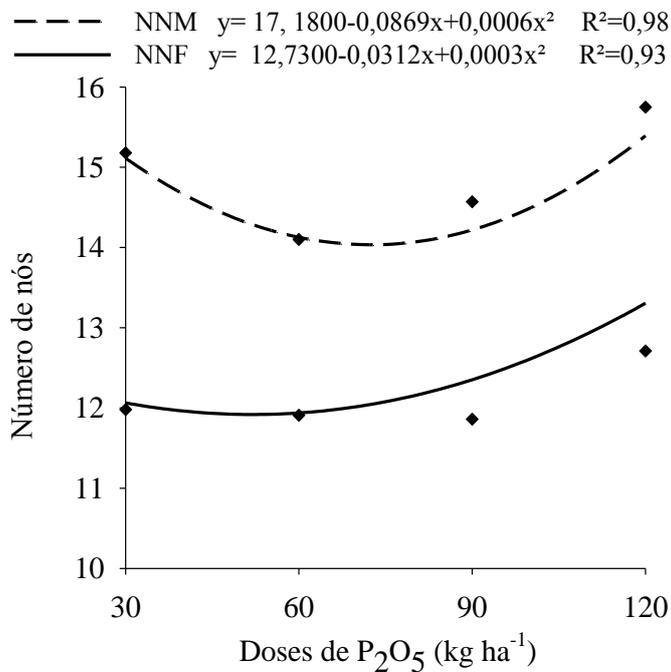


FIGURA 2. Número de nós no florescimento (NNF) e número de nós na maturação (NNM) de soja, em função de níveis de fósforo no solo.

A altura de inserção da primeira vagem em soja é uma característica importante, pois influencia as perdas na colheita. A altura considerada mais adequada para a colheita mecanizada é acima de 10 cm (BONETTI, 1981). Entretanto, trata-se de uma característica quantitativa, sendo influenciada por fatores ambientais, tais como a disponibilidade de nutrientes no solo.

Segundo Sfredo (2008), entre outros sintomas, a deficiência de fósforo ocasiona a redução da altura de inserção da primeira vagem, que apresenta aumento a medida que eleva os níveis de P. Para essa característica o comportamento foi semelhante ao número de nós, verificou-se redução até a dose correspondente a 65,5 kg ha⁻¹ de P₂O₅, com posterior aumento nas doses de 90 e 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅ (Figura 3). No nível de P, recomendado para a cultura 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅, a altura de primeira vagem foi superior, com média de 11,81 cm, portanto, acima da altura recomendada para a cultura (10 cm). Esses resultados evidenciam a influência dos níveis de P no solo sobre essa característica.

Araújo et al. (2005), em estudo de adubação fosfatada em soja, encontraram que a dose que ocasionou maior altura de inserção de primeira vagem foi de 193,8 kg ha⁻¹ de P₂O₅, superior a máxima testada nesse trabalho (Figura 3).

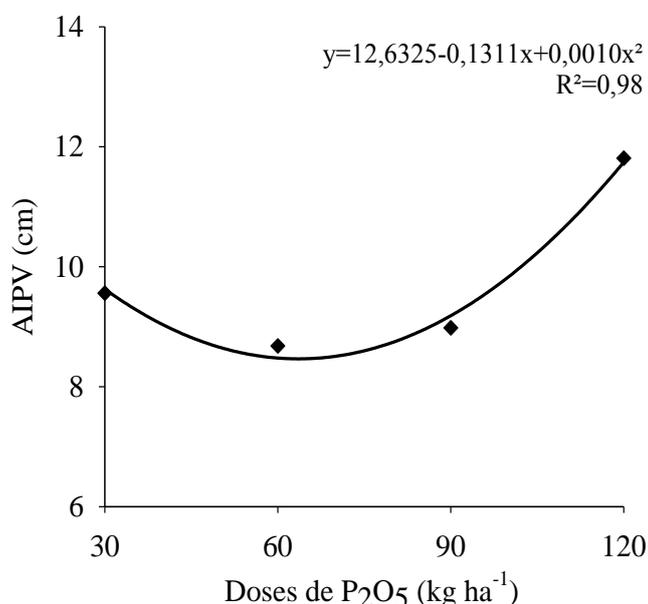


FIGURA 3. Altura de inserção de primeira vagem (AIPV) em soja, em função de níveis de fósforo no solo.

A deficiência de P pode reduzir o número, o tamanho de folhas e a área foliar necessária a captação de luz (RIPLEY et al., 2004), o que implica em menor fotossíntese e menor acúmulo de matéria seca na planta (FAGERIA, 1999)

Nesse estudo, com relação às variáveis CF e LF, o comprimento do folíolo não foi afetado pelos níveis de P, houve diferença para essa característica apenas entre os genótipos. Já para largura de folíolo, houve interação entre os fatores genótipos x doses de P (Tabela 3). Para a variável CF, os genótipos foram agrupadas em 2 grupos, sendo que UFUS Xavante, UFUS 6901 e UFUS 7910 apresentaram médias menores que as

demais (Tabela 6). Essa diferença é coerente e é explicada pelos genótipos apresentarem diferentes características morfológicas das folhas, sendo que as trifolioladas possuem tamanhos, formatos e posicionamentos diferentes (MULLER, 1981).

TABELA 6. Comprimento de folíolo (CF) de genótipos de soja, em diferentes níveis de fósforo, cultivados em Uberlândia-MG, na safra 2016/2017.

Doses (P ₂ O ₅)	Genótipos							
	UFUS 8710	UFUS Xavante	UFUS 6901	UFUS 7910	UFUS 8301	UFUS 7401	UFUS 7415	UFUS Milionária
	CF							
30	10,75	7,90	8,03	9,53	10,53	10,83	10,83	9,08
60	10,60	9,53	7,58	10,05	11,60	9,38	10,15	10,28
90	9,78	9,73	9,53	8,55	9,73	9,63	9,83	9,53
120	11,38	8,33	8,58	9,43	9,10	10,25	10,93	9,75
Média	10,62A	8,87B	8,43B	9,39B	10,24A	10,02A	10,43A	9,66A

Médias seguidas de letras distintas nas linhas não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott, a 5% de probabilidade.

Para a variável LF, os genótipos apresentaram comportamento diferencial em cada nível de P. O genótipo UFUS 6901 apresentou médias baixas em todos os níveis de P, com exceção de 90 kg ha⁻¹, que não apresentou diferença entre os genótipos. O contrário ocorreu para UFUS 8710, que apresentou médias superiores (Tabela 7).

TABELA 7. Largura de folíolo (LF) de genótipos de soja, em diferentes níveis de fósforo, cultivados em Uberlândia-MG, na safra 2016/2017.

Doses (P ₂ O ₅)	Genótipos							
	UFUS 8710	UFUS Xavante	UFUS 6901	UFUS 7910	UFUS 8301	UFUS 7401	UFUS 7415	UFUS Milionária
	LF							
30	7,00A	4,37B	3,98B	5,53A	6,35A	6,40A	5,90A	5,28A
60	6,85A	6,03A	3,60C	6,05A	6,48A	5,23B	5,08B	5,85A
90	5,73A	5,80A	5,10A	4,73A	5,23A	5,25A	5,73A	5,60A
120	7,32A	4,93B	4,28B	5,88B	5,35B	5,58B	6,43A	5,88B
Média	6,73	5,28	4,24	5,54	5,85	5,61	5,78	5,65

Médias seguidas de letras distintas nas linhas não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott, a 5% de probabilidade.

Além disso, verificou-se que no nível de 30 kg ha⁻¹ de P₂O₅, o genótipo UFUS Xavante apresentou menor largura de folíolo, já na dose 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅, está no grupo

das maiores médias e o contrário foi verificado para UFUS 7415. Na dose de 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅, somente os genótipos UFUS 8710 e UFUS 7415 se destacaram (Tabela 7).

Com relação ao comportamento dos genótipos em função dos níveis de P, somente para os genótipos UFUS 8710 e UFUS 8301 houve ajuste de regressão. Para UFUS 8710, a medida que aumentou os níveis de adubação, foi verificado um aumento da largura do folíolo até a dose correspondente a 78,36 kg ha⁻¹, a partir da qual houve redução. Já para UFUS 8301, houve redução gradativa com o aumento dos níveis de P (Figura 4).

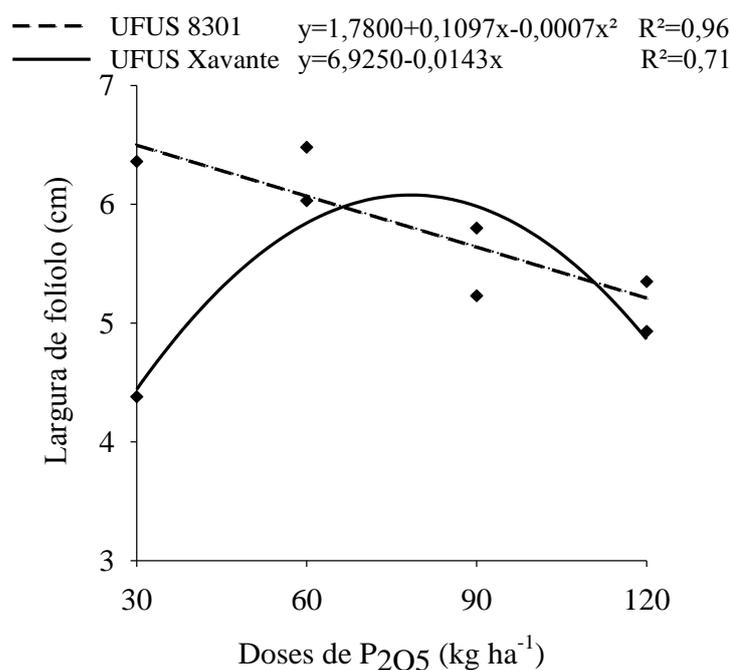


FIGURA 4. Largura de folíolo de genótipos de soja, em função de níveis de fósforo no solo.

Para a variável índice SPAD, dentro de todos os níveis de P₂O₅, os genótipos UFUS 7401 e UFUS 7415 apresentaram médias altas, já UFUS Xavante e UFUS 6901 ficaram no grupo de médias inferiores (Tabela 8). Os genótipos UFUS 7910 e UFUS Milionária apresentaram médias baixas nos níveis mais baixos de P₂O₅, enquanto no nível mais alto, ficaram dentro do grupo de médias superiores (Tabela 8).

TABELA 8. Índice Spad (SPAD) de genótipos de soja, em diferentes níveis de fósforo, cultivadas em Uberlândia-MG, na safra 2016/2017.

Doses (P ₂ O ₅)	Genótipos							
	UFUS 8710	UFUS Xavante	UFUS 6901	UFUS 7910	UFUS 8301	UFUS 7401	UFUS 7415	UFUS Milionária
	SPAD							
30	79,18A	58,93B	55,83B	64,10B	86,83A	94,70A	73,50A	52,35B
60	62,23A	59,60A	46,63A	66,13A	74,75A	70,76A	59,10A	60,35A
90	64,30B	58,83B	48,78B	50,05B	78,13A	77,00A	75,43A	53,40B
120	77,30A	57,98B	57,23B	74,53A	65,60B	76,03A	93,90A	79,15A
Média	70,75	58,83	52,11	63,70	76,32	79,63	75,48	61,31

Médias seguidas de letras distintas nas linhas não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott, a 5% de probabilidade.

Quanto ao comportamento de cada genótipo em função dos níveis de P, para UFUS 8710 foi verificada uma redução do índice SPAD até a dose de 75.9 kg ha⁻¹ de P₂O₅, com posterior aumento. Já para o genótipo UFUS 8301, o maior índice foi verificado na dose mais baixa de P (Figura 5).

