

CAIO BUAINAIN LINS

**MODELAGEM DE NÍVEIS CRÍTICOS DE P E DE K NO SOLO E DA
DEMANDA NUTRICIONAL PARA SOJA**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2016

Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa

T

L759d
2016 Lins, Caio Buainain, 1983-
Modelagem de níveis críticos de P e de K no solo e da
demanda nutricional para soja / Caio Buainain Lins. – Viçosa,
MG, 2016.
x, 100f. : il. ; 29 cm.

Inclui anexo.

Inclui apêndices.

Orientador: Júlio César Lima Neves.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Inclui bibliografia.

1. Fertilidade do solo. 2. Solos - Adubos e fertilizantes.
3. Plantas - Nutrição. 4. Solos e nutrição de plantas. 5. Soja.
I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Solos.
Programa de Pós-graduação em Solos e Nutrição de Plantas.
II. Título.

CDD 22. ed. 631.8

**MODELAGEM DE NÍVEIS CRÍTICOS DE P E DE K NO SOLO E DA
DEMANDA NUTRICIONAL PARA SOJA**

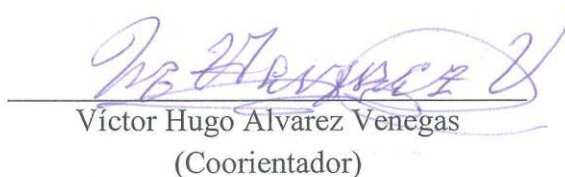
Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

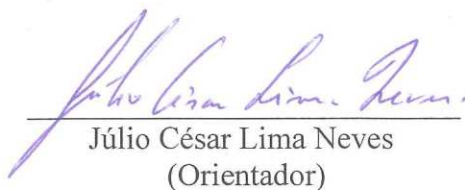
APROVADA: 23 de março de 2016.


Hermínia Emília Prieto Martinez


Lafayete Gonçalves Campelo Martins


Renildes Lúcio Ferreira Fontes


Víctor Hugo Álvarez Venegas
(Coorientador)


Júlio César Lima Neves
(Orientador)

“Porque Deus amou o mundo de tal maneira que deu o seu Filho unigênito, para que todo aquele que nele crê não pereça, mas tenha a vida eterna.”

João 3:16

*Dedico a minha esposa Rafaela e aos
meus pais Iberê e Eliane*

AGRADECIMENTOS

A Jesus Cristo, por tudo.

À minha esposa Rafaela pelo amor, companheirismo, compreensão e paciência.

Ao meu pai, Iberê pelo incentivo e princípios profissionais transmitidos. À minha mãe pela educação e dedicação que teve por mim.

Ao meu irmão Leandro pela amizade e incentivo.

Aos Professores Júlio Neves e Víctor Hugo pelas orientações.

Ao Professor Júlio Neves pela amizade, ensinamentos, paciência e oportunidades que muito contribuíram para minha formação pessoal e acadêmica.

Ao Professor Víctor Hugo, pela amizade, bem como pelos valores profissionais e pessoais transmitidos.

Aos professores do Departamento de Solos pela dedicação no trabalho para minha formação acadêmica e profissional.

A todos os funcionários do Departamento de Solos pelo empenho do dia a dia do trabalho.

À Universidade Federal de Viçosa (UFV), por intermédio do Departamento de Solos, pela oportunidade de realizar esse curso.

A todos os amigos do Departamento de Solos da UFV pela amizade e convívio harmonioso.

Ao Pastor Aldeir e sua esposa Bete, bem como aos demais membros da Igreja Comunidade Batista da Paz, pela amizade, companheirismo e orações em meu favor.

À CAPES e ao CNPq pela concessão da bolsa e pelo apoio financeiro ao trabalho.

BIOGRAFIA

CAIO BUAINAIN LINS, filho de Iberê Delmar Gondin Lins e Eliane Buainain Coelho, nasceu no dia 04 de junho de 1983, em Campo Grande, Mato Grosso do Sul.

Em março de 2004, iniciou o curso de Agronomia na Universidade Para o Desenvolvimento do Estado e da Região do Pantanal (UNIDERP), graduando-se em 2008.

Estagiou e trabalhou na empresa Solos Laboratório de Análises Consultoria e Informática Ltda desde janeiro de 2004 até fevereiro de 2010.

Em agosto de 2010, iniciou o curso de Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas, na Universidade Federal de Viçosa, concluindo-o em julho de 2012.

Em abril de 2013, iniciou o curso de Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas, na Universidade Federal de Viçosa, concluindo-o em março de 2016.

SUMÁRIO

	Pág.
RESUMO	viii
ABSTRACT	x
INTRODUÇÃO GERAL	1
Referências bibliográficas	3
Capítulo 1 – Eficiência nutricional superior e demanda inferior de P para a cultura da soja	5
Resumo	5
Abstract	7
Tabela de abreviações e seus significados	9
1. Introdução	10
2. Material e Métodos	11
2.1. Caracterização do banco de dados	11
2.2. Produção de matéria seca da planta, demandas de P na planta e no grão e os coeficientes de utilização biológicos do P na planta e no grão	12
2.3. Estatísticas descritivas e testes de t dos coeficientes de utilização biológicos de P na planta e no grão	14
2.4. Modelos matemáticos utilizados para estimativa dos coeficientes de utilização biológicos superiores e médios de P na planta e no grão	15
2.5. Demanda inferior é média de P na planta e no grão	15
2.6. Caracterização dos talhões com maior produtividade e coeficiente de utilização biológico de P na planta	17
2.7. Índice de colheita de P	17
3. Resultados e Discussão	18
3.1. Estatísticas descritivas e testes de t dos coeficientes de utilização biológicos de P na planta e no grão	18
3.2. Modelos matemáticos utilizados para estimar os coeficientes de utilização biológicos de P na planta e no grão	20
3.3. Demanda inferior e média de P na planta e no grão de acordo com a produção	22
3.4. Caracterização dos talhões com maior produtividade e eficiência no uso de P na planta	25
3.5. Índice de colheita de P na soja	28
4. Conclusões	29
5. Referências bibliográficas	30

Capítulo 2 – Eficiência nutricional superior e demanda inferior de K para a cultura da soja	34
Resumo	34
Abstract	36
Tabela de abreviações e seus significados	38
1. Introdução	39
2. Material e Métodos	40
2.1. Caracterização do banco de dados	40
2.2. Produção de matéria seca da planta, demandas de K na planta e no grão e os coeficientes de utilização biológicos do K na planta e no grão	41
2.3. Estatísticas descritivas e testes de t dos coeficientes de utilização biológicos de K na planta e no grão	43
2.4. Modelos matemáticos utilizados para estimativa dos coeficientes de utilização biológicos superiores e médios de K na planta e no grão	44
2.5. Demanda inferior é média de K na planta e no grão	44
2.6. Caracterização dos talhões com maior produtividade e coeficiente de utilização biológico de K na planta	46
2.7. Índice de colheita de K	46
3. Resultados e Discussão	47
3.1. Estatísticas descritivas e testes de t dos coeficientes de utilização biológicos de K na planta e no grão	47
3.2. Modelos matemáticos utilizados para estimar os coeficientes de utilização biológicos de K na planta e no grão	49
3.3. Demanda inferior e média de K na planta e no grão de acordo com a produção	51
3.4. Caracterização dos talhões com maior produtividade e eficiência no uso de K na planta	55
3.5. Índice de colheita de K na soja	58
4. Conclusões	60
5. Referências bibliográficas	60
Capítulo 3 – Níveis críticos de P e K nos solos com base no requerimento e na eficiência nutricional das lavouras de soja do Brasil Central	65
Resumo	65
Abstract	67
Tabela de abreviações e seus significados	69
1. Introdução	70
2. Material e Métodos	72
2.1. O modelo utilizado para calcular requerimento de P e K para a	72

cultura da soja	
2.2.1. Modelos utilizados para calcular as demandas inferiores e médias de P e K em lavouras de soja da região Central do Brasil	72
2.2.2. Taxas de recuperação utilizadas para calcular os requerimentos inferiores e médios de P e K em lavouras de soja da região Central do Brasil	73
2.3. Estimativa da produtividade e da dose de requerimento de P e K de máxima eficiência econômica e do nível crítico de P e K por Mehlich-1 no solo, para cultura da soja na região Central do Brasil	74
2.3.1. Método de determinação da produtividade de máxima eficiência econômica 1	74
2.3.2. Método de determinação da produtividade de máxima eficiência econômica 2	76
2.3.3. Método de determinação da produtividade de máxima eficiência econômica 3	77
2.3.4. Método de determinação da produtividade de máxima eficiência econômica 4	78
2.4. Estimativa dos níveis críticos de P resina no solo, para a cultura da soja na região Central do Brasil	78
2.5. Comparação entre os níveis críticos estimados e observados na literatura	79
3. Resultados e Discussão	79
3.1. Método de determinação da produtividade de máxima eficiência econômica 1	79
3.2. Estimativa da produtividade e da dose de requerimento de P e K de máxima eficiência econômica e do nível crítico de P e K no solo, para cultura da soja na região Central do Brasil	81
3.3. Modelo utilizado para estimativa de nível crítico de P resina no solo para cultura da soja	85
3.4. Comparação entre nível crítico de P e K estimado e observado no solo para cultura da soja	86
4. Conclusões	91
5. Revisões bibliográficas	92
CONCLUSÕES GERAIS	97
Anexo	98
1. Preços de fertilizantes e do grão de soja	98
2. Recomendação de adubação fosfatada e potássica para a cultura da soja na Região Central do Brasil	98

RESUMO

LINS, Caio Buainain, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, março de 2016. **Modelagem de níveis críticos de P e de K no solo e da demanda nutricional para soja.** Orientador: Júlio César Lima Neves. Coorientador: Víctor Hugo Alvarez Venegas.

O Brasil é o segundo maior exportador e produtor de soja (*Glycine max* L. Merrill) do mundo, sendo a maior parte dela produzida na região central do país. A produção de soja poderá praticamente dobrar até 2050. Esse aumento pode, entretanto, ser limitado pelos gastos com fertilização que podem chegar a 50 % dos custos de produção na cultura da soja. Por isso, a necessidade de utilização de modelos que permitam estimar com exatidão a demanda nutricional inferior da soja em função da produtividade almejada. Também seria de grande utilidade identificar como se caracterizam os fatores produtivos nas lavouras de soja com demanda nutricional inferior. Pois, isso permitiria obter níveis críticos dos nutrientes no solo mais ajustados a cada condição de eficiência e de demanda nutricional das lavouras de soja o que contribuiria para fertilizações mais sustentáveis. O presente trabalho teve como objetivos: determinar os valores superiores de eficiência nutricional e os valores inferiores de demanda nutricional da cultura da soja nas condições de solo e clima tropical do Brasil Central; bem como, caracterizar os fatores produtivo das lavouras de soja que se relacionam com a demanda nutricional inferior ou eficiência nutricional superior dos talhões com elevada produtividade, nas condições de solo e clima tropical do Brasil Central. Também teve como objetivo: determinar e comparar os níveis críticos de P e K dos solos do Brasil Central, obtidos com base na modelagem do nutriente requerido pela soja e por meio de diferentes métodos de determinação da produtividade de máxima eficiência econômica, para lavouras de soja com eficiência nutricional superior e média. A demanda inferior de P na planta e no grão correspondeu em média a 8,69 e 5,39 kg t⁻¹ de soja produzida, respectivamente. A demanda inferior de K na planta e no grão correspondeu em média a 25,15 e 11,27 kg t⁻¹ de soja produzida, respectivamente. A diferença das médias entre as demandas médias e inferior de P na planta e no grão corresponderam, respectivamente, a 2,19 e 0,75 kg t⁻¹ de grão produzido. A diferença das médias entre as demandas médias e inferior de K na planta e no grão corresponderam, respectivamente, a 9,73 e 1,66 kg t⁻¹ de grão produzido. Cultivares de soja com maior ciclo de maturação possuem maior eficiência de utilização de P e K. A modelagem do requerimento de P e K pode ser utilizada para obter os níveis críticos de P e K no solo para lavouras de soja com condições de eficiência nutricional superior e média. Os níveis críticos de P e K do solo, calculados a partir do método que determinou a produtividade de máxima eficiência

econômica por meio da derivada do lucro em função da produtividade foram aqueles que com maior frequência se relacionaram com os maiores lucros, para condições de lavouras de soja com $cubP, K_{PI}$ superior e médio da região Central do Brasil.