— UFUS 8301 $y=91,405-0,2010x$ $R^2=0,79$
 - - - UFUS 8710 $y=109,090-1,2602x+0,0083x^2$ $R^2=0,99$

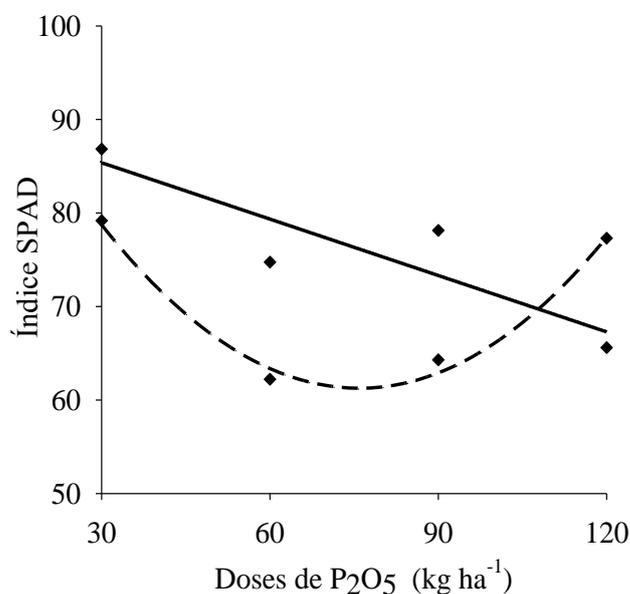


FIGURA 5. Índice SPAD dos genótipos UFUS 8301 e UFUS 8710, em função dos níveis de P no solo.

Verificou-se que o genótipo UFUS 8301 ficou no grupo de médias altas para comprimento de folíolo, foi superior para largura de folíolo em baixo nível de P e, nesse nível, também ficou no grupo das maiores médias para índice SPAD. Esse resultado é condizente, pois genótipos com maior comprimento e largura de folíolo apresentam maior

área foliar, que promove maior fotossíntese e tendem a apresentar maior índice SPAD. Esses resultados sugerem que o genótipo UFUS 8301 poderá ser mais eficiente na realização da fotossíntese em ambiente de baixa disponibilidade de P.

Com relação ao comportamento dos genótipos quanto ao acúmulo de nutrientes, para Cálcio, UFUS 8301 apresentou média inferior aos demais e as maiores médias variaram de 37,24 a 44,68 kg ha⁻¹ (Tabela 9).

TABELA 9. Acúmulo de Cálcio (Ca) em genótipos de soja, em diferentes níveis de fósforo, cultivados em Uberlândia-MG, na safra 2016/2017.

Doses (P ₂ O ₅)	Genótipos							
	UFUS 8710	UFUS Xavante	UFUS 6901	UFUS 7910	UFUS 8301	UFUS 7401	UFUS 7415	UFUS Milionária
	Acúmulo de Ca (kg ha ⁻¹)							
30	34,52	33,98	37,74	34,94	31,68	32,27	37,28	30,07
60	41,26	34,96	41,97	34,54	31,89	39,21	42,74	36,92
90	42,48	33,32	50,26	35,24	29,65	50,98	32,72	37,49
120	50,03	46,60	48,77	50,89	31,75	45,58	45,79	64,92
Média	42,07A	37,24A	44,68A	38,90A	31,24B	42,01A	39,63A	42,35A

Médias seguidas de letras distintas nas linhas, diferem entre si pelo teste de Scott-Knott, a 5% de probabilidade.

A diferença encontrada pode ser atribuída as diferentes exigências e potencial produtivo dos genótipos. Oliveira Junior et al. (2016) também encontraram diferenças de acúmulo entre cultivares, com valores variando de 50 a 118 kg ha⁻¹.

Para acúmulo de Mg, os genótipos UFUS 6901, UFUS 8710 e UFUS 7401 foram superiores, com médias de 24,03; 21,59 e 20,78 kg ha⁻¹, respectivamente.

TABELA 10. Acúmulo de magnésio (Mg) em genótipos de soja, submetidas a níveis de fósforo, cultivadas em Uberlândia-MG, na safra 2016/2017.

Doses (P ₂ O ₅)	Genótipos							
	UFUS 8710	UFUS Xavante	UFUS 6901	UFUS 7910	UFUS 8301	UFUS 7401	UFUS 7415	UFUS Milionária
	Acúmulo de Mg (kg ha ⁻¹)							
30	18,34	16,62	19,20	15,69	17,44	17,96	16,37	13,85
60	21,70	17,58	23,47	16,75	18,34	20,52	17,03	16,76
90	21,43	18,36	25,06	17,48	18,13	23,48	17,62	17,28
120	24,90	22,55	28,41	25,90	19,56	21,14	24,30	26,13
Média	21,59A	18,78B	24,03A	18,96B	18,37B	20,78A	18,83B	18,51B

Médias seguidas de letras distintas nas linhas, diferem entre si pelo teste de Scott-Knott, a 5% de probabilidade.

Oliveira Júnior et al. (2016) também encontraram diferença entre cultivares de soja quanto ao acúmulo de Mg, com médias variando entre 29 a 46 kg ha⁻¹.

Para acúmulo de K não houve diferença entre os genótipos (Tabela 11), apesar de ser significativo pelo teste F. A não detecção de divergência atribui-se a menor rigorosidade do teste utilizado.

TABELA 11. Acúmulo de potássio (K) em genótipos de soja, submetidas a níveis de fósforo, cultivados em Uberlândia-MG, na safra 2016/2017.

Doses (P ₂ O ₅)	Genótipos							
	UFUS 8710	UFUS Xavante	UFUS 6901	UFUS 7910	UFUS 8301	UFUS 7401	UFUS 7415	UFUS Milionária
	Acúmulo de K (kg ha ⁻¹)							
30	104,31	92,31	93,75	88,31	95,97	92,23	88,45	68,96
60	114,25	100,56	103,02	88,22	95,67	103,54	8,68	85,39
90	105,30	107,98	113,46	92,78	103,33	106,77	86,10	90,91
120	134,29	133,94	120,98	135,78	104,80	102,72	132,42	141,62
Média	114,54A	108,70A	107,80A	101,27A	99,94A	101,31A	99,16A	96,72A

Médias seguidas de letras distintas nas linhas, diferem entre si pelo teste de Scott-Knott, a 5% de probabilidade.

Para acúmulo de S os genótipos UFUS 6901 e UFUS 7401 apresentaram médias superiores aos demais, com acúmulo de 5,11 e 5,33 kg ha⁻¹ (Tabela 12).

TABELA 12. Acúmulo de enxofre (S) em genótipos de soja, submetidas a níveis de fósforo, cultivadas em Uberlândia-MG, na safra 2016/2017.

Doses (P ₂ O ₅)	Genótipos							
	UFUS 8710	UFUS Xavante	UFUS 6901	UFUS 7910	UFUS 8301	UFUS 7401	UFUS 7415	UFUS Milionária
	Acúmulo de S (kg ha ⁻¹)							
30	2,94	3,28	3,77	1,83	3,58	4,03	5,53	2,60
60	3,27	3,48	4,40	1,67	3,91	4,80	4,38	3,03
90	2,83	3,48	5,51	2,27	3,01	6,26	3,13	3,36
120	5,55	4,76	6,77	3,16	4,04	4,32	8,25	5,15
Média	3,65B	3,75B	5,11A	2,23C	3,64B	4,85B	5,33A	3,53B

Médias seguidas de letras distintas nas linhas, diferem entre si pelo teste de Scott-Knott, a 5% de probabilidade.

Entretanto, os valores encontrados nesse estudo estão muito inferiores aos encontrados por Oliveira Junior et al. (2016), que obtiveram de 11 a 19 kg ha⁻¹. Este nutriente pode ter sido insuficiente para a planta, embora a disponibilidade no solo

estivesse dentro da ideal. Considerando que o S é um nutriente muito móvel no solo, pode ter ocorrido acúmulo em camadas mais profundas (EMBRAPA, 2013), todavia, essas não foram analisadas, visto que em condições normais de cultivo, a maior parte do sistema radicular da soja está concentrada nos primeiros 15 cm do solo (GREGORY, 1992).

Com relação ao acúmulo de P, verificou-se comportamento diferencial entre os genótipos, formando-se 3 grupos (Tabela 13). O genótipo UFUS 6901 foi superior os demais com acúmulo de 13,40 kg ha⁻¹, seguido de UFUS 7401 e UFUS 7415 com 10,36 e 9,68 kg ha⁻¹, respectivamente (Tabela 13).

TABELA 13. Acúmulo de fósforo (P) em genótipos de soja, submetidas a níveis de fósforo, cultivados em Uberlândia-MG, na safra 2016/2017.

Doses (P ₂ O ₅)	Genótipos							
	UFUS 8710	UFUS Xavante	UFUS 6901	UFUS 7910	UFUS 8301	UFUS 7401	UFUS 7415	UFUS Milionária
	Acúmulo de P (kg ha ⁻¹)							
30	7,14	7,19	11,51	6,41	8,23	9,21	8,82	5,48
60	6,48	8,20	11,19	6,22	7,38	10,83	7,46	6,27
90	6,89	7,93	15,18	5,48	6,72	12,08	7,09	7,02
120	10,81	10,39	15,72	9,26	7,06	9,33	15,34	11,85
Média	7,83C	8,43C	13,40 A	6,84C	7,34C	10,36B	9,68B	7,66C

Médias seguidas de letras distintas nas linhas, diferem entre si pelo teste de Scott-Knott, a 5% de probabilidade.

Esses valores são baixos comparados com a maioria dos estudos atuais (HISSÃO KURIHARA, 2013; QUAREZEMIN, 2015; OLIVERIA JUNIOR, 2016), mas ainda foi superior ao encontrado por Bataglia et al. (1976). Entretanto, sabe-se que o acúmulo de P na soja pode apresentar grande variação em função do potencial produtivo da cultura (QUAREZEMIN, 2015; OLIVERIA JUNIOR, 2016). Além disso, deve-se considerar que o nível crítico de P na planta é variável em função da capacidade de absorção e/ou utilização desse nutriente (MUNIZ et al., 1985; SCHERER, 1998).

Com esses resultados, verificou-se que há diversidade genética para acúmulo de nutrientes entre os genótipos, especialmente para o P, visto que foram formados 3 grupos distintos, sendo UFUS 6901 superior, seguido de UFUS 7401 com maior acúmulo de Mg, Ca e P. Além disso, o genótipo 6901 obteve média superior para a variável MS (Tabela 14).

Esses resultados sugerem que o maior acúmulo de nutrientes do genótipo UFUS 6901 refletiu em maior produção de biomassa, isso está relacionado a fatores intrínsecos

ao genótipo, que eventualmente favorecem a capacidade de absorção de nutrientes e a conversão em biomassa.

TABELA 14. Acúmulo de massa matéria seca (MS) em genótipos de soja, submetidas a níveis de fósforo, cultivados em Uberlândia-MG, na safra 2016/2017.

Doses (P ₂ O ₅)	Genótipos							
	UFUS 8710	UFUS Xavante	UFUS 6901	UFUS 7910	UFUS 8301	UFUS 7401	UFUS 7415	UFUS Milionária
	MS (kg ha ⁻¹)							
30	4414,50	3958,17	4766,67	3559,17	4446,33	4302,75	4355,75	3290,00
60	4876,83	4227,50	5355,25	3826,17	4476,00	4932,12	4406,00	4060,50
90	4925,25	4676,33	5782,36	3924,75	4942,38	4952,50	4551,25	4436,88
120	5821,50	5652,00	6261,88	5867,83	5225,00	5064,00	6261,88	6665,50
Média	5009,5B	4628,5B	5537,1A	4294,5B	4772,4B	4812,8B	4868,7B	4613,2B

Médias seguidas de letras distintas nas linhas, diferem entre si pelo teste de Scott-Knott, a 5% de probabilidade.