ABSTRACT

LINS, Caio Buainain, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, March, 2016. **Modeling critical levels of P and of K in soil and of nutrition demand for soybeans.** Adviser: Júlio César Lima Neves. Co-adviser: Víctor Hugo Alvarez Venegas.

Brazil is the largest exporter and second largest producer of soybeans (*Glycine max* L. Merrill), and most of it produced in the central region of Brazil. Soybean production is expected to nearly double by 2050. This increase, however, it is limited by spending fertilization that can reach 50% of production costs in the soybean crop. Therefore, the need to use models to estimate accurately the critical nutritional demand of soybean in function of yield. It would also be very useful to identify the conditions under which the critical nutritional demand of soybean crops occurs. This would provide nutrient critical levels in the soil adjusted for a specific condition of efficiency and nutritional demand of soybean, this would contribute for sustainable fertilization. This study aimed to: determine the maximum nutritional efficiency values and critical nutritional demand of soybean in conditions of soil and tropical climate of Central Brazil; and characterize the factors of production of soybean fields that is relate to the critical nutritional demands and nutritional efficiency limit in high yield conditions, in Central Brazil. It is also aimed to: determine and compare the critical levels of P and K of Central Brazil soils, obtained by modeling nutrient required of soybean and through different methods that determine soil critical level for soybean with medium and maximum nutritional efficiency. The minimum demand for P in plant and grain was: 8.69 and 5.39 kg t⁻¹ of grain yield, respectively. The minimum demand for K in plant and grain was: 25.15 and 11.27 kg t⁻¹ of grain yield, respectively. The mean difference between the medium demand and minimum demand of P in plant and grain corresponded, respectively, to 2.19 and 0.75 kg t⁻¹ of grain yield. The mean difference between the medium demand and minimum demand of K in plant and grain corresponded, respectively, to 9.73 e 1.66 kg t⁻¹ of grain yield. Soybean cultivars with higher maturation cycle were more efficient in the use of P and K. The critical levels of P and K in the soil, calculated by the method that determined the maximum economic yield through the profits derived as a yield function was the most frequently related with higher profits for the conditions of soybean crops with higher efficiency and average use of P and K in Brazil's Central region.

INTRODUÇÃO GERAL

O agronegócio brasileiro se destaca entre as nações mais competitivas na produção de commodities agroindustriais. Com destaque para o setor do complexo soja que em 2016 contribuiu para maior parte das exportações (25,61 %) do agronegócio brasileiro (MAPA, 2016). O Brasil é o segundo maior produtor e exportador de soja (*Glycine max* L. Merrill) (MAPA, 2014), e a maior parte dessa produção está concentrada na região Central do país (CONAB, 2014).

O Cerrado é o bioma que predomina na região Central do país (IBGE, 2016). Pesquisas referentes à fertilidade dos solos do Cerrado, geralmente ácidos e de baixa fertilidade natural, foram fundamentais para expansão do cultivo da soja na região Central do país. Fazem parte das pesquisas de fertilidade dos solos os trabalhos de calibração a campo que contribuíram para o desenvolvimento de tabelas de recomendação de corretivos e fertilizantes para diversas regiões e Estados do país.

Entretanto, algumas características dessas tabelas podem restringir o seu uso como: aplicação regional, mesmo quando não há diferenças edafoclimáticas entre os limites geográficos; as demandas nutricionais das plantas não variam com a produtividade; as recomendações de nutrientes são fixadas para cada faixa de disponibilidade de nutriente no solo (valores descontínuos) e não de valores contínuos; para cada faixa de produtividade as doses de recomendação são fixas, quando a produtividade é considerada (Santos et al., 2008).

Com intuito de otimizar as recomendações de corretivos e fertilizantes o Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa – UFV continua a desenvolver, desde as últimas duas décadas, modelos de recomendação de corretivos e fertilizantes. Esses modelos se baseiam no balanço entre o requerimento nutricional da cultura, para um dado potencial produtivo, e o suprimento de nutrientes pelo solo e resíduos orgânicos da cultura antecessora, conforme Oliveira *et al.* (2005), Santos *et al.* (2008) e Silva *et al.* (2009).

O requerimento de nutrientes (rNu_i) pela planta corresponde a demanda de nutrientes (dNu_i) em toda a planta dividida pela taxa de recuperação desses nutrientes pela planta ($trNu_i-Pl$): $rNu_i = dNu_i/trNu_i-Pl$. Enquanto, a demanda de nutrientes em toda a planta é calculada com base no somatório dos conteúdos dos nutrientes i nas diferentes partes j das plantas (cNu_{ij}): $dNu_i = \sum_j^j cNu_{ij}$. O conteúdo é calculado pela razão entre a massa de matéria seca (mMS_j) e o coeficiente de utilização biológico (cub)

do nutriente i por compartimento j das plantas ($cubNu_{ij}$): $cNu_{ij} = mMS_j \times cubNu_{ij}$. O cub é o quociente entre a quantidade de matéria seca produzida pela quantidade de nutriente absorvida (Barros et al., 1986). Dessa forma, as plantas mais eficientes no uso de um dado nutriente possuem os maiores valores de cub .

No modelo de recomendação de corretivos e fertilizantes para a cultura da soja (FERTICALC[®]-Soja) elaborado por Santos *et al.* (2008), os valores de cub foram obtidos a partir de levantamentos bibliográficos, resultando em valores de cub médios dos trabalhos consultados. Devido, à utilização do cub médio no FERTICALC[®]-Soja, ocorreu de haver relações lineares entre as produtividades e as doses de fertilizantes, fato que não expressa o comportamento biológico da cultura e que impossibilita as análises econômicas das doses de fertilizantes recomendadas pelo modelo. Além disso, grande parte dos trabalhos consultados para elaboração do FERTICALC[®]-Soja foram realizados com cultivares mais antigas. Os valores de eficiência nutricional e da demanda por nutrientes das variedades de soja mais antigas podem diferir daquelas utilizadas atualmente (Bender et al., 2015).

Entretanto, o uso de dados como a demanda por nutrientes e o cub provindos de cultivares de soja mais recente e em condições específicas de lavouras comerciais (a partir de avaliações a campo) poderiam tornar mais eficientes às predições das doses recomendadas pelos modelos de balanço nutricional. Com uso de banco de dados, provindos de lavouras comerciais, também seria possível identificar, pelo uso das técnicas de linha de fronteira, no relacionamento cub (y) e produtividade (x) as lavouras que apresentam os maiores valores de cub (linha de fronteira superior). Isso permitiria identificar e caracterizar os talhões de soja com maior eficiência no uso do nutriente (eficiência nutricional superior). Ao ser identificados os talhões de soja com eficiência nutricional superior também seria possível obter modelos que estimassem os maiores valores de cub em função da produtividade. A partir desses modelos poderiam ser estimadas as menores demandas por nutriente (demanda de nutrientes inferior) para a cultura da soja, o que poderia otimizar as recomendações de fertilizantes obtidas pelo FERTICALC[®]-Soja.

Além disso, o uso dos modelos que estimam os maiores valores de cub em função da produtividade poderiam contribuir para que a relação entre as produtividades e as demandas por nutrientes pelo FERTICALC[®]-Soja fosse curvilínea. Logo, a relação entre produtividade e requerimento por nutrientes também seria curvilínea o que permitiria calcular a economicidade das doses de fertilizantes requeridas pela cultura da soja. A partir da análise econômica das doses de fertilizantes recomendadas pode ser

obtida a produtividade de máxima eficiência econômica ($pMEE$), a dose de fertilizante de máxima eficiência econômica ($dFMEE$) (Grimm, 1970), bem como os níveis críticos de um nutriente no solo.

Entretanto, os níveis críticos de um nutriente no solo, as $pMEE$ e as $dFMEE$ são tradicionalmente obtidas por meio de experimentos de calibração, avaliados na condição de campo. Alguns inconvenientes podem ser citados a respeito da utilização de experimento de calibração, como: o elevado custo e a demanda tempo para obtenção do nível crítico de um nutriente no solo, da $pMEE$ e da $dFMEE$ em um determinado local ou para uma condição edafoclimática específica; a cada experimento de calibração são obtidas as $pMEE$, $dFMEE$ e o nível crítico para apenas um nutriente no solo; grande parte dos níveis críticos do nutriente no solo são obtidos com base em fertilizações associadas a 90 % da máxima produtividade obtida nas condições de campo. Entretanto, os níveis críticos variam com: a eficiência nutricional da planta (Silva et al., 2002); os preços da soja e dos insumos agrícolas (Maro et al., 2014); o clima (Mallarino & Blackmer, 1992); cultivares e modelos matemáticos utilizados para o cálculo (Coelho et al., 2013), entre outras condições que tornam questionável a utilização de um nível crítico universal, no solo.

A partir da modelagem do requerimento de P e K pela cultura da soja seria possível obter: a $pMEE$, a $dMEE$ e os níveis críticos desses nutrientes no solo. Na modelagem do requerimento de P e K pela cultura da soja também poderiam ser simulados diferentes cenários como: eficiência nutricional superior e média da cultura da soja; solos com diferentes capacidades tampão desses nutrientes e diferentes métodos para obtenção da produtividade de máxima eficiência econômica. Os métodos de determinação da $pMEE$ poderiam ser comparados para que o método que proporcionasse o maior lucro na produção de soja pudesse ser o mais indicado. Com a modelagem do requerimento de P e K pela cultura da soja também poderiam ser obtidas, para cada simulação, a $pMEE$, $dMEE$ e os níveis críticos de P e K no solo, de forma simultânea. Isso não ocorre nos experimentos de calibração, em que essas variáveis estão associadas à avaliação de apenas um nutriente no solo.

O presente trabalho tem como objetivo:

Determinar os valores de eficiência nutricional superior e da demanda nutricional inferior da cultura da soja nas condições de solo e clima tropical do Brasil Central.

Caracterizar os fatores de produção das lavouras de soja que apresentaram as demandas nutricionais inferiores e eficiência nutricional superior em condições de elevadas produtividades.

Determinar e comparar os níveis críticos de P e K dos solos do Brasil Central, obtidos com base na modelagem do nutriente requerido pela soja e por meio de diferentes métodos de determinação de nível crítico, para lavouras de soja com eficiência nutricional superior e média.

O trabalho foi dividido em três capítulos. No capítulo 1 foram obtidos os valores de eficiência nutricional e da demanda de P das lavouras com eficiência nutricional superior e média. No capítulo 2 foram obtidos os valores de eficiência nutricional e da demanda de K das lavouras com eficiência nutricional superior e média. Nos capítulos 1 e 2 também foram caracterizados os fatores de produção das lavouras de soja mais produtivas e com eficiência nutricional superior para P e K, respectivamente. Enquanto, no capítulo 3 foram determinados os níveis críticos de P e K no solo para cultura da soja com base na modelagem do nutriente requerido pela soja e por meio de diferentes métodos de determinação de nível crítico, para lavouras de soja com eficiência nutricional superior e média.

Referências bibliográficas

BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F.; CARMO D.N. & NEVES JCL. Classificação nutricional de sítios florestais – Descrição de uma metodologia. Rev. Árvore. 1986; 10:106-112.

BENDER, R.R.; HAEGELE, J.W. AND BELOW, F.E. Modern soybean varieties' nutrient uptake patterns. Better Crops with Plant Food. 2015; 99:7-10.

COELHO, F.S.; FONTES, P.C.R.; CECON, P.R.; BRAUN, H. & da SILVA, I.R. Valor e predição do nível crítico de índices para avaliar o estado nitrogenado da batateira. Rev. Ciênc. Agron. 44:115-122, 2013.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB; Séries Históricas. Disponível em <<http://www.conab.gov.br/conteudos.php/premiodevideospaa/docS/conteudos.php?a=1252&t=2#this>> Acessado em 06/03/2014.

GRIMM, S.S. Aspectos econômicos da adubação. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1970. 14p. (Boletim Técnico, 6)

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. Brasil em Síntese. Disponível em: <http://brasilemsintese.ibge.gov.br/territorio.html>. Acesso em: 18 de abril de 2016.

MALLARINO A.P. & BLACKMER, A.M. Comparison of methods for determining critical concentration of soil test phosphorus for corn. *Agronomy Journal*, 84:850–856, 1992.

MARO G.; JANSSEN B.; MSANYA B. & MREMA J. Economic optimization of nutrient application to coffee in northern Tanzania using SAFERNAC. *International Journal of Plant & Soil Science*. 3:1096-1111, 2014.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO - MAPA. AgroStat Brasil. Disponível em: <http://indicadores.agricultura.gov.br/agrostat/index.htm>. Acesso em: 16 de abril de 2016.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO - MAPA. Secretaria de Relações Internacionais do Agronegócio. Informe de produtos. 2013. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/internacional/indicadores-e-estatisticas/informes-de-produtos>. Acessado em 06/03/2014.

OLIVEIRA, F.H.T; NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H. & CANTARUTTI, R.B. Desenvolvimento de um sistema para recomendação de adubação para a cultura da bananeira. *R. Bras. Ci. Solo*. 2005; 29:131-143.

SANTOS, F.C.; NEVES J.C.L.; NOVAIS R.F.; ALVAREZ V.V.H. & SEDIYAMA C.S. Modelagem da recomendação de corretivos e fertilizantes para a cultura da soja. *R. Bras. Ci. Solo*. 2008; 32:1661-1674.

SILVA, A.P.; ALVAREZ V., V.H.; SOUZA, A.P.; NEVES, J.C.L.; NOVAIS, R.F. & DANTAS, J.P. Sistema de recomendação de fertilizantes e corretivos para a cultura do abacaxi - Fertcalc-Abacaxi. *R. Bras. Ci. Solo*. 2009; 33:1269-80.

SILVA S.R.; BARROS, N.F.; NOVAIS R.F. & PEREIRA P.R.G. Eucalypt growth and nutritional efficiency of potassium under soil compaction. *R. Bras. Ci. Solo*. 26:1001-1010, 2002.

Capítulo 1 – Eficiência nutricional superior e demanda inferior de P para a cultura da soja

Resumo

Os gastos com fertilização podem chegar a 50 % dos custos de produção na cultura da soja. Por isso, a necessidade de utilização de modelos que permitam estimar com exatidão a demanda nutricional inferior da soja em função da produtividade almejada. O presente trabalho teve como objetivos: determinar os valores de eficiência superior e da demanda inferior de P para a cultura da soja nas condições de solo e clima tropical do Brasil Central; bem como, caracterizar os fatores de produção das lavouras de soja que se relacionam com a demanda inferior e eficiência superior de P nas condições de elevada produtividade, nas condições de solo e clima tropical do Brasil Central. Para isso, utilizou-se um banco de dados referente a 673 talhões comerciais de soja, localizados no município de Campo Novo do Parecis (MT). O banco de dados continha, para cada talhão, as seguintes informações: produtividade, ciclo de maturação das cultivares, textura do solo, análises químicas do solo e da folha. Foram utilizados modelos matemáticos propostos por Kurihara et al. (2013), que permitiram estimar, por meio da produtividade de grãos e do conteúdo de fósforo no terceiro trifólio com pecíolo (cP_{Ttp}), a massa de matéria seca produzida pela planta (mMS_{Pl}) e os conteúdos de nutrientes extraídos pela planta (cP_{Pl}) e exportados pelo grão ($cP_{K_{Gr}}$). Com isso, foram obtidos os coeficientes de utilização biológico (cub) da planta (mMS_{Pl}/cP_{Pl}) e do grão (mMS_{Gr}/cP_{Gr}) para P. Os $cub_{P_{Pl,Gr}}$ dos talhões foram agrupados em classe textural e aqueles provenientes dos solos argilosos foram subdivididos em diferentes ciclos de maturação das cultivares. Os $cub_{P_{Pl,Gr}}$ foram submetidos a estatísticas descritivas e testes de t. Os valores dos $cub_{P_{Pl,Gr}}$ (y) em função da produtividade (x) foram relacionados em um gráfico de dispersão e foram selecionados os pares yx da linha de fronteira superior, que correspondem à população com eficiência nutricional superior, e médio. Foram ajustadas equações de regressão relacionando a produtividade com o $cub_{P_{Pl,Gr}}$, para a população de eficiência nutricional superior e média. Por meio da razão entre a $mMS_{Pl,Gr}$ e os $cub_{P_{Pl,Gr}}$ das populações de eficiência superior e média, no uso de P, foram obtidas as demandas inferiores e médias de P na planta e no grão ($d_{infP,K_{Pl,Gr}}$ e $d_{medP,K_{Pl,Gr}}$),

respectivamente. Com isso a produtividade de soja (y) foi relacionada, em um gráfico de dispersão com esses conteúdos (x). Foram obtidas as estatísticas descritivas (frequência absoluta, média e valores menores e maiores) dos principais fatores de produção na soja, bem como a frequência relativas das cultivares e de seus ciclos de maturação, as quais foram observados nas safras dos talhões com os maiores valores de *cubP_Pl* e elevadas produtividades. A demanda inferior de P na planta e no grão correspondeu em média a 8,69 e 5,39; kg t⁻¹ de grão produzido, respectivamente. A diferença média entre as demandas superiores e média de P na planta e no grão corresponderam, respectivamente, a 2,19 e 0,75 kg t⁻¹ de grão produzido. Cultivares de soja com maior ciclo de maturação foram mais eficientes na utilização de P.

Termos de Indexação: Coeficiente de utilização biológico de P na planta e no grão; conteúdo de P na planta e no grão; linhas de fronteira superior.

Chapter 1 – Boundary maximum nutritional efficiency and minimum demand of P for soybean

Abstract

Spending fertilization can reach 50% of production costs in the soybean crop. Therefore, is necessary to use models to estimate accurately the lower demand of P in soybean as a function of the desired yield. This study aimed to: determine the boundary nutritional efficiency values and lower demand of P in soybean in conditions of soil and tropical climate of Central Brazil; and characterize productions factors of soybean fields that relate to the lower demand and boundary efficiency of P in higher yields conditions of Central Brazil. For this, we used a database provided by 293 soybean commercial plots located in the city of Campo Novo do Parecis (MT). Each plot of this database contains: yield, maturation cycle of cultivars, soil texture, chemical analysis of soil and leaf. Were used mathematical models proposed by Kurihara et al., 2013 which allowed the estimation, by the yield and the content of P in the third trifoliolate with petiole (cP_{Ttp}), the dry matter produced by the plant (mMS_{Pl}) and nutrient content extracted by the plant (cP_{Pl}) and exported by grain (cP_{Gr}). Thus, the biological use coefficients were obtained ($cubP_{Pl}$) plant (mMS_{Pl} / cP_{Pl}) and grain (mMS_{Gr}/cP_{Gr}) for P. The $cubP_{Pl,Gr}$ of the stands were grouped into textural class and those from the clay soils were divided into different cycles of maturation of cultivars. These $cubP_{Pl,Gr}$ were submitted to descriptive statistics and t tests. The values of $cubP_{Pl,Gr}$ (y) as a function of productivity (x) are related in a scatter plot and were selected yx pair of the upper boundary line which corresponds to the upper boundary nutritional efficiency population, and lower nutritional efficiency. Regression equations were adjusted relating productivity with $cubP_{Pl,Gr}$, for the upper boundary and average nutritional efficiency. By the ration between mMS_{Pl} and $cubP_{Pl}$ of each population with the upper boundary and average efficiency in the use of P can be obtained minimum and medium demands of P in the plant and in grain ($d_{min}P_{Pl, Gr}$ and $d_{med}P_{Pl,Gr}$), respectively. The soybean productivity (y) was related in a scatter plot with such content (x). Descriptive statistics were obtained (absolute frequency, mean, lower and higher values) of the main production factors in soybeans, and the frequency on the cultivars and their maturation cycles, which were observed in the crops of the fields with the highest values of $cubP_{Pl}$ and high productivities. The minimum demand for P in plant and grain was: 8.69 and 5.39 kg t⁻¹ of grain yield, respectively. The mean difference

between the medium demand and minimum demand of P in plant and grain corresponded, respectively, to 2.19 and 0.75 kg t⁻¹ of grain yield. Soybean cultivars with higher maturation cycle were more efficient in the use of P.

Tabela de abreviações e seus significados

Variáveis	Significado	Materiais	Significado	Complementos	Significado
<i>C</i>	Conteúdo	Gr	Grão	C	Caule
<i>Cub</i>	Coeficiente de utilização biológico	MS	Matéria seca	m	Cultivar de ciclo médio
d_{inf}, dm_{inf}	Demanda inferior	P	Fósforo	PA	Parte aérea da planta
d_{med}	Demanda média			Pl	Planta
<i>Ic</i>	Índice de colheita			<i>p/t</i>	Para cada tonelada de grão de soja produzida Cultivar de ciclo
<i>M</i>	Massa			sp	semiprecoce e precoce Cultivar de ciclo
<i>P</i>	Produtividade de grão de soja			st	semitardio e tardio
<i>T</i>	Teor de nutriente			t	Todos os talhões
				Ttp	Terceiro trifólio com pecíolo (folha índice)
				V	Vagem

1. Introdução

O Brasil é o segundo maior exportador e produtor de soja (*Glycine max* L. Merrill) (MAPA, 2014), sendo a maior parte dela produzida na região central do país (CONAB, 2014). A produção em larga escala da soja e de outros grãos no Cerrado (região central do Brasil) somente tornou-se viável com o desenvolvimento de tecnologias de melhoria da fertilidade dos solos da região. Com o requerimento de grandes quantidades de fosfatos na correção da fertilidade desses solos e o elevado custo dos fertilizantes, justificam estudos para otimização da recomendação de adubos fosfatados.

Nesse contexto, torna-se indispensável à utilização de ferramentas que otimizem o uso de P na cultura, podendo-se citar como exemplo o modelo FERTICALC[®] (Santos et al., 2008), criado no Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa – UFV. Esse modelo de recomendação se baseia no balanço entre o requerimento nutricional da cultura e o suprimento de nutrientes pelo solo.

No módulo Requerimento do FERTICALC[®] o conteúdo do nutriente é estimado com base na meta de produtividade da cultura e em seu coeficiente de utilização biológico (*cub*). O *cub* é o quociente entre a quantidade de matéria seca produzida pela quantidade de nutriente absorvida (Barros et al., 1986). Pode-se dizer que plantas com maiores valores de *cub* para um dado nutriente são mais eficientes na utilização do mesmo.

No trabalho de Santos et al., 2008, foram considerados os valores de *cub* derivados da literatura, em termos da média dos trabalhos consultados, refletindo a eficiência de utilização de nutrientes de cultivares de soja mais antigas e com menores produtividades em relação às cultivares mais utilizadas atualmente. Por isso, a utilização de dados obtidos com variedades de soja mais atuais e cultivadas sob condições específicas de campo poderiam contribuir para predições mais adequadas dos valores de *cub* e, conseqüentemente, dos conteúdos nutricionais da cultura da soja.

Com o intuito de obter os valores de maior eficiência de P na cultura da soja do Brasil Central, seria de grande utilidade identificar no relacionamento *cub*P (y) e produtividade (x) as lavouras que apresentam os maiores *cub*P. Isso permitiria identificar plantas com maior eficiência no uso de P ou menor demanda de P, que no presente trabalho foram denominadas como “eficiência de P superior” e “demanda de P inferior”, respectivamente. Essas amostras poderiam ser identificadas por meio da utilização da técnica da linha de fronteira, especificamente pela linha de fronteira

superior. Essa técnica, apresentada por Webb (1972), permite isolar os talhões de maior resposta produtiva, (ou os de maiores *cubP*) e identificar como se comportam os fatores de produtividade nesses talhões (Shatar & McBratney, 2004).

Desse modo, o presente trabalho tem como objetivo:

Determinar os valores de eficiência de P superior e da demanda de P inferior da cultura da soja nas condições de solo e clima tropical do Brasil Central.

Caracterizar os fatores de produção das lavouras de soja que apresentaram as demandas de P inferior e a eficiência de P superior em condições de elevada produtividade.

2. Material e Métodos

2.1. Caracterização do banco de dados

Foi utilizado um banco de dados referente a 293 talhões comerciais de soja, localizados no município de Campo Novo do Parecis (MT). A altitude média é de 500 m e a área total é de 17 580 ha.