Sabe-se que a deficiência de fósforo reduz o desenvolvimento de raízes secundárias e a produção de matéria seca da planta (GRANT et al., 2001). Por outro lado, o aumento do nível desse nutriente no solo favorece o crescimento radicular e, conseqüentemente, contribui para uma maior capacidade de absorção de nutrientes (NOVAIS; SMYTH, 1999). Plantas eficientes também podem responder de forma contrária, com o aumento do sistema radicular em ambientes de baixo nível de P, para melhor explorar o solo em busca do nutriente (GRANT et al., 2001).

Quanto a influência das doses de P₂O₅ no acúmulo dos nutrientes P, K, Ca, Mg e S na parte aérea da planta, verificou-se um comportamento linear, sendo que o aumento dos níveis de P no solo, favoreceu o acúmulo de nutrientes na planta (Figura 7). O mesmo comportamento foi observado para a variável MS, sendo essa uma conseqüência do acúmulo verificado para os nutrientes.

Incrementos de biomassa em soja com o aumento de níveis de adubação fosfatada já foram observados em vários estudos (CÔRREA, 2004; SOARES, 2013; PAULA, 2016; SILVA, 2016b). Souza et al. (2014) testaram as doses parecidas com as utilizadas neste estudo e obtiveram máximo acúmulo de matéria seca na dose 120 kg ha⁻¹, comportamento semelhante ao encontrado nesse trabalho.

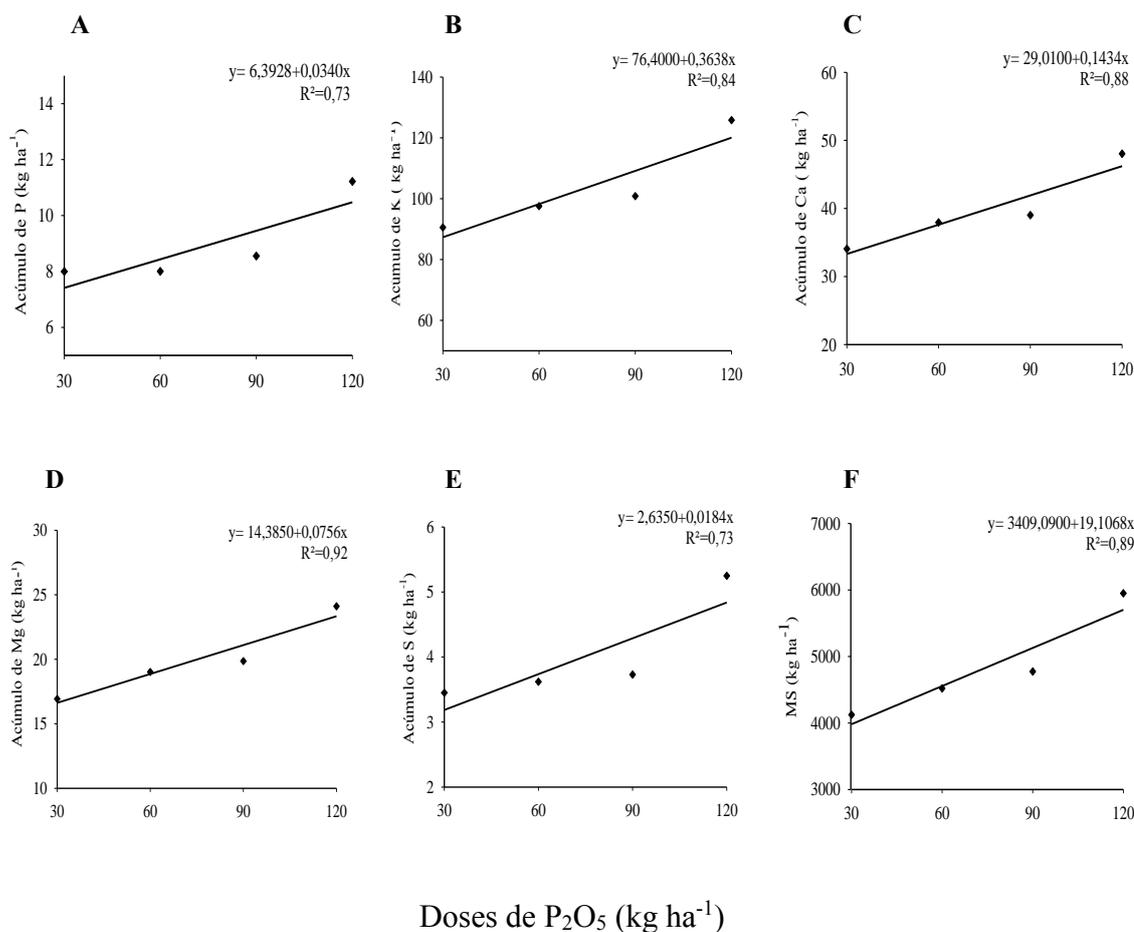


FIGURA 7. **A:** Acúmulo de fósforo (P), **B:** acúmulo de potássio (K), **C:** acúmulo de cálcio (Ca), **D:** magnésio (Mg), **E:** acúmulo de enxofre (S) e **F:** acúmulo de matéria seca (MS) na parte aérea de genótipos de soja, em função de níveis de fósforo no solo.

Com relação ao comportamento dos genótipos para os índices de eficiência em P, para a variável EAP, formaram-se 3 grupos. No primeiro grupo de maior eficiência encontra-se o genótipo UFUS 6901, com média de 0,49, seguido de UFUS 7401, com média de 0,40 e no terceiro grupo ficaram os genótipos UFUS 8710, UFUS Xavante, UFUS 7910, UFUS 8301, UFUS 7415 e UFUS Milionária, com médias variando de 0,25 a 0,36 (Tabela 15). Verificou-se que o genótipo UFUS 6901 foi cerca de 49% mais eficiente na absorção de P que a UFUS 7910, classificada no grupo de médias inferiores (Tabela 15).

Já para a variável EUP foram formados dois grupos, sendo que os genótipos UFUS 8710, UFUS 6901, UFUS 8301, UFUS 7401 e UFUS 7415 foram agrupados com médias superiores, com valores entre 180,71 e 207,06. Já UFUS Xavante, UFUS 7910 e UFUS Milionária apresentaram médias inferiores, entre 156,20 e 171,28, apresentando,

portanto, menor eficiência (Tabela 15). Verificou-se também que UFUS 6901 foi cerca de 24% mais eficiente que UFUS 7910.

TABELA 15. Eficiência no uso de fósforo (EUP) e seus componentes: eficiência na absorção (EAP) e eficiência na utilização (EUtP), em genótipos de soja em função de níveis de adubação fosfatada, cultivados em Uberlândia-MG, safra 2016/2017.

Doses (P ₂ O ₅)	Genótipos							
	UFUS 8710	UFUS Xavante	UFUS 6901	UFUS 7910	UFUS 8301	UFUS 7401	UFUS 7415	UFUS Milionária
	EAP (kg kg ⁻¹)							
30	0,54	0,54	0,87	0,48	0,62	0,70	0,67	0,42
60	0,25	0,31	0,42	0,24	0,28	0,41	0,28	0,24
90	0,17	0,20	0,38	0,14	0,17	0,30	0,18	0,18
120	0,20	0,20	0,30	0,18	0,13	0,18	0,29	0,22
Média	0,29C	0,31C	0,49A	0,25C	0,30C	0,40B	0,36C	0,26C
	EUP (kg kg ⁻¹)							
30	334,43	299,86	361,11	269,63	336,84	325,97	322,41	249,24
60	184,73	160,13	202,85	144,93	169,55	186,82	166,89	153,81
90	124,38	118,09	146,02	99,11	124,81	125,06	114,93	112,02
120	110,26	107,05	118,26	111,13	98,96	95,91	118,60	126,24
Média	188,45A	171,28B	207,06A	156,20B	182,54A	183,44A	180,71A	160,33B
	EUtP (kg kg ⁻¹)							
30	619,28A	575,63A	455,88A	604,81A	553,14A	471,85A	492,80A	608,86A
60	932,77A	528,83B	491,04B	634,77B	611,58B	470,80B	604,71B	692,46B
90	716,12A	594,98A	394,54B	733,31A	745,21A	422,85B	648,55A	643,22A
120	551,14B	553,08B	423,43B	633,07B	800,19A	569,48B	416,67B	563,73B
Média	704,83	563,13	441,22	651,49	677,53	483,74	540,68	627,07

EAP: eficiência na absorção de fósforo, EUtP= eficiência na utilização de fósforo, EUP: eficiência no uso do fósforo,
Médias seguidas de letras distintas nas linhas não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a nível de 5% de probabilidade.

O genótipo UFUS 6901 foi superior para os dois componentes da eficiência, sendo de 18 a 49% mais eficiente na absorção de P e de 17 a 24% mais eficiente no uso de P com relação aos demais. Observou-se ainda que os genótipos UFUS 7910, UFUS Xavante e UFUS Milionária ficaram no grupo de menores médias para os dois componentes da eficiência. Portanto, esses genótipos demonstram maiores divergências e são genitores com potencial para hibridações.

Para a variável EUtP houve interação entre os fatores genótipos x doses de P. No nível de 30 kg ha⁻¹ os genótipos tiveram o mesmo comportamento, não diferindo entre si. Nos níveis de 60,90 e 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅ foram formados 2 grupos, sendo que na dose de 60 kg ha⁻¹, o genótipo UFUS 8710 foi superior as demais com média de 932,77. Na

dose de 90 kg ha⁻¹, UFUS 6901 e UFUS 7401 apresentaram menores índices de eficiência, com médias variando de 394,54 a 422,85 e no grupo maior eficiência ficaram aos demais, com médias entre 594,98 a 716,12. No nível de 120 kg ha⁻¹ o genótipo UFUS 8301 foi superior aos demais, com índice de 800,19, mostrando maior eficiência na utilização interna de P (Tabela 15).

Outros autores também verificaram divergência genética para eficiência em P e seus componentes (FURLANI et al., 2002; REINA et al., 2014; SILVA, 2016b; PAULA, 2016). Essas diferenças ocorrem devido aos processos associados à absorção, translocação, assimilação e redistribuição do elemento variarem entre os genótipos, sendo mais efetivos nos genótipos mais eficientes (ROTILI et al., 2010).

Nesse estudo, de forma geral, o genótipo UFUS 6901 mostrou-se superior quanto a capacidade de acumular matéria seca e fósforo na parte aérea, isso explica os altos índices de EUP e EAP e os baixos valores para EUtP observados.

Guimarães (2006) salienta que a seleção de genitores para eficiência deve levar em consideração seus comportamentos em ambientes contrastantes. Nesse estudo, em relação a influência dos níveis de P sobre a variável EAP, foi verificada uma redução na eficiência a medida que aumentou os níveis desse elemento no solo (Figura 8).

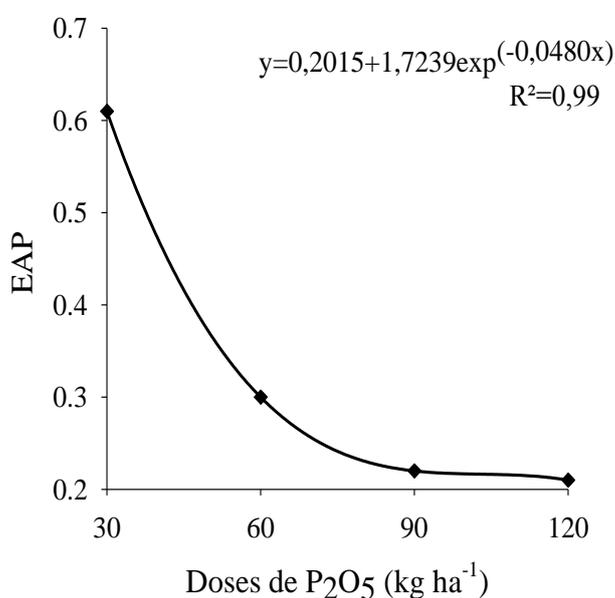


FIGURA 8. Eficiência na absorção de fósforo (EAP) em soja, em diferentes níveis de fósforo no solo.

Resultado diferente desse foi encontrado por Silva (2016b), que não verificou diferença na eficiência de absorção entre ambiente de baixa e alta disponibilidade. Esse

autor encontrou um valor médio de 0,03 para os dois ambientes. Nesse trabalho os índices foram de 0,21 no nível de P₂O₅ recomendado para a cultura e de 0,61, em nível de baixa disponibilidade.

Com relação a influência dos níveis de P sobre a variável EUP, também foi observada uma redução na eficiência com o aumentou os níveis desse elemento (Figura 9).

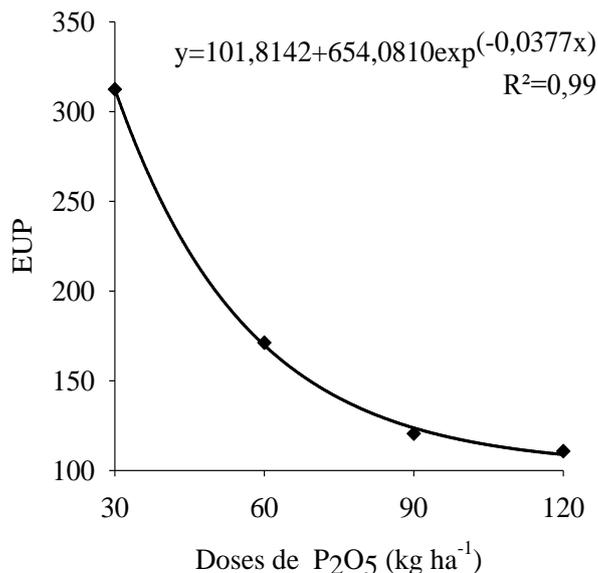


FIGURA 9. Eficiência no uso de fósforo (EUP) em soja, em diferentes níveis de fósforo no solo.

Para essa variável, Silva (2016b) encontrou resultado parecido com esse. As médias foram cinco vezes maiores em ambiente de baixa disponibilidade do nutriente. Os índices encontrados por esse autor variaram de 16,10 em ambiente de alto P a 84,84 em ambiente de baixo P. Nesse trabalho, as médias foram de 110,80 a 312,44, no nível recomendado e de baixa disponibilidade, respectivamente.

Esses resultados corroboram com Fageria (1992), que relatou que os valores de eficiência geralmente diminuem com o aumento dos níveis de nutriente no solo, pois a disponibilidade adequada do nutriente faz com que os genótipos não ativem os mecanismos de expressão da eficiência.

Quanto a EUP dados genótipos em função dos níveis de disponibilidade de P no solo, UFUS 8710 e UFU 7415 apresentaram comportamento semelhante, com aumento da eficiência com posterior decréscimo. A máxima eficiência verificada para UFUS 8710 foi na dose de 69,72 kg ha⁻¹ e para UFUS 7415, foi em 71,78 kg ha⁻¹. Desse modo, para

esses genótipos, a maior eficiência de utilização foi observada em doses menores que a recomendada para a cultura (120 kg ha⁻¹). Já o genótipo UFUS 8301 comportou-se de maneira diferente, com aumento progressivo da eficiência com a elevação dos níveis de P no solo (Figura 10).

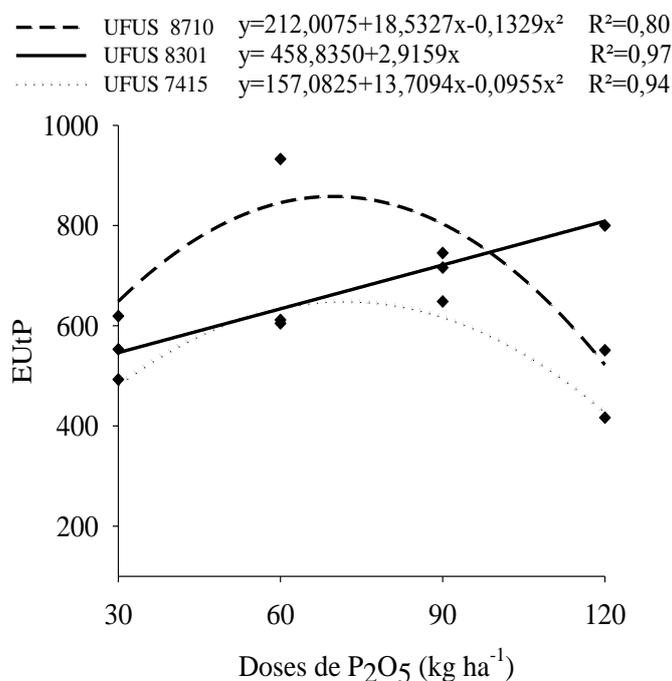


FIGURA 10. Eficiência na utilização de P (EUtP) em genótipos de soja, em níveis de fósforo no solo.

O genótipo UFUS 8301 apresentou capacidade de acumular maior quantidade de biomassa por unidade de nutriente acumulado com o aumento dos níveis de P no solo. Entretanto, a maior eficiência foi verificada para UFUS 8710, que apresentou média superior as demais e em baixo nível de P no solo. Esses resultados evidenciam que os genótipos apresentam diferença genética para eficiência de utilização em função da disponibilidade de fósforo no solo.

As medidas de dissimilaridade genética dos genótipos utilizados foram obtidas pela distância generalizada de Mahalanobis. As distâncias estimadas apresentaram elevada magnitude, o que demonstra existir ampla variabilidade genética entre os genótipos estudados.

A maior distância encontrada foi de $D_2=2488,36$ entre os genótipos UFUS Milionária e UFUS 6901, na dose de 60 kg ha⁻¹ e a menor distância foi de $D_2=16,96$ entre UFUS 7401 e UFUS 7415, no nível de 120 kg ha⁻¹. O genótipo UFUS 6901 foi o mais

divergente, pois apareceu nas combinações de máxima distância genética em todos os níveis de P (Tabela 16).

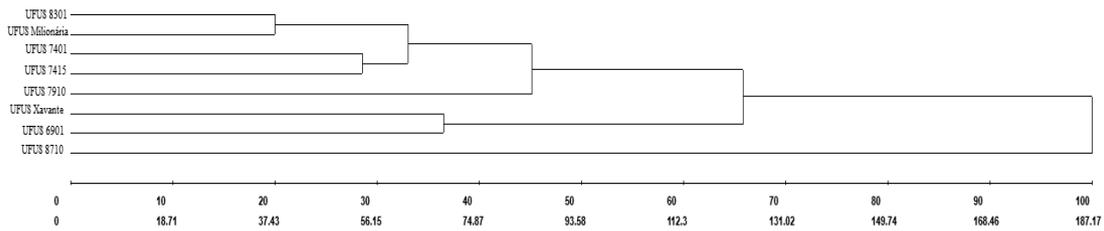
TABELA 16. Distância generalizada de Mahalanobis (mínima e máxima) obtidas a partir de caracteres agronômicos e parâmetros de eficiência de uso de fósforo, em oito genótipos de soja submetidas à diferentes disponibilidades de fósforo.

Doses (P ₂ O ₅)	Distância generalizada de Mahalanobis	
	Mínima - Genótipos	Máxima - Genótipos
30	37,45 - UFUS 8301 e UFUS Milionária	432,38 - UFUS 8710 e UFUS 6901
60	28,88 - UFUS 8710 e UFUS 8301	2488,36 - UFUS 6901 e UFUS Milionária
90	31,18 - UFUS 8301 e UFUS Milionária	608,44 - UFUS 8710 e UFUS 6901
120	16,96 - UFUS 7401 e UFUS 7415	690,64 - UFUS 6901 e UFUS Xavante

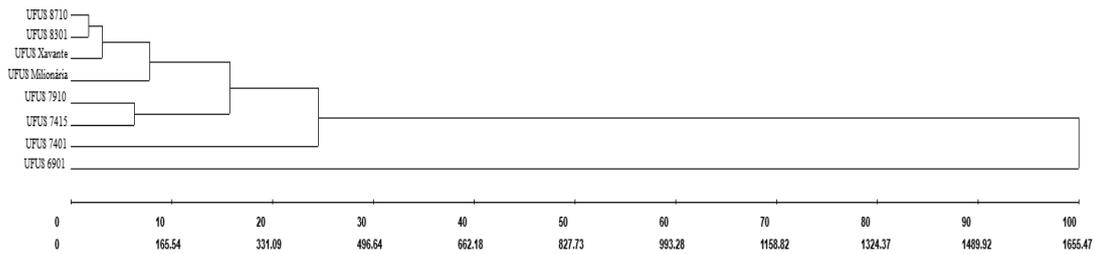
A partir dos dados da distância generalizada de Mahalanobis, os genótipos foram agrupados pelo método da ligação média intragrupo (UPGMA) e pelo método de Tocher. No agrupamento pelo método UPGMA considerou-se o limite de 50% de dissimilaridade entre os genótipos como critério para formação dos grupos.

Verificou-se que no nível de 30 kg ha⁻¹ de P₂O₅ foram formados 3 grupos, nos níveis de 60 e 90 kg ha⁻¹ de P₂O₅ foram formados 2 grupos e no nível de 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅ foram formados 3 grupos (Figura 11).

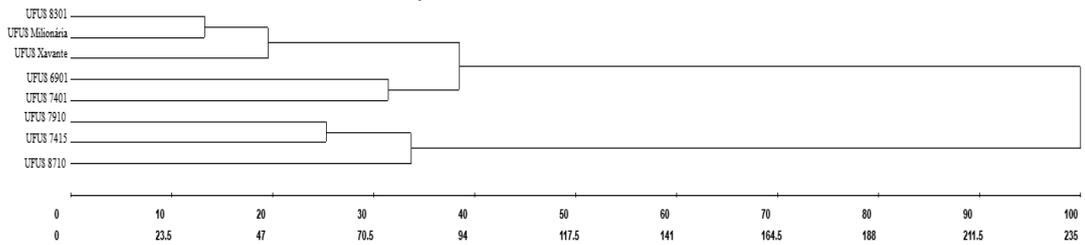
No nível de 30 kg ha⁻¹ de P₂O₅, o genótipo UFUS 8710 ficou isolado em um dos grupos. O mesmo ocorreu para o genótipo UFUS 6901 no nível de 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅. No nível de 90 kg ha⁻¹ de P₂O₅ os genótipos UFUS 8710, UFUS 7415 e UFUS 7910 foram reunidos no mesmo grupo, e no nível de 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅ os genótipos UFUS 8710 e UFUS 7910 também foram classificados no mesmo grupo, e UFUS Xavante ficou isolado em um dos grupos (Figura 11).



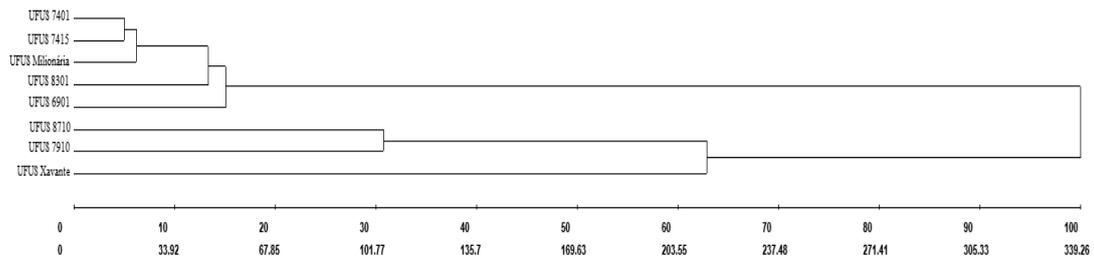
A (ccc = 0,58^{**})



B (ccc = 0,89^{**})



C (ccc = 0,62^{**})



D (ccc = 0,70^{**})

FIGURA 11. Dendrogramas pelo método da ligação média intragrupo (UPGMA) obtido a partir da distância generalizada de Mahalanobis estimada com caracteres agrônômicos e de parâmetro quanto a eficiência de uso de fósforo, em soja cultivada em diferentes disponibilidades de P_2O_5 ($kg\ ha^{-1}$) (A - 30, B - 60, C - 90, D - 120). ccc: coeficiente de correlação cofenética; ^{**}: significativo ao nível de 1% de probabilidade pelo teste t.