No banco de dados foram obtidos, para cada safra, as produtividades de grãos obtidas (umidade em torno de 130 g kg⁻¹), à precipitação pluviométrica, a classe textural do solo, bem como informações sobre correção do solo (quantidade e tipo de corretivo), adubação (tipo e quantidade de adubo aplicado) e ciclo de maturação das espécies cultivadas. Além disso, o banco de dados também contempla os resultados das análises químicas do solo e na folha índice (terceiro trifólio com pecíolo, Ttp). O banco de dados é referente a materiais coletados entre as safras de 1998/99 a 2002/03. Foi considerado que os dados obtidos a cada safra de um talhão de soja correspondessem a informações de uma lavoura de soja. Portanto, foi considerado que o banco de dados utilizados contemplou 673 lavouras (devido à ausência de dados em algumas safras).

Durante o cultivo de verão (outubro a março) a radiação média foi de 12,6 MJ m⁻² d⁻¹, a precipitação pluvial média de 1 908 mm (durante outubro a março, período do cultivo de verão no município de Campo Novo do Parecis), a temperatura mínima nesse mesmo período foi de 20,5 °C e a máxima de 31,3 °C. A maior parte dos solos estudados (87 %) são classificados como Latossolos Vermelhos distróficos de textura argilosa à média, sendo o restante (13 %) composto por Neossolos Quartzarênicos órticos (RQo).

As amostras de solo para análise química foram compostas por 12 amostras simples, sendo essas coletadas, a 15 cm de profundidade, logo após a colheita, entre abril e maio.

As amostras foliares (Ttp) foram coletadas no estágio R3 (final da floração: vagens com 1,5 cm), entre os quatro últimos nós superiores, em pelo menos 30 plantas.

2.2. Produção de matéria seca da planta, demandas de P na planta e no grão e os coeficientes de utilização biológicos do P na planta e no grão

Por meio dos modelos matemáticos desenvolvidos por Kurihara et al. (2013), foi estimado a massa de matéria seca do terceiro trifólio com pecíolo (mMS_Ttp ; t ha⁻¹), a massa de matéria seca da parte aérea da planta (mMS_PA ; t ha⁻¹) e massa de matéria seca do grão (mMS_Gr ; kg ha⁻¹) em função da produtividade (p ; t ha⁻¹), para cada lavoura de soja comercial provenientes desse banco de dados. Enquanto, a demanda de P na parte aérea da planta (dP_PA ; kg ha⁻¹) e no grão (dP_Gr ; kg ha⁻¹) foram estimada em função do conteúdo de P no terceiro trifólio com pecíolo (cP_Ttp ; kg ha⁻¹).

Desse modo, por meio desses modelos, foi estimado a massa de matéria seca do terceiro trifólio com pecíolo (mMS_Ttp) no estágio de desenvolvimento R2 em função da produtividade (p). Conforme, pode ser observado na Eq. 1.

$$mMS_Ttp = 0,044 e^{0,524**p} \quad R^2 = 0,65 \quad \forall 2,813 \leq p \leq 4,813 \text{ t ha}^{-1} \quad \text{Eq. 1}$$

Em que: mMS_Ttp : massa de matéria seca do terceiro trifólio com pecíolo (t ha⁻¹); p : produtividade (t ha⁻¹)

Também, por meio dos modelos matemáticos desenvolvidos por Kurihara et al. (2013), foi estimada a produção de matéria seca da parte aérea da planta (mMS_PA) no estágio de desenvolvimento R6 em função da produtividade (p) (Eq. 2).

$$mMS_PA = 0,717 e^{0,611**p} \quad R^2 = 0,75 \quad \forall 2,813 \leq p \leq 4,813 \text{ t ha}^{-1} \quad \text{Eq. 2}$$

Em que: mMS_PA : massa de matéria seca da parte aérea (t ha⁻¹); p : produtividade (t ha⁻¹)

A massa de matéria seca dos grãos (mMS_Gr) foi determinada considerando-se a produtividade de grãos com 130 g kg⁻¹ de umidade (p ; kg ha⁻¹) de cada safra do talhão (Eq. 3).

$$mMS_Gr = p 0,87$$

Eq. 3

Em que: mMS_Gr : massa de matéria seca dos grãos ($kg\ ha^{-1}$); p : produtividade ($kg\ ha^{-1}$)

Os modelos de Kurihara et al. (2013) não consideraram a produção de matéria seca das raízes de soja. Desse modo, foi considerado que a massa de matéria seca do sistema radicular da soja corresponde, em média, a 18 % da máxima produção acumulada da parte aérea (Webb et al., 1954; Moraes, 1983; Vieira, 1985; Melges et al., 1989). Por meio, dessa relação, bem como, a consideração da mMS_Gr foram obtidas a produção de massa de matéria seca da planta (mMS_Pl), conforme pode ser observado na Eq. 4.

$$mMS_Pl = (mMS_PA + mMS_Gr) 1,18 \quad \text{Eq. 4}$$

Em que: mMS_Pl : massa de matéria seca da planta ($kg\ ha^{-1}$); mMS_PA : massa de matéria seca da parte aérea ($kg\ ha^{-1}$); mMS_Gr : massa de matéria seca dos grãos ($kg\ ha^{-1}$)

Em seguida, os teores de P da folha índice (tP_Ttp) foram multiplicados pela massa de matéria seca deste componente, o que resultou no conteúdo de P no terceiro trifólio com pecíolo (cP_Ttp) no estágio R2 (Eq. 5).

$$cP_Ttp = mMS_Ttp * tP_Ttp \quad \text{Eq. 5}$$

Em que: cP_Ttp : conteúdo de P no terceiro trifólio com pecíolo ($kg\ ha^{-1}$); mMS_Ttp : massa de matéria seca do terceiro trifólio com pecíolo ($t\ ha^{-1}$); tP_Ttp : teor de P no terceiro trifólio com pecíolo ($g\ kg^{-1}$)

Com base no cP_Ttp , foram estimados os conteúdos de P ($kg\ ha^{-1}$) no caule (cP_C ; Eq. 6) pecíolo (cP_P ; Eq. 7) e trifólios (cP_T ; Eq. 8), nos estádios de desenvolvimento de máximo acúmulo na parte aérea (estádio R6 para P segundo Kurihara et al., 2013).

$$cP_C = 5,50\ cP_Ttp^{1,27} \quad R^2 = 0,86 \quad \forall\ 0,23 \leq cP_Ttp \leq 1,5\ kg\ ha^{-1} \quad \text{Eq. 6}$$

$$cP_P = 2,03\ cP_Ttp^{1,26} \quad R^2 = 0,84 \quad \forall\ 0,23 \leq cP_Ttp \leq 1,5\ kg\ ha^{-1} \quad \text{Eq. 7}$$

$$cP_T = 5,25\ cP_Ttp^{0,908} \quad R^2 = 0,84 \quad \forall\ 0,23 \leq cP_Ttp \leq 1,5\ kg\ ha^{-1} \quad \text{Eq. 8}$$

Em que: cP_C : Conteúdo de P no caule ($kg\ ha^{-1}$); cP_P : Conteúdo de P no pecíolo ($kg\ ha^{-1}$); cP_Ttp : Conteúdo de P no terceiro trifólio com pecíolo ($kg\ ha^{-1}$)

Além disso, por meio dos mesmos modelos foram estimados os conteúdos de P das vagens (cP_V ; Eq. 9) e dos grãos (cP_Gr ; Eq. 10) nos estádios R6 e R8, respectivamente, segundo Kurihara et al. 2013.

$$cP_V = 4,28\ cP_Ttp^{0,936} \quad R^2 = 0,78 \quad \forall\ 0,23 \leq cP_Ttp \leq 1,5\ kg\ ha^{-1} \quad \text{Eq. 9}$$

$$cP_Gr = 23,3\ cP_Ttp^{0,324} \quad R^2 = 0,59 \quad \forall\ 0,23 \leq cP_Ttp \leq 1,5\ kg\ ha^{-1} \quad \text{Eq. 10}$$

Em que: cP_V : Conteúdo de P na vagem (kg ha^{-1}); cP_{Gr} : Conteúdo de P no grão (kg ha^{-1}); cP_{Ttp} : Conteúdo de P no terceiro trifólio com pecíolo (kg ha^{-1})

Dessa forma, por meio do conteúdo desses componentes vegetativos foram obtidos a dP_{PA} (kg ha^{-1}). Conforme, observado na Eq. 11.

$$dP_{PA} = cP_C + cP_P + cP_V + cP_{Gr} \quad \text{Eq. 11}$$

Em que: d : Demanda (kg ha^{-1}); c : conteúdo (kg ha^{-1}); C: Caule; Gr: grão; P: Pecíolo; PA: Parte aérea; V: Vagem.

Da mesma forma, que os modelos de Kurihara et al. (2013) não consideraram as produções de massa de matéria seca das raízes os mesmo também não consideram o acúmulo de nutrientes nesse componente vegetativo. Portanto, para correção do conteúdo de P presente nas raízes foi considerado que os mesmos representam 8 % do acumulado na planta toda (Malavolta et al., 1980; Moraes, 1983; Faquin, 1988). Por meio, dessa correção foram obtidas as demandas de P (Eq. 12) na planta (dP_{Pl}).

$$dP_{Pl} = dP_{PA}/0,92 \quad \text{Eq. 12}$$

Em que: dP_{Pl} : Demanda de P na planta (kg ha^{-1}); dP_{PA} : Demanda de P na parte aérea (kg ha^{-1})

Além das demandas de nutrientes e da produção de massa de matéria seca das plantas, também foram estimados os coeficientes de utilização biológico do P na planta e no grão ($cubP_{Pl,Gr}$, em kg kg^{-1}), para cada safra de lavoura comercial de soja proveniente desse banco de dados (Eq. 13 e 14).

$$cubP_{Pl} = mMS_{Pl}/dP_{Pl} \quad \text{Eq. 13}$$

$$cubP_{Gr} = mMS_{Gr}/cP_{Gr} \quad \text{Eq. 14}$$

Em que: $cubP_{Pl}$: Coeficiente de utilização biológico de P na planta (kg kg^{-1}); mMS_{Pl} : Massa de matéria seca da planta (kg ha^{-1}); dP_{Pl} : Demanda de P da planta (kg ha^{-1}); cP_{Gr} : Conteúdo de P no grão (kg ha^{-1})

2.3. Estatísticas descritivas e teste de t dos coeficientes de utilização biológicos de P na planta e no grão

Os valores dos $cubP_{Pl,Gr}$ de cada safra dos talhões foram estratificados para solos de textura arenosa, não-argilosa (agrupamento das safras dos talhões arenosos com os de textura média) e argilosa. Foram obtidas as estatísticas descritivas: média, desvio padrão e coeficiente de variação dos valores de $cubP_{Pl,Gr}$ referentes a cada classe textural e de todas as safras dos talhões. As médias dos $cubP_{Pl,Gr}$ dos talhões de cada

classe textural do solo e de todas as lavouras, foram comparados pelos teste t de Student.

Dentro dos solos de textura argilosa os valores dos *cubP*_Pl,Gr de cada safra das lavoura também foram estratificados em cultivares de soja com diferentes ciclos de maturação: semiprecoce e precoce (*cubP*_Plsp,Grsp); médio (*cubP*_Plm,Grm); semitardio e tardio (*cubP*_Plst,Grst) das cultivares de soja. Foram obtidas as estatísticas descritivas (média, desvio padrão e coeficiente de variação) dos valores desses *cubP*_Pl,Gr. As médias dos *cubP*_Pl,Gr dos talhões de cada ciclo de maturação cultivados em solos argilosos também foram comparadas pelos teste t de Student.

Deve-se ressaltar que devido ao número reduzido de informações referentes aos solos de textura média, os dados provenientes dessa classe textural foram agrupados com aqueles referentes às lavouras dos solos arenosos, o que resultou na classe textural denominada não-argilosa. Esse agrupamento se fez necessário para que não houvesse perda de informações.

2.4. Modelos matemáticos utilizados para estimativa dos coeficientes de utilização biológicos superiores e médios de P na planta e no grão

Foram ajustados gráficos de dispersão dos valores dos *cubP*_Pl,Gr (y) em função da produtividade (x), para todas as safras das lavouras de soja e para classe argilosa subdividida em diferentes ciclos de maturação. As linhas de fronteira superior e média (*cubP*_Pl,Gr maior e médio, respectivamente) foram obtidas por meio da seleção dessas lavouras com o auxílio do aplicativo Boundary Fit.