O agrupamento pelo método de Tocher permitiu reunir os genótipos em 4 grupos no nível de 30 kg ha⁻¹, em 2 grupos no nível de 60 kg ha⁻¹, em 5 grupos no nível de 90 kg ha⁻¹ e em 3 grupos no nível de 120 kg ha⁻¹ (Tabela 17).

TABELA 17. Agrupamento de Tocher a partir da distância generalizada de Mahalanobis, estimada a partir de caracteres agronômicos e de eficiência do uso de fósforo, em soja cultivada em diferentes níveis de P₂O₅ (kg ha⁻¹) (A - 30, B - 60, C - 90, D - 120).

Dose (P ₂ O ₅)	Grupos	Genótipos
30	I	UFUS 8301, UFUS 7401, UFUS 7415, UFUS Milionária
	II	UFUS Xavante, UFUS 6901
	III	UFUS 7910
	IV	UFUS 8710
Genótipos		
60	I	UFUS 8301, UFUS 7401, UFUS Milionária, UFUS Xavante, UFUS 7910, UFUS 8710, UFUS 7415
	II	UFUS 6901
Genótipos		
90	I	UFUS 8301, UFUS Milionária, UFUS Xavante
	II	UFUS 7910, UFUS 7415
	III	UFUS 8710
	IV	UFUS 7401
	IV	UFUS 6901
Genótipos		
120	I	UFUS 8301, UFUS 7401, UFUS 7415, UFUS Milionária UFUS 7910, UFUS 6901
	II	UFUS 8710
	III	UFUS Xavante

Observou-se uma certa correspondência entre os grupos formados nos métodos de agrupamento utilizados. No nível de 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅ os grupos foram idênticos. Se o limite de similaridade estabelecido para o método UPGM fosse 40%, no nível de 30 kg

ha⁻¹ de P₂O₅, os grupos também seriam idênticos, todavia, optou-se por um limite superior de similaridade. No nível de 120 kg ha⁻¹ os grupos foram parecidos, somente o genótipo 7910 foi agrupado diferente. O número de grupos formados em cada método de agrupamento e a semelhança observada entre eles evidenciam a variabilidade genética que existe entre os genótipos estudados.

Em trabalho visando caracterizar genótipos de soja quanto a eficiência no uso do P, Silva (2016b) obteve distância máxima de 95,35 em condição de baixa disponibilidade de P e de 86,11 em nível elevado. A menor distância encontrada por esse autor foi de 1,46 e de 1,68 em condição de alto e baixo nível de P, respectivamente. Os genótipos foram reunidos em 2 grupos em condição de alta disponibilidade e de 3 grupos em condição de baixa disponibilidade, por meio do método de agrupamento ligação média intragrupo (UPGMA). Já em estudo de eficiência no uso do fósforo para teor de carboidrato, realizado por Reina (2014), a magnitude variou de 3,91 a 106,32 para alto e baixo P e formaram-se 5 grupos de genótipos por meio da análise de agrupamento de Tocher, revelando alta variabilidade genética para essa característica.

Nesse estudo, verificou-se que o genótipo UFUS 6901 pode ser classificado como eficiente na absorção e no uso de P pelo teste de agrupamento de médias de Scott-Knott, que apresentou máxima dissimilaridade genética pela distância generalizada de Mahalanobis e ficou isolada em um grupo pelo método UPGMA no nível de 60 kg ha⁻¹, bem como no agrupamento de Tocher nas doses de 60 e 90 kg ha⁻¹.

O genótipo UFUS 8710 apresentou médias elevadas pelo teste de Scott-Knott para EUtP, em condições de baixa disponibilidade, apresentou alta dissimilaridade genética com relação a UFUS 6901, ficou isolada pelo método UPGMA no nível de 30 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e pelo método de Tocher nos níveis de 30, 90 e 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅.

Os resultados desse estudo revelaram que há variabilidade genética para a eficiência no uso de fósforo e seus componentes, bem como para a maioria das características avaliadas. Verificou-se também, que UFUS 6901 apresentou maiores acúmulos de matéria seca e P na parte aérea e, conseqüentemente, foi mais eficiente no uso e na absorção desse elemento. O contrário foi observado para os genótipos UFUS 7910, UFUS Xavante e UFUS Milionária, que foram agrupados com médias inferiores para essas variáveis.

Com relação as doses testadas, observou-se a máxima dissimilaridade genética na dose de 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅, equivalente a 50% da recomendada para a cultura (120 kg

ha⁻¹), sendo, portanto, a mais favorável para a seleção de genótipos eficientes em P. Esse resultado é condizente, visto que em condições de escassez, genes relacionados ao uso do P são expressos, tais como, os relacionados a síntese de ácidos orgânicos, a emissão de maior número de raízes laterais (STRIEDER, 2009) e a liberação de fosfatases (RAGHOTHAMA; KARTHIKEYAN, 2005), que agem disponibilizando P para as plantas. Entretanto, o mesmo não ocorreu para a menor dose testada (30 kg ha⁻¹). É possível que essa dose foi baixa ao ponto de prejudicar o metabolismo da planta e a expressão de genes responsáveis pelos mecanismos envolvidos com a eficiência.

5. CONCLUSÕES

O genótipo UFUS 6901 é eficiente na absorção e no uso do fósforo, enquanto UFUS 8710 é eficiente na utilização interna desse nutriente. As maiores dissimilaridades foram verificadas entre estes genótipos e entre UFUS 6901 e UFUS Milionária, portanto, esses são potências para hibridações visando eficiência em P em termos de desenvolvimento vegetal, sendo as hibridações UFUS 6901 x UFUS Milionária e UFUS 6901 x UFUS 8710 as mais recomendadas.

A dose de P correspondente a 50% da recomendada para solos de disponibilidade muito baixa desse elemento é a mais favorável para a seleção de genitores eficientes, pois revelou a máxima dissimilaridade genética entre os genótipos.

6. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ARONEGÓCIO- ABAG. **O futuro da Soja Nacional**. 2017, 28 p. Disponível em: <<http://www.abag.com.br/media/images/0-futuro-da-soja-nacional---ieag---abag.pdf>>. Acesso em: 03 dez. 2017.

ABICHEQUER, A. D.; BOHNEN, H.; ANGHINONI, I. Absorção, translocação e utilização de fósforo por variedades de trigo submetidas à toxidez de alumínio. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Campinas. v. 27, n. 2, p. 373-378, 2003. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832003000200017>

ABICHEQUER, A. D.; BOHNEN, H. Eficiência de absorção, translocação e utilização de fósforo por variedades de trigo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 22, n. 1, p. 21-26, 1998. <https://doi.org/10.1590/S0100-06831998000100003>

AKIYAMA, K.; MATSUZAKI, K.; HAYASHI, H. Plant sesquiterpenes induce hyphal branching in arbuscular mycorrhizal fung. **Nature**, London, v. 435, n. 7043, p. 824-827, 2005. <https://doi.org/10.1038/nature03608>

ALMEIDA, R. D.; PELUZIO, J. M.; AFERRI, F. S. Divergência genética entre cultivares de soja, sob condições de várzea irrigada, no sul do Estado Tocantins. **Revista Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v. 42, n. 1, p. 108-115, 2011. <https://doi.org/10.1590/S1806-66902011000100014>

ALVES, V. M. C. et al. Seleção de genótipos de milho para à eficiência a fósforo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 23, n.10, p. 1083-1090, 1988.

APROSOJA BRASIL- **A história da soja**. 2014. Disponível em: <<http://www.aprosoja.com.br/soja-e-milho/a-historia-da-soja>>. Acesso em: 01 dez. 2017.

ARANTES, N. E.; MIRANDA, M. A. C. Melhoramento genético e cultivares de soja para o cerrado da região sudeste do Brasil. In: ARANTES. N. E.; SOUZA. P. I. M. (Ed.). **Cultura da soja nos cerrados**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1993, p. 209-227.

ARAÚJO, W. F.; SAMPAIO, R. A.; MEDEIROS, R. D. Resposta de cultivares de soja à adubação fosfatada. **Revista Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v. 36, n. 2, p. 129-134, 2005.

ARNON, D. I.; STOUT, P. R. The essentiality of certain elements in minute quantity for plants with special reference to copper. **Plant physiol**, Waterbury, v. 14, p. 371-375, 1939.

BLISS, F. A. Utilization of vegetable germplasm. **HortScience**, Alexandria, v. 16, p. 129 - 132, 1981.

ÁVILA, M. R. et al. Componentes do rendimento, teores de isoflavonas, proteínas, óleo e qualidade de sementes de soja. **Revista Brasileira de Sementes**, Londrina, v.29, n.3, p.111-127, 2007. <https://doi.org/10.1590/S0101-31222007000300014>

AZEVEDO, P. H. et al. Divergência genética entre genótipos de soja ausentes de enzimas lipoxigenases. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 51, n. 298, p. 663-670, 2004.

BAIGORRI, H.; GASSEN, D. A importância do ciclo, da juvenilidade e do hábito de crescimento no manejo da cultura. **Revista Plantio Direto**, Passo Fundo, p. 15-18, 2009.

BAILIAN, L.; MCKEAND, S. E.; ALLEN, H. L. Genetic variation in nitrogen use efficiency of lobeolly pine seedlings. **Forest Science**, Bethesda, v. 37, n. 2, p. 613-626, 1991.

BALDWIN, J. C. et al. Biochemical and molecular analysis of LePS2; 1: a phosphate starvation induced protein phosphatase gene from tomato. **Planta**, Berlim, v. 228, n. 2, p. 273-280, 2008.

BALDWIN, J. C.; KARTHIKEYAN, A. S.; RAGHOTHAMA, K. G. LEPS2, a phosphorus starvation-induced novel acid phosphatase from tomato. **Plant Physiology**, Waterbury, v. 125, n. 2, p. 728-737, 2001. <https://doi.org/10.1104/pp.125.2.728>

BALIGAR, V. C.; FAGERIA, N. K.; HE, Z. L. Nutrient use efficiency in plants. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 32, n. 7-8, p. 921-950, 2001. <https://doi.org/10.1081/CSS-100104098>

BARBER, S. A. **Soil nutrient bioavailability**: A mechanistic approach. 2. ed. New York: Jhon Wiley & Sons, 1995. 414 p.

BAREA, J. M. et al. Microbial cooperation in the rhizosphere. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 56, n. 416, p. 1761-1778, 2005. <https://doi.org/10.1093/jxb/eri197>

BATAGLIA, O. C. et al. Acúmulo de matéria seca e nutrientes, em soja cultivar Santa Rosa. **Bragantia**, Campinas, v. 35, n. 21, p. 237-247, 1976. <https://doi.org/10.1590/S0006-87051976000200001>

BEZERRA, A. R. G.; et al. Importância Econômica. In: SEDIYAMA, T.; SILVA, F.; BOREM, A. (ed.). **Soja**: do plantio à colheita. Viçosa: UFV, 2015, p. 9-26.