Em seguida, com o auxílio do aplicativo “Curve Expert 1.4” (Hyams, 2010) foram ajustados os modelos relacionando os valores dos *cubP*_Pl,Gr com a produtividade, considerando as populações (limite) de eficiência no uso de P superior e médio. Dentre os modelos obtidos pelo aplicativo, selecionou-se para cada população aquele com menor erro padrão e maior coeficiente de determinação.

2.5. Demanda inferior e média de P na planta e no grão

Conforme observado nas equações 10 e 12 (item 2.2.) utilizadas para estimar a demanda de P na planta e no grão (dP _Pl,Gr; em kg ha^{-1}) para todas as lavouras de soja. Também foi observado no item 2.4 que os talhões com maiores valores de *cubP*_Pl,Gr (linha de fronteira superior) foram identificados, por meio do aplicativo Boundary Fit. Dessa forma, considerou-se que os talhões de soja com demanda inferior e média na

planta e no grão ($d_{infP_Pl,Gr}$ e $d_{medP_Pl,Gr}$, respectivamente; em $kg\ ha^{-1}$) corresponderem, respectivamente, aos talhões de $cubP_Pl,Gr$ superior e médio. Com isso, foram obtidas as $d_{infP_Pl,Gr}$ e $d_{medP_Pl,Gr}$ de todos os talhões ($d_{infP_Plt,Gr}$ e $d_{medP_Plt,Gr}$; em $kg\ ha^{-1}$); com também das lavouras de solos argilosos que foram estratificadas em variedades de ciclo semiprecoce e precoce ($d_{infP_Plsp,Grsp}$ e $d_{medP_Plsp,Grsp}$; em $kg\ ha^{-1}$); médio ($d_{infP_Plm,Grm}$ e $d_{medP_Plm,Grm}$; em $kg\ ha^{-1}$) e semitardio e tardio ($d_{infP_Plst,Grst}$ e $d_{medP_Plst,Grst}$; em $kg\ ha^{-1}$).

Em seguida, foram calculados, para cada lavoura de soja proveniente das populações de $d_{infP_Pl,Gr}$ e $d_{medP_Pl,Gr}$, as dP_Pl,Gr obtidas para cada tonelada de soja produzida (em $kg\ t^{-1}$) (Eq. 15).

$$dP_Pl,Gr_{p/t} = dP_Pl,Gr / pGr \text{ em t} \quad \text{Eq. 15}$$

Em que: $dP_Pl,Gr_{p/t}$: Demanda de P na planta e no grão para cada tonelada de grão de soja produzida ($kg\ t^{-1}$); dP_Pl,Gr : Demanda de P na planta e no grão ($kg\ ha^{-1}$); pGr em t: Produtividade de grão de soja em tonelada ($t\ ha^{-1}$)

Após esse cálculo, foram obtidos a frequência das lavouras de soja amostradas, as médias e os desvios padrões das $d_{infP_Plt,Gr}$ e $d_{medP_Plt,Gr}$; $d_{infP_Plsp,Grsp}$ e $d_{medP_Plsp,Grsp}$; $d_{infP_Plm,Grm}$ e $d_{medP_Plm,Grm}$; $d_{infP_Plst,Grst}$ e $d_{medP_Plst,Grst}$, em $kg\ t^{-1}$ de soja produzida.

Conforme observado no item 2.4, foram obtidos modelos que estimaram os $cubP_Pl,Gr$ superior e médio em função da produtividade, de todos os talhões, como também das lavouras com solos argilosos que foram subdivididas em grupos de variedades de soja com diferentes ciclos de maturação. Portanto, por meio dos modelos dos $cubP_Pl,Gr$ ($kg\ kg^{-1}$) superior e médio, e da mMS_Pl ($kg\ ha^{-1}$) ambas estimadas em função das produtividades de soja, foram obtidas as $d_{infP_Pl,Gr}$ (Eq. 16) e $d_{medP_Pl,Gr}$ (Eq. 17) de todos os talhões (em $kg\ ha^{-1}$), como também das lavouras com solos argilosos que foram estratificadas em grupos de variedades de soja com diferentes ciclos de maturação (em $kg\ ha^{-1}$).

$$d_{infP_Pl,Gr} = mMS_Pl,Gr / \text{maior } cubP_Pl,Gr \quad \text{Eq. 16}$$

$$d_{medP_Pl,Gr} = mMS_Pl,Gr / \text{médio } cubP_Pl,Gr \quad \text{Eq. 17}$$

Em que: $d_{infP_Pl,Gr}$: Demanda inferior de P na planta e no grão ($kg\ ha^{-1}$); mMS_Pl,Gr : Massa de matéria seca da planta e do grão ($kg\ ha^{-1}$); $cubP_Pl,Gr$: Coeficiente de utilização biológico de P na planta e no grão ($kg\ kg^{-1}$); $d_{medP_Pl,Gr}$: Demanda média de P na planta e no grão ($kg\ ha^{-1}$)

Posteriormente, relacionou-se, em um gráfico de dispersão, a produtividade de soja com as $d_{inf}P_{PI,Gr}$ e $d_{med}P_{PI,Gr}$, referentes às safras de todos os talhões. Também relacionou-se, em um gráfico de dispersão, a produtividade de soja com as $d_{inf}P_{PI,Gr}$ e $d_{med}P_{PI,Gr}$ das lavouras de solos argilosos que foram subdivididas em diferentes ciclos de maturação.

2.6. Caracterização dos talhões com maior produtividade e coeficiente de utilização biológico de P na planta

No banco de dados, foram selecionadas, dentre as safras de todos os talhões, aquelas em que se obtiveram $cubP_{PI}$ superior, e produtividades iguais ou maiores que 3600 kg ha^{-1} de soja. Em seguida, por meio de análise descritiva foram avaliados, nessa população com elevada produtividade e $cubP_{PI}$ superior, as frequências absolutas dos talhões, os menores e maiores valores e as médias dos seguintes atributos de produção: pluviosidade acumulada durante o ciclo da cultura da soja; teores de N, P e S (g kg^{-1}) no Ttp; frequência absoluta das safras dos talhões com solos de textura arenosa, média e argilosa; teores de P, K (mg dm^{-3}) e saturação por bases (V em %) nos solos; a relação $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\text{K}^{+}$ disponíveis no solo e P (kg ha^{-1} ; P_2O_5) aplicado no solo. Devido à maior amplitude dos teores de P, K, da V e das quantidades de P aplicadas no solo, foram obtidas as estatísticas descritivas desses atributos quando os valores desses atributos apresentavam-se entre os percentis 10 a 90. Nessa mesma população, também foram obtidas as frequências relativas: das cultivares, de cada ano das safras e do ciclo de maturação dessas cultivares de soja.

2.7. Índice de colheita de P

Foram obtidos os índices de colheita de P (pela razão entre as demandas do nutriente nos grãos e na planta) para todas as safras das lavouras de soja. Os índices de colheita de P (y) referentes às populações de $cubP_{PI}$ superior e médio foram subdivididas e relacionadas às produtividades de soja (x) em um gráfico de dispersão.

Em seguida, com o auxílio do aplicativo “Curve Expert 1.4” (Hyams, 2010) foram ajustados os modelos relacionando os valores dos índices de colheita de P e a produtividade, considerando as populações de $cubP_{PI}$ superior e médio. Dentre os modelos obtidos pelo aplicativo, selecionou-se para cada população aquele com menor erro padrão e maior coeficiente de determinação.

3. Resultados e discussão

3.1. Estatísticas descritivas e teste de t dos coeficientes de utilização biológicos de P na planta e no grão

As médias do *cubP*_Pl,Gr dos solos mais argilosos apresentaram tendência de serem maiores do que as apresentadas nos solos com menor teor de argila (Tabela 2). Entretanto, essas médias, obtidas entre os solos de diferentes classes texturais, não diferiram estatisticamente (Tabela 3).

Tabela 2. Estatística descritiva do *cubP*_Pl,Gr obtidos de acordo com a classe textural e por meio da subdivisão da classe argilosa em diferentes ciclo de maturação das cultivares de soja

Textura e Ciclo	^{1/} <i>cubP</i> _Pl				^{2/} <i>cubP</i> _Gr			
	n	\bar{y}	S	CV	n	\bar{y}	s	CV
		----kg kg ⁻¹ ----		%		----kg kg ⁻¹ ----		%
Arenosa	107	292,03	31,91	10,93	107	142,80	8,61	6,03
Não Argilosa	134	292,85	34,70	11,85	134	142,95	9,40	6,57
Argilosa	540	296,75	37,68	12,70	540	144,10	10,10	7,01
Semi. e Precoce	38	273,18	27,62	10,11	38	136,87	7,98	5,83
Médio	201	289,47	30,35	10,48	201	142,29	8,06	5,66
Semi. e Tardio	300	304,54	40,99	13,46	300	146,21	10,91	7,46
Todos os talhões	674	295,98	37,12	12,54	674	143,87	9,97	6,93

^{1/} Coeficiente de utilização biológico de P da planta; ^{2/} Coeficiente de utilização biológico de P do grão.

A não detecção de diferenças estatísticas entre as médias do *cubP*_Pl,Gr, nas lavouras de soja cultivadas em solos de diferentes classes texturais, pode ter sido causado pelos maiores teores de P observado nos solos mais argilosos. Logo, a maior disponibilidade de P nos solos mais argilosos provavelmente compensou o efeito de maior fixação de P nesses solos, o que contribuiu para menor diferença no suprimento desse nutriente para as plantas. Além disso, em condições de campo a localização do P aplicado difere da aplicação de P utilizada em experimentos de casa de vegetação, isso pode ter contribuído para tais resultados. Esses resultados divergem daqueles apresentados por Muniz et al. (1985) e Bedin et al. (2003) que observaram em experimento de casa de vegetação que a cultura da soja foi mais eficiente no uso de P nos solos com maior capacidade tampão de P.

Tabela 3. Comparação das médias de *cubP*_Pl,Gr, obtidas a partir da classe textural do solo e por meio da subdivisão da classe argilosa em diferentes ciclos de maturação, pelo teste “t” de Student

Textura e Ciclo	Teste t	
	<i>cubP</i> _Pl	<i>cubP</i> _Gr
Arenosa vs Não-Argilosa	ns	ns
Arenosa vs Argilosa	ns	ns
Arenosa vs Todos	ns	ns
Não-Argilosa vs Argilosa	ns	ns
Não-Argilosa vs Todos	ns	ns
Argilosa vs Todos	Ns	Ns
Ciclo de maturação em solo argiloso		
Semiprecoce e Precoce vs Médio	**	***
Semiprecoce e Precoce vs Semitardio e Tardio	***	***
Médio vs Semitardio e Tardio	***	***

ns não significativo; ** significativo a 1%;*** significativo a 0,1%.

O aumento das médias dos *cubP*_Pl,Gr foi significativo com o prolongamento do ciclo de maturação das cultivares de soja provenientes dos solos argilosos (Tabela 3). Resultados similares foram obtidos por Souza et al. (2012), Bruetsch & Estes (1976) e Furlani et al. (2002) na utilização eficiente do N na citricultura, como também no uso eficiente de P nas culturas do milho e da soja, respectivamente. Na citricultura os autores Pozzan & Tribone (2005) observaram que posteriormente à abertura das flores e à queda das pétalas a velocidade das transformações bioquímicas dos frutos é maior em algumas cultivares precoces. Desse modo, os menores ciclos, aliados ao alto potencial produtivo de algumas variedades precoces, acabaram por favorecer uma exigência nutricional pontual maior, em um espaço de tempo menor, em relação a algumas variedades de ciclo tardio. Além disso, os autores Bruetsch & Estes (1976) e Baker et al. (1970) comentam que, algumas variedades de milho com maior ciclo de desenvolvimento acabam por absorver o P de maneira mais eficiente, devido à maior profundidade de penetração de seus sistemas radiculares no solo. Entretanto, em cultivares de milho, com diferentes ciclos de maturação, e cultivadas em solos com baixos teores de P, Bayuelo-Jiménez & Ochoa-Cadavid (2014) constataram, nas cultivares de ciclo tardio os menores valores de eficiência de utilização de P, apesar dessas apresentarem as maiores produtividades. De maneira geral, os resultados obtidos nesse trabalho ocorreram, pois o prolongamento no ciclo de maturação permitiu que a planta tivesse mais tempo para produzir matéria seca e ciclar bioquimicamente o P acumulado. Essas características podem conferir a essas cultivares de soja, com maior ciclo de maturação, maior eficiência no uso desse nutriente.