BONETTI, L. P. Distribuição da soja no mundo. In: MIYASAKA, S.; MEDINA, J. C. (Ed.). **A soja no Brasil**. Campinas: Instituto de Tecnologia de Alimentos, 1981. p. 1-16.

BRASIL, E. C. et al. Atributos morfológicos do sistema radicular de genótipos de milho contrastantes quanto a eficiência para fósforo, em condições de estresse do nutriente. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 26.; REUNIÃO BRASILEIRA SOBRE MICORRIZAS, 10.; SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MICROBIOLOGIA DO SOLO, 5., 2004, Lages. **Anais...** Lages: SBCS, 2004.

BRASIL, E. C. **Mecanismos envolvidos na eficiência de aquisição de fósforo em genótipos de milho**. 2003. 172 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2003.

CÂMARA, G. M. S. **Soja: tecnologia da produção II**. Piracicaba: G. M. S. Câmara, 2000. 450 p.

CASTRO, G. Y. **Eficiência de absorção e utilização de fósforo em batata cultivada in vitro**. 2009. 54 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.

CHENG, F. et al. Phosphorus nutrition characters for new soybean germplasms with phosphorus efficiency on acid red soils. **Plant Nutrition and fertilizer Science**, v. 16, n. 1, p. 71-81. 2010. Disponível em: <<https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20113020183>>. Acesso em: 17 nov. 2017.

CHIEN, S.H.; MENON, R. G. Factors affecting the agronomic effectiveness of phosphate rock for direct application. **Fertilizer Research**, Dordrecht, v.41, n. 3, p. 227-234, 1995. <https://doi.org/10.1007/BF00748312>

CHUNG, G.; SINGH, R. J. Ampliação da base genética da soja: uma abordagem multidisciplinar. **Critical Reviews in Plant Sciences**, Boca Raton, v. 27, n.5, p. 295-341, 2008. <https://doi.org/10.1080/07352680802333904>

CLARK, R. B.; BROWN, J. C. Differential phosphorus uptake by phosphorus-stressed corn inbreds. **Crop Science**, Madison, v. 14, n. 4, p. 505-508, 1974. <https://doi.org/10.2135/cropsci1974.0011183X001400040004x>

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira: grãos-safra 2017/18 - Quarto levantamento**, Brasília, v. 5, n. 4, p. 1-132, 2018. Disponível em: < <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos>>. Acesso em: 20 mar. 2018.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **A produtividade da soja: análise e perspectivas**. Compêndio de Estudos Conab. v. 10, Brasília: Conab, 2017. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/uploads/arquivos/17_08_02_14_27_28_10_compendio_de_estudos_conab_a_produtividade_da_soja_-_analise_e_perspectivas_-_volume_10_2017.pdf>. Acesso em: 19 dez. 2017.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Evolução dos custos de produção de soja no Brasil**. Compêndio de estudos Conab. v. 1, p. 1-35, 2016. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/uploads/arquivos/17_08_02_14_27_28_10_compendio_de_estudos_conab_a_produtividade_da_soja_-_analise_e_perspectivas_-_volume_10_2017.pdf>. Acesso em: 19 dez. 2017.

CORDELL, D.; DRANGERT, J. O.; WHITE, S. The story of phosphorus: Global food security and food for thought. **Global Environmental Change**, The Netherlands, v. 19, n. 2, p. 292–305, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2008.10.009>

CORRÊA, J. C.; MAUAD, M.; ROSOLEM, A. Fósforo no solo e desenvolvimento de soja influenciados pela adubação fosfatada e cobertura vegetal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, p. 1231-1237, 2004.

CRUZ, C. D. **Aplicação de algumas técnicas multivariadas no melhoramento de plantas**. 1990. 188 f. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1990.

CRUZ C. D.; FERREIRA F. M.; PESSONI L. A. **Biometria aplicada ao estudo da diversidade genética**. Visconde do Rio Branco: Suprema, 2011. 620 p.

CRUZ, C. D.; REGAZZI, A. J.; CARNEIRO, P. C. S. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. 3. ed. Viçosa: UFV. 279 p. 2004.

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

CRUZ, C. D.; REGAZZI, A. J. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. Viçosa: UFV, 2001. 390 p.

DALL'AGNOL, A. **A Embrapa Soja no contexto do desenvolvimento da soja no Brasil: histórico e contribuições**. Brasília, DF: Embrapa, 2016, 71 p. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1043614/1/LivroEmbrapaSojadesenvolvimentoBROL.pdf>>. Acesso em: 08 jun. 2018.

DECHEN, A. N.; NACHTIGALL, G. R. Elementos requeridos à nutrição de plantas. In: NOVAIS, R. F. et al. (ed.). **Fertilidade do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 91-132.

DECICINO, T. **A importância do posicionamento de cultivares de soja para o sucesso da cultura**. São Paulo: Monsanto, 2016. 12 p. Disponível em: <http://www.monsoy.com.br/site/wpcontent/uploads/2016/08/job_02_97_informativos_tecnicos4_ano4_n9_ok_atualizado_ok.pdf>. Acesso em: 19 dez. 2017.

DEITH, L. G. et al. Soil and fertilizer sources of plant nutrients. **Management of Wisconsin Soils A3588**, Fifth Edition, chapter 9, p. 87. 2005.

DESTRO, D.; SEDIYAMA, T.; GOMES, J. L. L. **Genes qualitativos em soja**: alguns comentários e listagem. Viçosa: Imprensa Universitária da UFV, 1990. 67 p.

DUNCAN, R. R. Genetic manipulation. In: WILKINSON, R. E. (Ed.). **Plant-Environment Interactions**. p. 1-38, 1994.

EMBRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA-EMBRAPA. **Tecnologias de Produção de Soja - Região Central do Brasil 2003**. Londrina: Embrapa Soja, 2003. 199 p. Disponível em: < <https://www.embrapa.br/en/busca-de->

[publicacoes/-/publicacao/244683/tecnologias-de-producao-de-soja---regiao-central-do-brasil-2003](#)>. Acesso em: 19 dez. 2017.

EMBRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA-EMBRAPA.
Tecnologias de Produção de Soja - Região Central do Brasil 2005. Londrina: Embrapa Soja, 2004. 239 p. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/en/busca-de-publicacoes/-/publicacao/467254/tecnologias-de-producao-de-soja---regiao-central-do-brasil-2005>>. Acesso em: 08 jun. 2018.

EMBRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA-EMBRAPA.
Tecnologias de produção de soja - região Central do Brasil 2012 e 2013. Londrina, Embrapa soja, 2011. 261 p. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/en/busca-de-publicacoes/-/publicacao/904487/tecnologias-de-producao-de-soja---regiao-central-do-brasil-2012-e-2013>>. Acesso em: 19 dez. 2017.

EMBRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA-EMBRAPA.
Tecnologias de produção de soja região Central do Brasil 2014. Londrina: Embrapa Soja, 2013, 266 p. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/95489/1/SP-16-online.pdf>>. Acesso em 19 dez. 2017.

FAGERIA, N. K. Adubação e calagem. In: VIERIA, N.R.A.; SANTOS, A.B.; SANT'ANA, E.P. (Ed). **A cultura do arroz no Brasil**. Santo Antônio de Goiás: EMBRAPA Arroz e Feijão, 1999, p. 329-353.

FAGERIA, N. K; BARBOSA FILHO, M. P. Avaliação de cultivares de arroz para maior eficiência na absorção de fósforo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 16, n. 6, p. 777-782, 1981.

FAGERIA, N. K. Eficiência de uso de fósforo pelos genótipos de feijão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.2, n.2, p.128-131. 1998a. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v02n02p128-131>

FAGERIA, N. K. **Maximizing crop yields**. New York: Marcel Dekker, 1992. 274 p.

FAGERIA, N. K. Otimização da eficiência nutricional na produção das culturas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 2, n.1, p. 6-16, 1998b. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v02n01p6-16>

FAN, M. et al. Physiological roles for aerenchyma in phosphorus-stressed roots. **Functional Plant Biology**, Victoria, v. 30, n. 5, p. 493-506, 2003.

FAQUIN, V. **Nutrição Mineral de Plantas**. Lavras-MG: Universidade Federal de Lavras/FAEPE, 2005. 186 p.

FAQUIN, V. **Nutrição mineral de plantas**. Lavras: UFLA/ FAEPE, 2005. 183 p.

FAQUIN, V. **Nutrição mineral de plantas**. Lavras: Universidade Federal de Lavras, 2001. 182 p.

FARIA, P. N. et al. Métodos de agrupamento em estudo de divergência genética de pimentas. **Horticultura Brasileira**, Vitória da conquista, v. 30, n. 3, p. 428-432, 2012.

FARIAS, J. R. B.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N. **Ecofisiologia da soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2007. 10 p. (Embrapa soja, circular técnica, 48).

FEDERIZZI, L. C. A soja como fator de competitividade no Mercosul: histórico, produção e perspectivas futuras. **Primeiras jornadas de economia regional comparada**, v. 1, 2005. Disponível em:

<https://www.researchgate.net/profile/Luiz_Federizzi/publication/238096616_A_SOJA_COMO_FATOR_DE_COMPETITIVIDADE_NO_MERCOSUL_HISTORICO_PRO_DUCAO_E_PERSPECTIVAS_FUTURAS/links/00b49532ac503da3aa000000.pdf>.

Acesso em: 08 jun. 2018.

FEHR, W. R.; CAVINESS, C. E. **Stages of soybean development**. Ames: Iowa State University of Science and Technology, 1977. 11 p.

FEHR, W. R. **Principles of cultivar development**. 3. ed. Ames: Macmillan Publishing Company, 1993, v. 1, p. 527.

FIDELIS, R. R. et al. Classificação de populações de milho quanto à eficiência e resposta ao uso de fósforo. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 32, n. 2, p. 241-246, 2010.

FIDELIS, R. R. et al. Comportamento, eficiência e resposta a adubação com fósforo em feijão comum. **Tecnol. & Ciên. Agropec**, João Pessoa, v. 11, n. 5, p.1-7, 2017.

FREITAS, M. C. M. A cultura da soja no Brasil: o crescimento da produção brasileira e o surgimento de uma nova fronteira agrícola. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 7, n. 12, 2011.

FRITSCHÉ-NETO, R. et al. Herança de caracteres associados à eficiência de utilização do fósforo em milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 45, n. 5, p. 465-471, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2010000500005>

FURLANI, A. M. C.; BATAGLIA, O. C.; LIMA, M. Eficiência de linhagens de milho na absorção e utilização de fósforo em solução nutritiva. **Bragantia**, Campinas, v. 44, n. 1, p. 129-147, 1985. <https://doi.org/10.1590/S0006-87051985000100011>

FURLANI, A. M. C. et al. Avaliação de genótipos de arroz quanto à eficiência na utilização de fósforo em solução nutritiva e em solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 3, p. 291-303, 1983.

FURLANI, A. M. C. et al. Variability of soybean germoplasm in relation to phosphorus uptake and use efficiency. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 59, n.3, p. 529-536, 2002. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162002000300018>

FURLANI, A. A. C.; LIMA, M.; NASS, L. L. Combining ability effects for P-efficiency characters in maize grown in low P nutrient solution. **Maydica**, Bergamo, v. 43, n. 3, p. 169-174, 1998.

FURTINI NETO, A. E. et al. **Fertilidade do solo**. Lavras: UFLA/FAEPE, 2001. 252 p.

GATIBONI, L. C. **Disponibilidade de formas de fósforo do solo às plantas**. 2003. 247 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 2003.

GERLOFF, G. C. Plant efficiencies in the use of nitrogen phosphorus and potassium. In: WHIGHT, M.J. (Ed.). **Proceedings of workshop on plant adaptation to mineral stress in problem soils**. Beltsville: Maryland, 1976. p. 161-173.