3.2. Modelos matemáticos utilizados para estimar os coeficientes de utilização biológicos de P na planta e no grão

Na figura 1 podem ser observadas as relações entre os valores dos $cubP_{PI,Gr}$ superiores e médios em função da produtividade de todas as lavouras de soja contidas no banco de dados. Essas relações foram obtidas com todas as lavouras de soja pois, as médias dos $cubP_{PI,Gr}$, provenientes de cada classe textural, não diferiram estatisticamente pelo teste de t, conforme demonstrado no ítem 3.1.

Nas figuras 2, 3 e 4 podem ser observadas as relações entre os valores dos $cubP_{PI,Gr}$ superior e médio em função da produtividade obtidas com as variedades de soja de ciclo semiprecoce e precoce; ciclo médio e semitardio e tardio, respectivamente.

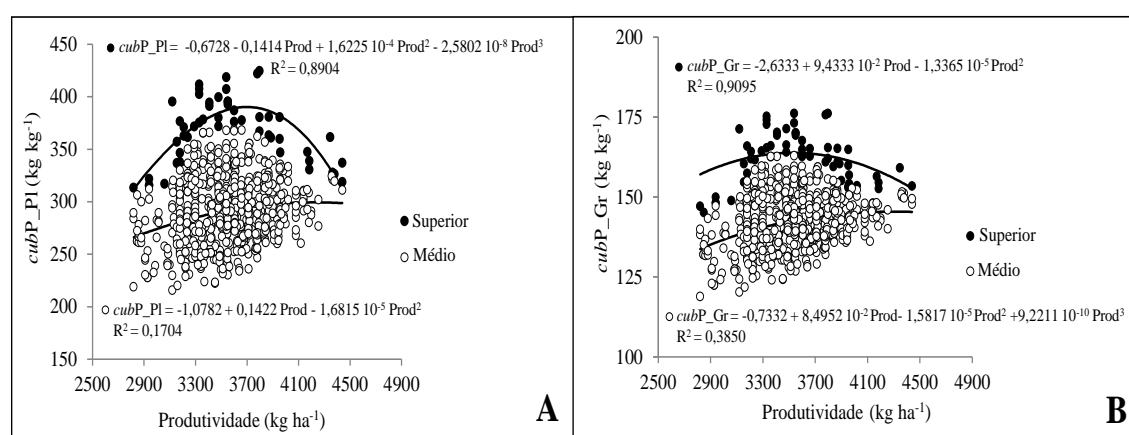


Figura 1. Relação entre o valor do $cubP_{PI}$ superior (A) e $cubP_{Gr}$ médio (B) em função da produtividade de todas as lavouras de soja contidas no banco de dados.

Com as equações utilizadas para estimar os valores dos $cubP_{PI,Gr}$ superior foram obtidos os maiores coeficientes de determinação (Figuras 1, 2, 3 e 4).

Também podem ser observadas nas figuras 1, 2, 3 e 4 que com o aumento da produtividade os valores dos $cubP_{PI,Gr}$ aumentaram (Gemenet et al., 2015; Li et al., 2014), até atingirem um valor máximo e depois diminuíram com o aumento do rendimento de grão. Esse comportamento fica mais nítido nas relações entre produtividade com os maiores valores dos $cubP_{PI,Gr}$. Esses resultados diferem dos obtidos por Santos et al. (2008), neste trabalho o aumento da produtividade de grãos resultou em uma redução imediata dos $cubP$ nas partes vegetativas da planta mais vagens, indicando que plantas mais produtivas são menos eficientes no uso desses nutrientes. Além disso, não foi observado relação entre os valores dos $cubP_{Gr}$ com a produtividade (Santos et al., 2008). A diferença entre os resultados pode ser atribuída ao número de amostras e à forma com que os dados foram obtidos. A maior parte dos dados de Santos et al. (2008) foram obtidos em condições de casa de vegetação e com menor número de informações, pois foram retirados da literatura, enquanto nesse

trabalho os mesmos foram gerados em condições de campo e com maior número de dados. Ainda, nas figuras 1, 2, 3 e 4 observou-se que com o maior aumento da produtividade os valores dos *cubP_Pl,Gr* decresceram. Esses decréscimos demonstraram que as produções de matéria seca, na planta e no grão, não acompanharam os crescentes acúmulos desses nutrientes, o que evidencia uma certa tendência de “consumo de luxo” de P tanto na planta como no grão quando são obtidas as maiores produtividades (Schulte & Kelling, 2013).

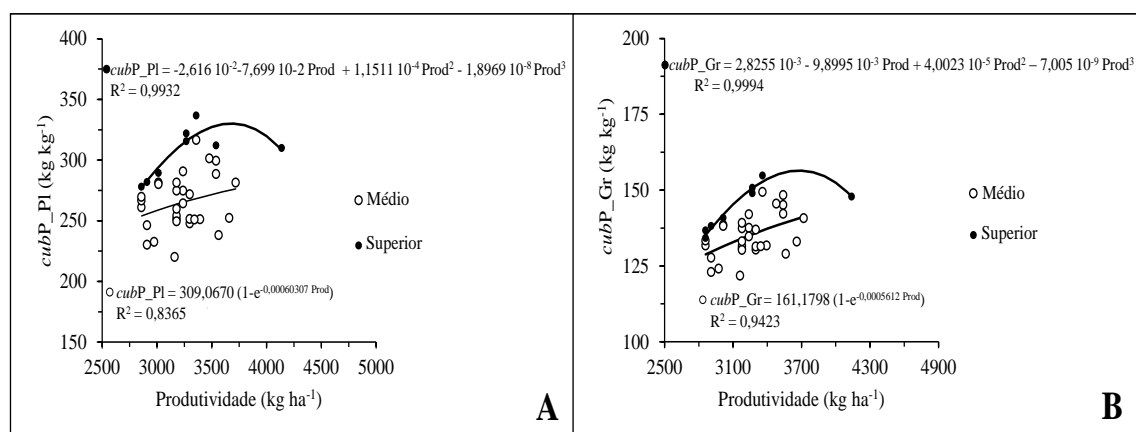


Figura 2. Relação entre o valor do *cubP_Pl* superior (A) e *cubP_Gr* médio (B) em função da produtividade, obtidas em solos argilosos que foram subdivididos em safras de lavouras de soja cultivadas com variedade de ciclo semiprecoce e precoce.

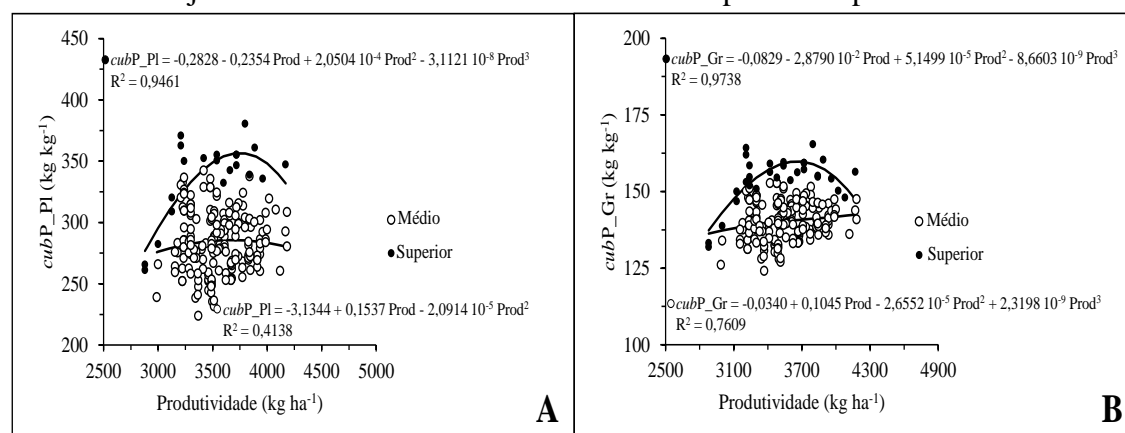


Figura 3. Relação entre o valor do *cubP_Pl* superior (A) e *cubP_Gr* médio (B) em função da produtividade, obtidas em solos argilosos que foram subdivididos em safras de lavouras de soja cultivadas com variedade de ciclo médio.

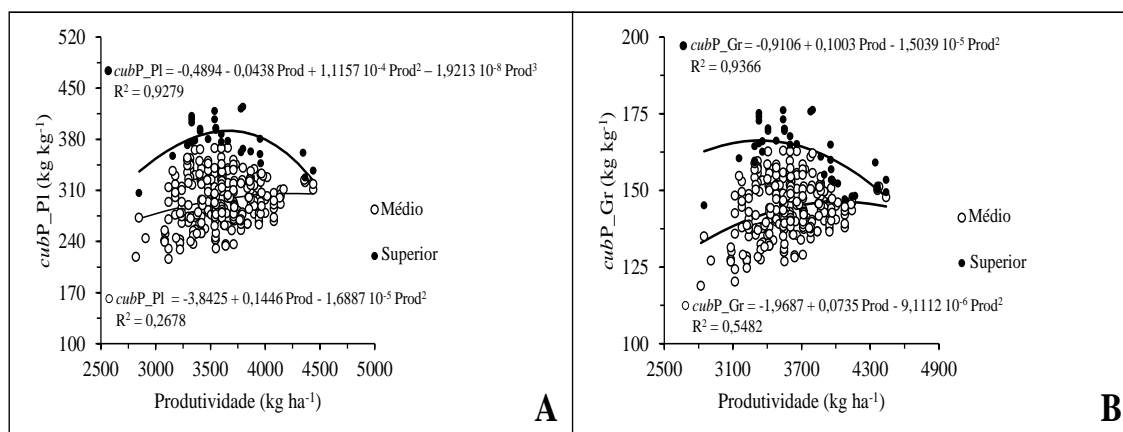


Figura 4. Relação entre o valor do *cubP_Pl* superior (A) e *cubP_Gr* médio (B) em função da produtividade, obtidas em solos argilosos que foram subdivididos em safras de lavouras de soja cultivadas com variedade de ciclo semitardio e tardio.

3.3. Demanda inferior e média de P na planta e no grão de acordo com a produção

As $d_{medP_Pl,Gr}$ (em $kg\ t^{-1}$) obidas nesse trabalho (Tabela 4) são semelhantes aos acúmulos médios de conteúdo de P na planta ($10,5\ kg\ t^{-1}$) e no grão ($5,9\ kg\ t^{-1}$) obtidas por Kurihara (2004).

Observou-se, para todas as lavouras amostradas, que a diferença das medias entre as demandas medias e inferiores de P na planta e no grão corresponderam, respectivamente, a $2,19$ e $0,75\ kg\ t^{-1}$ de grão produzido. Portanto, em muitos talhões pode ter ocorrido consumo de luxo de P. Dessa forma, a utilização dos modelos que estimam os valores de *cubP_Pl;Gr* superior seriam muito úteis para obtenção das $d_{infP_Pl;Gr}$ e com isso colaborariam para recomendações mais sustentáveis desses nutrientes.

Tabela 4. Estatísticas descritivas das demandas inferiores e médias de P na planta e grão para produção de uma tonelada de grão de soja, obtidas com todas as lavouras de soja e a partir da estratificação dos solos argilosos em diferentes ciclos de maturação das cultivares de soja

	d_{infP_Pl}			d_{medP_Pl}			d_{infP_Gr}			d_{medP_Gr}		
	n	\bar{Y}	s	n	\bar{y}	S	n	\bar{y}	s	N	\bar{y}	s
	---kg t^{-1} ---			---kg t^{-1} ---			----kg t^{-1} ----			----kg t^{-1} ----		
T.L. ^{1/}	52	8,69	1,26	621	10,88	1,20	60	5,39	0,27	613	6,14	0,36
Precoce ^{2/}	8	9,76	0,83	30	11,11	0,95	8	6,06	0,32	30	6,46	0,34
Médio ^{3/}	21	9,24	0,76	180	11,10	1,12	31	5,67	0,31	170	6,22	0,27
Tardio ^{4/}	30	8,49	1,16	270	10,79	1,25	42	5,40	0,31	258	6,08	0,38

^{1/}Todas as lavouras de soja amostradas; ^{2/}Cultivares de soja de ciclo semiprecoce e precoce; ^{3/}Cultivares de soja de ciclo médio; ^{4/}Cultivares de soja de ciclo semitardio e tardio.

Na figura 5 e pode ser observada as relações entre a produtividade e as estimativas da $d_{infP_Pl,Gr}$ (A e C) e $d_{medP_Pl,Gr}$ (B e D). Essas demandas foram obtidas

por meio dos modelos de $cubP_Pl,Gr$ superior e médio de todos os talhões, como também das lavouras de solos argilosos que foram subdivididos em cultivares de ciclo semiprecoce e precoce; médio e semitardio e tardio o que permitiu a obtenção dos $d_{inf}P_Plt,Gr$, $d_{med}P_Plt,Gr$; $d_{inf}P_Plsp,Grsp$; $d_{med}P_Plsp,Grsp$; $d_{inf}P_Plm,Grm$ e $d_{med}P_Plm,Grm$; $d_{inf}P_Plst,Grst$ e $d_{med}P_Plst,Grst$, respectivamente.

Foi observado na figura 5 uma tendência quanto a quantidade das $d_{inf}P_Pl,Gr$ e $d_{med}P_Pl,Gr$ as quais seguiram a seguinte ordem: ciclo semiprecoce e precoce > ciclo médio > todas as amostras \geq ciclo semitardio e tardio. Esses resultados demonstraram que o acúmulo de nutrientes na soja é influenciado pelo ciclo de maturação, em outras palavras foi demonstrado que as $d_{inf}P_Pl,Gr$ e $d_{med}P_Pl,Gr$ tendem a diminuir com a maior duração do ciclo de maturação das cultivares.

No trabalho de Partelli et al. (2014) foi avaliado os acúmulos relativos de P e K nos frutos de quatro genótipos (clones) de café Conilon, após a antese até a maturação dos frutos de café. Os genótipos de menor e maior ciclo de maturação apresentaram os maiores e menores acúmulos relativos desses nutrientes, respectivamente. Nos estudos de Laviola et al. (2007) foi observado que os frutos de *Coffea arabica* (L.) que maturaram em menor tempo, da antese à maturação, também apresentaram os maiores acúmulos relativos de Ca, Mg e S.

Apesar dos trabalhos de Partelli et al. (2014) e Laviola et al. (2007) não focarem na demanda total de nutrientes na planta e no grão do café, como foi o foco deste estudo para a soja, os resultados desses autores são corroborados com os resultados obtidos neste trabalho. Esses resultados podem ocorrer, pois as cultivares de ciclo semitardio e tardio possuem maior tempo para produzir matéria seca, bem como, ciclar bioquimicamente os nutrientes acumulados. Essas características podem conferir às essas cultivares de soja, maior eficiência (conforme observado no item 3.2.) e menor demanda no uso desses nutrientes.

A relação entre a produtividade e as $d_{inf}P_Pl,Gr$ (A e C) e $d_{med}P_Pl,Gr$ (B e D) mostrou resposta curvilínea (Figura 5) o que está de acordo com a lei dos incrementos marginais decrescentes (Mitscherlich, 1909). Além disso, a curvilinearidade observada, permite a análise econômica das recomendações de fertilizantes (Heady & Pesek, 1954).

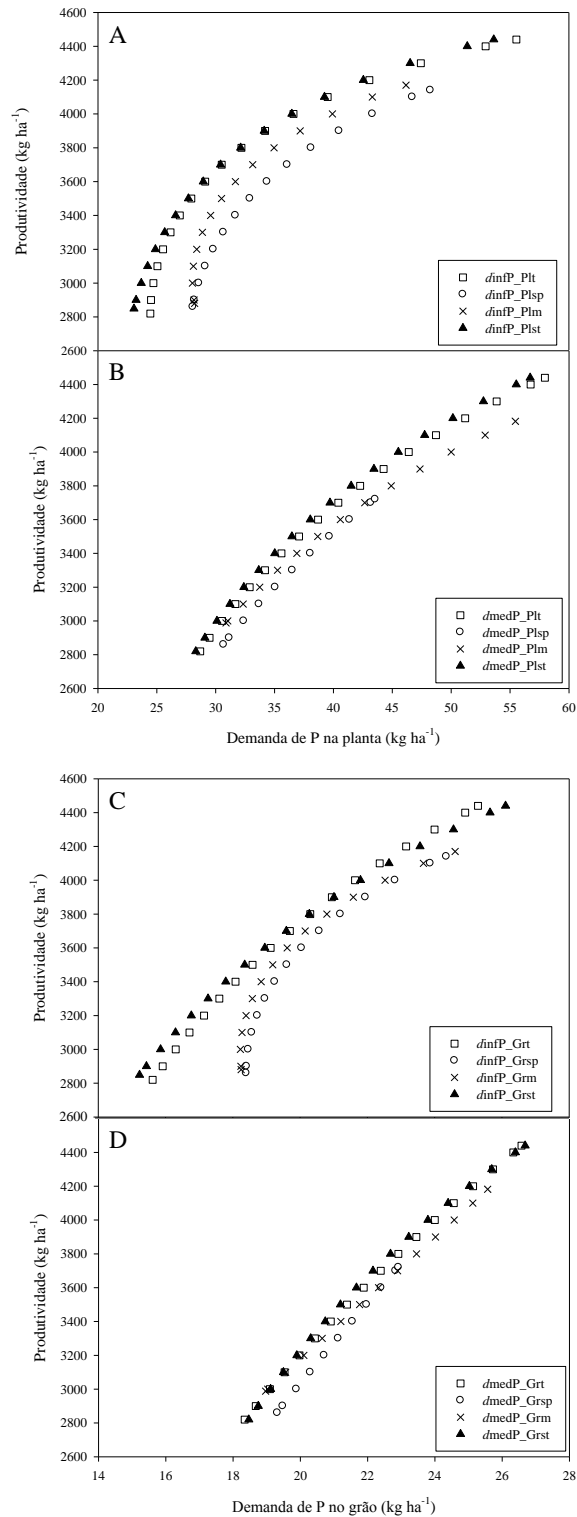


Figura 5. Relação entre a produtividade e a estimativa de demanda inferior de P na planta (A) e no grão (C) e de demanda média de P na planta (B) e no grão (D) referentes a todas as safras dos talhões (*dinfP_Plt,Grt* e *dmedP_Plt,Grt*), bem como, para as demandas obtidas nos solos argilosos que foram subdivididos em lavouras de soja cultivadas com cultivares de ciclo semiprecoce e precoce (*dinfP_Plsp,Grsp* e *dmedP_Plsp,Grsp*); médio (*dinfP,K_Plm,Grm* e *dmedP,K_Plm,Grm*); semitardio e tardio (*dinfP,K_Plst,Grst* e *dmedP,K_Plst,Grst*).

3.4. Caracterização dos talhões com maior produtividade e eficiência no uso de P na planta

Observou-se, por meio das faixas e médias de precipitação pluviométrica, que as maiores produtividades e valores de *cubP_Pl* ocorreram sob intensa pluviosidade, característica essa que é intrínseca da região de cultivo (Tabela 5). Entretanto, as médias de precipitação pluviométrica (Tabela 5) concentraram-se abaixo da média acumulada de pluviosidade na região (média de 1 908 mm durante outubro a março, período do cultivo de verão no município de Campo Novo do Parecis). Portanto, o aumento da pluviosidade pode aumentar a absorção de nutrientes nas plantas (Dias et al., 2002), que em condições de alta produtividade e boa fertilidade dos solos, esse aumento pode diminuir o *cubP_Pl* apesar do pequeno incremento nas produções de matéria seca.

Quando comparadas as faixas de suficiência nutricional (método DRIS) da cultura da soja as quais foram propostas por Kurihara et al. (2013) para os Estados do Mato Grosso e Mato Grosso do Sul com as médias dos teores dos nutrientes no terceiro trifólio com pecíolo (Tabela 5) foi observado que os teores médios de N e S encontravam-se, acima (alto) e na faixa de suficiência (suficiente) proposta por Kurihara et al. (2013), respectivamente. Isso demonstra que as lavouras mais produtivas e eficientes no uso do P devem estar supridas de outros nutrientes de modo a atender o equilíbrio nutricional. O teor médio de P no terceiro trifólio com pecíolo (Tabela 5) apresentou-se igual ao limite inferior da faixa de suficiência ($2,3 \text{ g kg}^{-1}$) proposta por Kurihara et al. (2013). Dentre as 21 lavouras de soja de alta produtividade e com *cubP_Pl* superior: 12, 6 e 3 lavouras de soja possuíram baixo, suficiente e altos teores de P no terceiro trifólio com pecíolo, respectivamente, de acordo com as faixas de suficiência nutricional propostas por Kurihara et al. (2013). Isso não significa que os 12 talhões classificados como de baixos teores de P apresentaram deficiência de P, mas sim que esses nutrientes foram diluídos, ou seja, foram supridos de maneira a atender a demanda inferior de P na planta.

Tabela 5. Estatísticas descritivas: dos teores de N, P e S da folha índice, da fertilização fosfatada, da pluviosidade e dos atributos do solo utilizados para caracterizar as lavouras de soja com *cubP_Pl* superior e alta produtividade ($\geq 3600 \text{ kg ha}^{-1}$)

Faixas e médias dos atributos	Pluv. ^{1/} mm	Teor dos nutrientes no Ttp ^{2/}			Atributos do solo						Fert. ^{6/}	
		N	P	S	Classe Textural			P	K	V	Ca+Mg/K	P ₂ O ₅
		-----g kg ⁻¹ -----			Are. ^{3/}	Méd. ^{4/}	Arg. ^{5/}	mg dm ⁻³	%	mmol _c dm ⁻³ / mmol _c dm ⁻³	kg ha ⁻¹	
Menor	1680	31,3	1,6	1,3	-	-	-	3	16	26	8	98
Maior	1922	51,3	3,0	3,0	-	-	-	41	63	56	56	130
\bar{Y}	1757,3	42,2	2,3	2,1	-	-	-	20	36	43	33	111
N	21	21	21	21	2	1	18	16	17	16	21	16

^{1/} Pluviosidade acumulada durante outubro a março, período do cultivo de verão no município de Campo Novo do Parecis; ^{2/} terceiro trifólio com pecíolo; ^{3/} solos arenosos; ^{4/} solos de textura média; ^{5/} solos argilosos; ^{6/} fonte do fertilizante aplicado; - no banco de dados utilizado foram computados apenas a classe textural de cada lavoura de soja enquanto os valores contínuos do teor de argila de cada talhão não foram computados.

Foi observado, dentre os talhões de alta produtividade e *cubP_Pl* superior (Tabelas 5), maior frequência de lavouras de soja cultivadas em solos argilosos. Esse resultado pode ter ocorrido, pois, o banco de dados utilizado nesse trabalho contém maior presença de talhões de soja cultivados em solos argilosos.

Os solos dos talhões de alta produtividade e maior *cubP_Pl* apresentaram uma grande amplitude no teor de P-resina (3 a 41 mg dm⁻³; Tabela 5), com isso a disponibilidade de P nos solos variaram de muito baixo a alta (Sousa et al., 2004).