GRANT, C. A. et al. A importância do fósforo no desenvolvimento inicial da planta. **Informações agronômicas**. Piracicaba, v. 95, p. 1-16, 2001.

GREGORY, P. J. Crescimiento y funcionamiento de las raíces. In: WILD, A. (Coord.). **Condiciones del suelo y desarrollo de las plantas según Russel**. Madrid: Mundi-Prensa, 1992. p. 121-175.

GUIMARÃES, L. J. M. et al. **Caracterização de genótipos de milho desenvolvidos sob estresse de nitrogênio e herança da eficiência de uso deste nutriente**. 2006. 110 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2016.

HAIR JUNIOR, J. F. et al. **Análise multivariada de dados**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2005. 600 p.

HAVLIN, J. L. et al. **Soil fertility and fertilizers: an introduction to nutrient management**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1999. 499 p.

HISSAO KURIHARA, C. et al. Acúmulo de matéria seca e nutrientes em soja, como variável do potencial produtivo. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 60, n. 5, 2013.

HYLAND, C. K. et al. Phosphorus basics- The phosphorus cycle. **Agronomy Fact Sheet Series**, Ithaca, v. 12, p. 1-2, 2005.

ISRAEL, C. D. W.; RUFTY, J. W. Influence of phosphorus nutrition on phosphorus and nitrogen utilization efficiencies and associated physiological responses in soybean.

Crop Science, Madison, v. 28, n. 6, p. 954-960, 1988.

<https://doi.org/10.2135/cropsci1988.0011183X002800060018x>

JOHNSON, R. A.; WICHERN, D. W. **Applied Multivariate Statistical Analysis**. New Jersey: Englewood Cliffs. 1992. 642 p.

KIIHL, R. A. S.; GARCIA, A. The use of the long-juvenile train in breeding soybean cultivars. In: PASCALE, A. J. (Ed.). **World soybean research conference**, 4., Buenos Aires: Association Argentina de la soja, 1989. p. 994-1000.

KOCHIAN, L. V.; HOEKENGA, O. A.; PINERÓS, M. A. How do crop plants tolerate acid soils? Mechanisms of aluminum tolerance and phosphorus efficiency. **Annual Review of Plant Biology**, Palo Alto, v. 55, p. 459-493, 2004.

<https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.55.031903.141655>

KRZYŻANOWSKI, F. C. et al. **A semente de soja como tecnologia e base para altas produtividades**. Embrapa Soja, 2008. 8 p. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/en/soja/busca-de-publicacoes/-/publicacao/457138/a-semente-de-soja-como-tecnologia-e-base-para-altas-produtividades-serie-sementes>>. Disponível em: Acesso em: 3 dez. 2017.

LABOSKI, C. A. M.; LAMB, J. A. Chances in soil test phosphorus concentration after application of manure or fertilizer. **Soil Science Society of America Journal**, [S.I.], v. 67, n. 2, p. 544-554, 2003.

LIÃO, H. et al. Phosphorus and Aluminum Interactions in Soybean in Relation to Aluminum Tolerance. Exudation of Specific Organic Acids from Different Regions of the Intact Root System. **Plant Physiology**, Rockville, v. 141, n. 2, p. 674–684, 2006. <https://doi.org/10.1104/pp.105.076497>

LIMA, J. M.; ANDERSON, S. J.; CURTI, N. Phosphate induced clay dispersion as related to aggregate size and composition in Hapludoxs. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 64, p. 892-897, 2000.

LIU, Y. et al. Rhizosphere effect and root growth of two maize (*Zea mays* L.) genotypes with contrasting P efficiency at low P availability. **Plant Science**, Shannon, v. 167, n. 2, p. 217-223, 2004.

MACHADO, C. T. T. **Avaliação da eficiência de utilização de fósforo de variedades locais de milho (*Zea mays* L.)**. 1995. 131 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Itaguaí, 1995. <https://doi.org/10.1590/S0006-87052001000300010>

MACHADO, C. T. T.; FURLANI, A. M. C.; MACHADO, A. T. Índices de eficiência de variedades locais e melhoradas de milho a fósforo. **Bragantia**, Campinas, v. 60, n. 3, p. 225-238, 2001.

MAIA, C. et al. The difference between breeding for nutrient use efficiency and for nutrient stress tolerance. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, Viçosa, v. 11, n. 3, p. 270-275, 2011.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de planta**. São Paulo: Editora Agronômica, Ceres. 2006, 638 p.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional de plantas: princípios e aplicações**. Piracicaba: Potafos, 1997. 308 p.

MANLY, B. F. J. **Multivariate statistical methods: a primer**. 3 ed. London: Chapman & Hall/CRC, 2004. 214 p. <https://doi.org/10.1201/b16974>

MARIANO, F. M. Precipitações pluviais e a cultura da soja em Goiás. **Mercator**, Fortaleza, v. 9, n. 1, 2010.

MARIN, R. S. F. Efeito da adubação fosfatada na produção de sementes de soja. **Ceres**, Viçosa, v. 62, n. 3, 2015.

- MARQUES, M. C. **Adaptabilidade, estabilidade e divergência genética de cultivares de soja em três épocas de semeadura, em Uberlândia, MG.** 2010. 84 f. 2010. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.
- MARSCHNER, H. Mechanisms of adaptation of plants to acid soils. **Plant and soil**, Dordrecht, v.1, n.1, p. 1-20. 1991.
- MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of plants**. London: Academic Press, 2012. 651 p.
- MARTINEZ, B. M. et al. Considerações sobre a identificação dos fatores de formação do preço da soja no estado de Mato Grosso. **Revista Nexos Econômicos**, Salvador, v. 8, n. 2, p. 7-20, 2016. <https://doi.org/10.9771/1516-9022rene.v8i2.15346>
- MATSUO, E.; FERREIRA, S. C.; SEDIYAMA, T. Botânica e Fenologia. In: SEDIYAMA, T.; SILVA, F.; BORÉM, A. (Ed.) **Soja: do plantio à colheita**. UFV, Viçosa, 2015, p. 27-53.
- MATTA, L. B. **Melhoramento genético da Soja (Glycine Max (L.) Merrill) para baixo teor de ácido linolênico.** 2008. 58 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.
- MELO, C. L. P. A escolha da semente ideal de soja. **Revista Campo e Negócios**, 2014. Disponível em: <<http://www.revistacampoenegocios.com.br/a-escolha-da-semente-ideal-de-soja/>>. Acesso em: 19 dez. 2017.
- MELO, R. W. **Parametrização de modelo para estimação da produtividade de soja nas regiões do Planalto Médio, das Missões e do Alto Vale do Uruguai, Rio Grande do Sul.** 2005. 196 f. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.
- MENDES, F. F. **Controle genético da eficiência no uso de fósforo em milho tropical.** 2012. 134 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2012.
- MENDES, F. F. et al. Genetic architecture of phosphorus use efficiency in tropical maize cultivated in a low-P soil. **19 Crop Science**, Madison, v. 54, n. 4, p. 1530-1538, 2015.
- MENDES, F. F. et al. Seleção simultânea para eficiência de uso e resposta ao fósforo em híbridos de milho. In: **Embrapa Milho e Sorgo-Artigo em anais de congresso (ALICE)**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MELHORAMENTO DE PLANTAS, 6., 2011, Búzios. Panorama atual e perspectivas do melhoramento de plantas no Brasil. [Búzios]: SBMP, 2011.
- MENDES, I. C.; REIS JÚNIOR, F. B. **Micro-organismos e disponibilidade de fósforo (P) nos solos: uma análise crítica.** Planaltina: Embrapa Cerrados, 2003. 26 p.
- MISSÃO, M. R. SOJA, ORIGEM, CLASSIFICAÇÃO, UTILIZAÇÃO E UMA VISÃO ABRANGENTE DO MERCADO. **Maringá Management**, Maringá, v. 3, n. 1, 2008.

MIYASAKA, S.; MEDINA, J. C. **A Soja no Brasil**. Campinas: Instituto de Tecnologia de Alimentos, p. 65-104, 1981.

MOLL, R. H.; KAMPRATH, E. J.; JACKSON, W. A. Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen utilization. **Agronomy Journal**, Madison, v. 74, n. 3, p. 562–564, 1982.

<https://doi.org/10.2134/agronj1982.00021962007400030037x>

MORAES, J. F. V.; RABELO, N. A. **Um método simples para a digestão de amostra de plantas**. Goiânia: EMBRAPACNPAF, 1986. 12 p.

MULLER, L. Taxionomia e morfologia. In: MIYASAKA, S.; MEDINA, J. C. (Ed.). **A soja no Brasil**. Campinas: Instituto de Tecnologia de Alimentos, 1981. p. 65-104.

MUNIZ, A. S. et al. Nível crítico de fósforo na parte aérea da soja como variável do fator capacidade de fósforo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 9, n. 3, p. 237-243, 1985.

OLIVEIRA, J. R. T. **Utilização de procedimentos multivariados na produtividade agrícola e climática na região sudeste do estado de Mato Grosso**. 2009. 103 f. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2009.

OZTURK, L. et al. Variation in phosphorus efficiency among 73 bread and durum wheat genotypes grown in a phosphorus-deficient calcareous soil. **Plant and Soil**, The Hague, v. 69, n. 1-2, p. 69-80, 2005. <https://doi.org/10.1007/s11104-004-0469-z>

PAVINATO, P. S.; ROSOLEM, C. A. Disponibilidade de nutrientes no solo-decomposição e liberação de compostos orgânicos de resíduos vegetais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 3, 2008. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000300001>

PINTO, F. A. **Sorção e Dessorção de Fósforo em Solos do Cerrado**. 2012. 36 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Jataí, 2012.

NOGUEIRA, A. P. O. **Análise discriminante na caracterização de novos descritores em soja**. 2007, 96 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, MG.

NOGUEIRA, A. P. O. et al. **Morfologia, crescimento e desenvolvimento**. In: SEDIYAMA, T. (Ed.). **Tecnologias de produção e usos da soja**. Londrina: Mecnas, 2009, p. 7-16.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa: UFV, 1999. 399 p.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J.; NUNES, F. N. Fósforo. In: NOVAIS, R. F. et al. (Ed.). **Fertilidade do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 471-550.

NUNES, R. S. **Eficiência de uso do fósforo em sistemas de manejo do solo e adubação fosfatada por um longo período.** 2014. 150 f. Tese (Doutorado) - Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

ODA, M. C. et al. Phenotypic and molecular traits diversity in soybean launched in forty years of genetic breeding. **Agronomy Science and Biotechnology**, Mecnas, v.1, n. 1, p. 1- 9, 2015.

OLIVEIRA, I. P. et al. Avaliação de cultivares de feijão quanto à eficiência no uso de fósforo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 22, n. 1, p. 39-45, 1987.

OLIVEIRA JUNIOR, A. et al. **Estádios fenológicos e marcha de absorção de nutrientes da soja.** Londrina: Embrapa Soja, 2016. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/en/web/mobile/publicacoes/-/publicacao/1047123/estadios-fenologicos-e-marcha-de-absorcao-de-nutrientes-da-soja>>. Acesso em: 12 dez. 2017

OLIVEIRA W. R. et al. Tolerância de genótipos de pimentão ao baixo teor de fósforo não solo. **Bragantia**, Campinas, v. 58, n. 1, p. 125-139, 1999.
<https://doi.org/10.1590/S0006-87051999000100013>

PARENTONI, S. N. et al. Eficiência na utilização de fósforo em genótipos de milho. In: **CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO**, 23. 2000, Uberlândia, MG. Sete Lagoas: ABMS: Embrapa Milho e Sorgo; Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2000.

PARENTONI, S. N.; MENDES, F. F.; GUIMARÃES, L. J. M. Melhoramento para eficiência no uso de P. In: FRITSCHÉ-NETO, R.; BORÉM, A. **Melhoramento de plantas para condições de estresses abióticos.** Visconde do Rio Branco: Suprema, 2011. 250 p.

PARENTONI, S. N. et al. Seleção para tolerância ao alumínio e eficiência de utilização do fósforo. In: SIMPÓSIO SOBRE ATUALIZAÇÃO EM GENÉTICA E MELHORAMENTO DE PLANTAS, 2006, Lavras. Melhoramento de plantas visando a tolerância a estresses abióticos: **anais...** Lavras: UFLA, 2006. p. 23-28.

PAULA, G. S. **Responsividade e eficiência do uso de fósforo de cultivares de soja.** 2016. 44 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2016.

PROCÓPIO, S. O. et al. Absorção e utilização do fósforo pelas culturas da soja e do feijão e por plantas daninhas. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Viçosa, v. 29, n. 6, 2005.

QUAREZEMIN, M. et al. Marcha de acúmulo de micronutrientes por cultivares de soja com tecnologia RR® E INTACTA®. In: **Embrapa Soja-Artigo em anais de congresso (ALICE)**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SOJA, 7; MERCOSOJA, 2015, Florianópolis. Tecnologia e mercado global: perspectivas para soja: anais. Londrina: Embrapa Soja, 2015.

QUEIROZ, F. A. Impactos da sojicultura de exportação sobre a biodiversidade do Cerrado. **Sociedade e Natureza**, Uberlândia, v. 21, n. 2, p. 193-209, 2009.
<https://doi.org/10.1590/S1982-45132009000200013>

- RAGHOTHAMA, K. G.; KARTHIKEYAN, A. S. Phosphate acquisition. **Plant and Soil**, The Hague, v. 274, p. 37-49, 2005. <https://doi.org/10.1007/s11104-004-2005-6>
- RAGHOTHAMA, K. G. Phosphate acquisition. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, Washington, v. 50, n. 1, p. 665-693, 1999. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.50.1.665>
- RAMALHO-FILHO, A.; BEEK, K. J. **Sistema de avaliação da aptidão agrícola das terras**. 3. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPS, 1995. 65 p.
- REINA, E. et al. Multivariate analysis of phosphorus use efficiency in soybean, targeting the carbohydrate content in the state of Tocantins. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 30, n. 5, p. 1371-1379, 2014.
- RENCHER, A. C. **Methods of multivariate analysis**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 2002. 738 p. <https://doi.org/10.1002/0471271357>
- RESENDE, A. V. **Fontes e modos de aplicação de fósforo para o milho em solo cultivado da região do cerrado**. 2004. 169 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2004.
- RHEINHEIMER, D. S. **Dinâmica do fósforo em sistemas de manejo de solos**. 2000. 210 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.
- RIBEIRO, G. R. S. **Características agronômicas e divergência genética de cultivares de soja sob diferentes condições de fósforo**. 2012. 49 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Tocantins, Gurupi, 2012.
- RICHARDSON, A. E. et al. Acquisition of phosphorus and nitrogen in the rhizosphere and plant growth promotion by microorganisms. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 321, n. 1-2, p.305-339, 2009.
- RIPLEY, B. S. et al. Quantification of the photosynthetic performance of phosphorus-deficient Sorghum by means of chlorophyll-a fluorescence kinetics. **South African Journal of Science**, Pretoria, v.100, n.11, p.615-618, 2004.
- ROSOLÉM, C. A. **Nutrição mineral e adubação de soja**. Piracicaba: Instituto Potassa e Fosfato. 1982. 80 p. (Boletim técnico. 6).
- ROSOLÉM, C. A.; TAVARES, C. A. Sintomas de deficiência tardia de fósforo em soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, p. 385-389, 2006.
- ROTILI, E. A. et al. Eficiência do uso e resposta à aplicação de fósforo de cultivares de arroz em solos de terras altas. **Bragantia**, Campinas, v. 69, n. 3, 2010.
- ROY, E. D. et al. The phosphorus cost of agricultural intensification in the tropics. **Nature plants**, [S.I.], v. 2, n. 5, p. 16043, 2016.

- RUFO, T. F. **A inserção dos Cerrados Piauienses na dinâmica da agricultura moderna no Brasil Central: transformações na rede urbana do Sudoeste do Piauí.** 2016. 270 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Brasília, Brasília, 2016.
- SÁNCHEZ, R. R. Terminología genética y fitogenética. **Editorial Trillas**, México, 1987. 163 p.
- SÁ, T. M., ISRAEL, D. W. Nitrogen assimilation in nitrogen-fixing soybean plants during phosphorus deficiency. **Crop Science**, Madison, v.35, n.3, p. 814-820, 1995. <https://doi.org/10.2135/cropsci1995.0011183X003500030030x>
- SCHACHTMAN, D. P.; REID, T. J.; AYLING, S. M. Phosphorus uptake by plants: from soil to cell. **Plant Physiology**, Bethesda, v.116, n. 2, p. 447-453, 1998. <https://doi.org/10.1104/pp.116.2.447>
- SCHERER, E. E. Níveis críticos de potássio para a soja em Latossolo húmico de Santa Catarina. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, 1998, p. 57 - 62.
- SEDIYAMA, T. et al. **Cultura da soja – Parte I.** Viçosa: Imprensa Universitária da Universidade Federal de Viçosa, 96 p. 1985.
- SEDIYAMA, T.; SILVA, F.; BORÉM, A. **Soja: do plantio à colheita.** Viçosa, MG: UFV, 2015, 333 p.
- SEDIYAMA, T. **Tecnologias de produção e usos da soja.** Londrina: Mecenias, 2009. 314 p.
- SEDIYAMA, T.; TEIXEIRA, R. C.; REIS, M. S. Melhoramento da soja. In: BORÉM, A. (Ed.). **Melhoramento de espécies cultivadas.** Viçosa: UFV, 2005, p. 553-604.
- SIDDIQI, M. Y.; GLASS, A. D. M. Utilization index: a modified approach to the estimation and comparison of nutrient utilization efficiency in plants. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v.4, n. 3, p. 289-302, 1981. <https://doi.org/10.1080/01904168109362919>
- SFREDO, G. J. **Soja no Brasil: calagem, adubação e nutrição mineral.** Londrina: Embrapa Soja, 2008. 148 p.
- SILVA, D. C; DA SILVA LIMA, L. H; BRACCINI, A. L. Nutrição mineral e ferramentas para o manejo da adubação na cultura da soja. **Scientia Agraria Paranaensis**, Marechal Cândido Rondon, v. 14, n. 3, p. 132-140, 2016a.
- SILVA, F. D. S. **Caracterização de genótipos de soja quanto à eficiência de uso de fósforo.** 2016. 29 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2016b.
- SILVA, L. A. **Fenotipagem para a eficiência de fósforo em linhagens de sorgo.** 2012. 98 f. tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2012.

- SILVA, R. B. et al. Alterações de propriedades físicas e hídricas de um Latossolo Vermelho distrófico pela adsorção de fósforo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 4, p. 791-798, 2001.
- SMALING, E. M. A. et al. From forest to waste: Assessment of the Brazilian soybean chain, using nitrogen as a marker. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 128, n. 3, p. 185–197, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2008.06.005>
- SMITH, S. N. Response of Inbred Lines and Crosses in Maize to Variations of Nitrogen and Phosphorus Supplied as Nutrients1. **Agronomy Journal**, v. 26, n. 9, p. 785-804, 1934. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167880908001795>>. Acesso em: 29 dez. 2017.
- SOARES, M. M. **Nodulação, nutrição, componentes de rendimento e qualidade de sementes de soja em função do recobrimento de sementes e parcelamento da adubação fosfatada**. 2013. 181 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013.
- SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. Adubação fosfatada em solos da região do Cerrado. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. S. **Fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba, Potafos, 2004. p. 157-200.
- SOUSA, D. M. G.; REIN, T. A.; SANTOS JUNIOR, J. **Manejo da adubação fosfatada para culturas anuais no cerrado**. Planaltina: EMBRAPA Cerrados, 2016. 10 p.
- SOUZA, J. R. et al. Eficiência do fósforo revestido com polímeros na cultura da soja. **Acta Iguazu**, Cascavel, v. 3, n. 4, p. 1-9. 2014.
- STRIEDER, M. L. **Deficiência de fósforo em Arabidopsis thaliana: caracterização de mutantes e interações nutricionais**. 2009. 217 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.
- TANAKA, R. T.; MASCARENHAS, H. A. A. **Soja, nutrição, correção do solo e adubação**. Campinas: Fundação Cargill, 1992. 60 p.
- TERUEL, D. A. et al. Alterações estruturais do sistema radicular de soja em resposta à disponibilidade de fósforo no solo. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 58, n. 1, p. 55-60, 2001. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162001000100010>
- TRIGO, L. F. N. et al. Efeito o conteúdo de fósforo na semente de soja sobre o rendimento da planta resultante. **Revista Brasileira de Sementes**, Brasília, v.19, n. 1, p. 111-115. 1997. <https://doi.org/10.17801/0101-3122/rbs.v19n1p111-115>
- UEXKULL, H. R.; MUTERT, E. Global extent, development and economic impact of acid soils. **Plant and Soil**, The Hague, v. 171, N. 1, p. 1-15, 1995. <https://doi.org/10.1007/BF00009558>

UNITED STATE DEPARTMENT OF AGRICULTURE- USDA. **World Agricultural Production**. Department of Agriculture Foreign Agricultural Service, 2017. Disponível em: <<https://www.fas.usda.gov/data/world-agricultural-production>>. Acesso em: 15 dez. 2017.

VANCE, C. P.; UHDE-STONE, C.; ALLAN, D. L. Phosphorus acquisition and use; Critical adaptations by plant for securing a nonrenewable resource. **New Phytologist**, Cambridge, v. 157, n. 3, p. 423- 447, 2003. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2003.00695.x>

VENEKLAAS, E. J. et al. Opportunities for improving phosphorus-use efficiency in crop plants. **New Phytologist**, Massachusetts, v. 195, n. 2, p. 306-320, 2012. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2012.04190.x>

VENTIMIGLIA, L. A. et al. Potencial de rendimento da soja em razão da disponibilidade de fósforo no solo e dos espaçamentos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 02, p. 195-199, 1999. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X1999000200007>

VERNETTI, F. J., VERNETTI JÚNIOR, F. J. V. **Genética da soja: caracteres qualitativos e diversidade genética**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2009. 221 p.

WALKER, W. M.; RAINES, G. A. Effect of corn cultivar, phosphorus and potassium on yield and chemical composition. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 11, n. 12, p. 1715 - 1726, 1988. <https://doi.org/10.1080/01904168809363927>

WHITE, P. J.; BROADLEY, M. R.; GREGORY, P. J. Managing the nutrition of plants and people. **Applied and Environmental Soil Science**, v. 2012, 2012. Disponível em: <<https://www.hindawi.com/journals/aess/2012/104826/abs/>>. Acesso em: 29 nov. 2017.

YAN, X. et al. Plant nutriomics in China: an overview. **Annals of Botany**, v. 98, n. 3, p. 473–482. 2006. Disponível em: <<https://academic.oup.com/aob/article/98/3/473/251071>>. Acesso em: 17 nov. 2017.

YAMADA, T. Nutrição e adubação para soja de alta produtividade no Brasil. In: SIMPÓSIO SOBRE ROTAÇÃO SOJA/MILHO NO PLANTIO DIRETO, 2000, Piracicaba. **Anais**. Piracicaba, Potafos, 2000. 71p.

ZHOU, T. et al. Genotypic Differences in Phosphorus Efficiency and the Performance of Physiological Characteristics in Response to Low Phosphorus Stress of Soybean in Southwest of China. **Frontiers in plant science**, v. 7, p. 1776, 2016. Disponível em: <<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2016.01776/full>>. Acesso em: 19 nov. 2017.