Os talhões de alta produtividade e maior *cubP_Pl* (Tabela 6), foram compostos em sua maioria por talhões de primeira safra (98-99). Entretanto, deve-se mencionar que muitos desses talhões foram cultivados anteriormente com arroz e soja. Logo, a fertilidade dos solos desses talhões foi construída, por isso o teor médio de P-Resina (20,37 mg dm⁻³; Tabela 5) se encontra acima do nível crítico (14 mg dm⁻³) proposto por Sousa et al. (2004) para região do Cerrado. No trabalho de Martinez et al. (1993) foi observado que a maior eficiência no uso de P (*cubP_Pl*) ocorreu quando, as três variedades de soja avaliadas foram cultivadas sob soluções nutritivas menos concentradas em P. Entretanto, conforme observado por meio da média de P-resina (Tabela 5), para obtenção de altas produtividades e maior *cubP_Pl*, há uma tendência de que os teores de P nos solos estejam próximos ou maiores que o teor do nível crítico de P, o qual foi proposto por Sousa et al. (2004) para região do Cerrado. Apesar disso, deve-se destacar que os solos desses talhões que possuem menor teor médio de P-resina do que aqueles correspondentes aos talhões de alta produtividade e *cubK_Pl* superior apresentados no capítulo 2. Portanto, os talhões de alta produtividade e *cubP_Pl* superior (Tabela 5) foram

supridos de maneira a atender $d_{inf}P_{PI}$, diferentemente dos talhões de alta produtividade e $cubK_{PI}$ superior apresentados no capítulo 2, nos quais pode ter ocorrido consumo de luxo de P. Tais resultados podem ter ocorrido, uma vez que nesses talhões de alta produtividade e $cubK_{PI}$ superior (apresentados no capítulo 2) as safras foram mais recentes, logo a fertilidade desses solos foi mais intensamente construída. Por isso, o solos desses últimos talhões possuem maiores teores de P, matéria orgânica e pH (logo maior saturações por bases e menor acidez trocável) do que nos talhões de alta produtividade e $cubP_{PI}$ superior (Tabela 5). Esses atributos do solo podem colaborar para menor fixação de P junto aos óxidos de Al e Fe do solo (Souza et al., 2006), o que pode favorecer para a maior disponibilidade de P para as plantas, que por sua vez contribuiria para o aumento da produtividade ou da produção de matéria seca. Mas, depois de atingidos no solo os teores de P necessários para o suprimento de altas produtividades, o aumento da disponibilidade desse nutriente poderia favorecer a diminuição do $cubP_{PI}$.

Também foi observado, que a faixa e a média das quantidades de fertilizante fosfatado aplicado, nos talhões de alta produtividade e $cubP_{PI}$ superior (Tabela 5), foram maiores do que as recomendações de Sousa et al. (2004), para correção gradual, em cinco anos, dos solos com baixos teores de P. Esses resultados acabam por levantar duas hipóteses. A primeira seria que os níveis críticos propostos por Sousa et al. (2004) podem não atender a demanda de P para o potencial produtivo das cultivares de soja utilizadas nesse trabalho. Pois, a média do teor de P no solo desses talhões foi encontrada acima do nível crítico sugerido por Sousa et al. (2004) e mesmo com as elevadas aplicações de P (Tabela 6) atenderam somente a demanda inferior de P na planta. A segunda hipótese sugere que a demanda inferior de P para esses solos ainda não foi plenamente atendida havendo ainda, entre alguns desses talhões, certo consumo de luxo de P.

Diferentes cultivares apresentaram altas produtividade e $cubP_{PI}$ superior (Tabelas 6). Entretanto, a maior parte dessas cultivares é de ciclo semitardio e tardio, havendo menor frequência e ausência de espécies de ciclo médio e semiprecoce e precoce, respectivamente. Esses resultados acabam por corroborar com as afirmações mencionadas no item 3.1 onde se observou que com o prolongamento do ciclo de maturação as variedades de soja acabam por utilizar os nutrientes de maneira mais eficiente.

Tabela 6. Frequência das cultivares, ano da safra e o ciclo de maturação das cultivares de soja, obtidas a partir dos talhões de alta produtividade ($\geq 3\ 600\ \text{kg ha}^{-1}$) e com *cubP_Pl* superior

Cultivares	Frequência ^{1/} %	Fr. cv. Total ^{2/}	Ano da Safra	Frequência ^{1/} %	Ciclo de Maturação	Frequência ^{1/} %
A 7002	4,76	11,11	98-99	57,14	Prec. e Semiprec. ^{3/}	0
Arara Azul	4,76	14,29	00-01	28,57	Médio	14,29
E313	14,29	10,00	02-03	14,29	Tardio e Semitardio	85,71
E 315	4,76	50,00				
M 8914	4,76	4,76				
M 9350	14,29	16,67				
Pintado	4,76	0,75				
Tucano	9,52	2,22				
Uirapuru	38,10	3,98				

^{1/} Frequência de lavouras de soja em relação a todas as lavouras de alta produtividade ($\geq 3\ 600\ \text{kg ha}^{-1}$) e com *cubP_Pl* superior; ^{2/} Frequência de cultivar de soja com elevada produtividade e *cubP_Pl* superior em relação ao total de cada cultivar contemplado no banco de dados

3.5. Índice de colheita de P na soja

Deve-se mencionar que mais de 90 % dos talhões com valores superior de *cubP_Pl* foram, respectivamente, os mesmos talhões que contemplaram as populações de maior *cubP_Gr* (dados não apresentados). A semelhança entre essas populações permitiu que as relações entre os *icP* (razão entre os conteúdos de P no grão e da planta toda) e a produtividade (Figura 6) fossem demonstradas utilizando-se os talhões de *cubP* superior e médio da planta ou do grão.

Os *icP* apresentaram tendência de decréscimo com o aumento da produtividade (Figura 6). Dessa forma, foi observado nesse trabalho que os tecidos vegetais (raiz, pecíolo, trifólios e caule) dos talhões mais produtivos tenderam a acumular maiores quantidade de P do que os menos produtivos. Portanto, as entre-safras e safras subsequentes foram beneficiadas com os restos culturais dos talhões mais produtivos, os quais contribuiriam para a maior ciclagem de P em comparação aos talhões menos produtivos. Diferentemente dos resultados apresentados nesse trabalho, Araújo & Teixeira (2012) observaram, em experimento a campo com 64 variedades de feijão, que os *icN,P,K* obtiveram aumento com o ganho de produtividade.

Os talhões com *cubP_Pl* superior apresentaram os maiores *icP* (Figura 6). Gemenet et al. (2015) observaram em milho cultivado a campo no oeste da África, que os talhões de milho mais eficientes no uso do P também foram os que apresentaram os maiores valores de *icP*. Isso ocorre porque as plantas mais eficiente no uso dos nutrientes móveis (como P) possuem as maiores taxas de translocação, desses nutrientes, dos tecidos velhos para os novos (Raju *et al.*, 1987; Wieneke, 1990; Horst *et al.*, 1993). Dessa forma, plantas mais eficientes no uso de P, possuem maior

redistribuição desses nutrientes dos tecidos velhos para o grão, pois esse é o último componente vegetativo a ser formado.

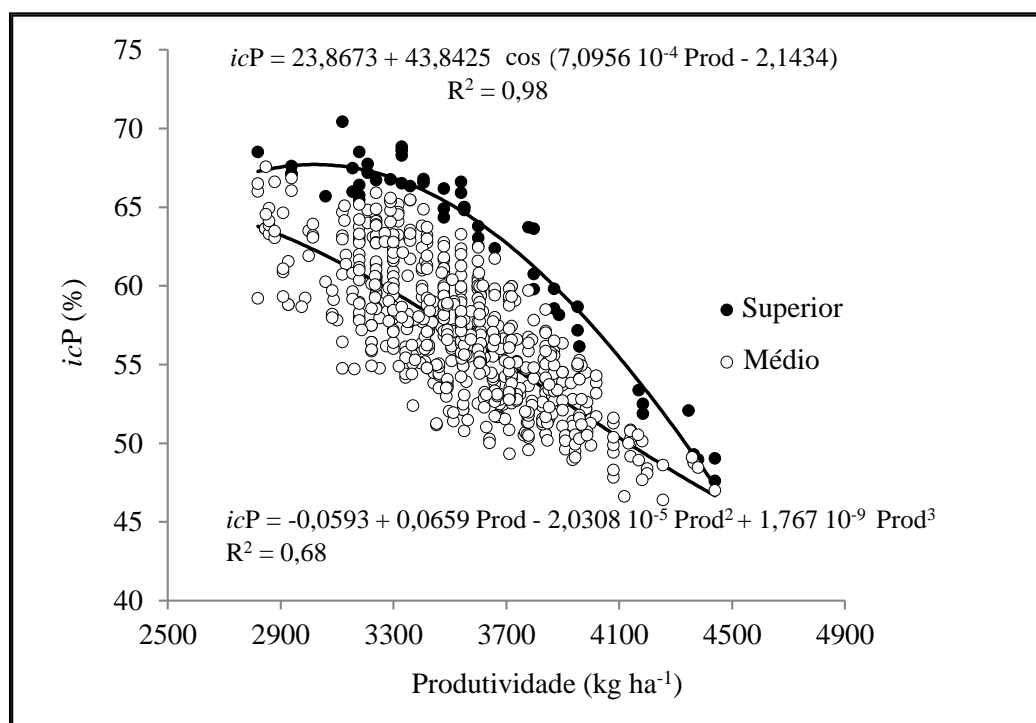


Figura 6. Modelos de regressão ajustados para estimar o índice de colheita de P (*icP*) em função da produtividade de soja, obtidos a partir da subdivisão das lavouras de soja com *cubP_Pl* superior e médio.

Portanto, os restos culturais deixados nos talhões de *cubP_Pl* superior foram nutricionalmente mais pobres do que aqueles provenientes dos talhões de médio *cubP_Pl*. Isso ocorre devido aos maiores acúmulos de P na planta toda, bem como aos menores índices colheitas de P obtidos nesses talhões em comparação com aqueles de *cubP_Pl* superior. Desse modo, a ciclagem desses nutrientes nos talhões com *cubP_Pl* superior é menor do que nos de médio *cubP_Pl*.

4. Conclusões

A demanda inferior de P na planta e no grão correspondeu em média a 8,69 e 5,39 kg t⁻¹ de soja produzida, respectivamente.

A diferença das medias entre as demandas medias e inferior de P na planta e no grão corresponderam, respectivamente, a 2,19 e 0,75 kg t⁻¹ de grão produzido.

Cultivares de soja com maior cilo de maturação possuem maior eficiência de utilização de P.

5. Referências bibliográficas

ARAÚJO, A.P. & TEIXEIRA, M.G. Variabilidade dos índices de colheita de nutrientes em genótipos de feijoeiro e sua relação com a Produção de Grãos. R. Bras. Ci. Solo, 36:137-146, 2012.

BAKER, D.E.; JARREL A.E.; MARSHAL, L.E. & THOMAS, W.I. Phosphorus uptake from soils by corn hybrids selected from high and low phosphorus accumulation. Agron. J; 1970. 62:103-106.

BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F.; CARMO D.N. & NEVES JCL. Classificação nutricional de sítios florestais – Descrição de uma metodologia. Rev. Árvore. 1986; 10:106-112.

BAYUELO-JIMÉNEZ J.S. & OCHOA-CADAVID I. Phosphorus acquisition and internal utilization efficiency among maize landraces from the central Mexican highlands. Field Crops Res. 2014; 156:123-134.

BEDIN I.; FURTINI NETO A.E.; RESENDE A.V.; FAQUIN V.; TOKURA A.M. & SANTOS J.Z.L. Fertilizantes fosfatados e produção da soja em solos com diferentes capacidade tampão de fosfato. R. Bras. Ci. Solo. 2003; 27:639-646.

BRUETSCH TF & ESTES, GO. Genotype variation in nutrient uptake efficiency in corn. Agron. J. 1976; 68:521-523.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB; Séries Históricas. Disponível em<<http://www.conab.gov.br/conteudos.php/premiodevideospaa/docS/conteudos.php?a=1252&t=2#this>> Acessado em 06/03/2014.

DIAS, H.C.T.; FIGUEIRA, M.D.; SILVEIRA, V.; FONTES, M.A.L.; de OLIVEIRA-FILHO, A.T. & SCOLFORO, J.R.S. Variação temporal de nutrientes na serapilheira de um fragmento de floresta estacional semidecidual em Lavras, Minas Gerais - Brasil. Revista Cerne, v.8, n.2, p. 1-16, 2002.

FAQUIN V. Cinética de absorção de fosfato, nutrição mineral, crescimento e produção da soja sob influência de micorriza vesícula-arbuscular (MVA). Piracicaba, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 1988. 136p. (Tese de Doutorado)

FURLANI, A.M.C.; FURLANI, P.R.; TANAKA, R.T.; MASCARENHAS, H.A.A. & DELGADO, M.D.P. Variability of Soybean germplasm in relation to phosphorus uptake and use efficiency. *Scientia Agricola*. 2002; 59:529-536.

GEMENET, D.C.; HASHB, C.T.; SANOGO, M.D.; SY, O.; ZANGREC, R.G.; LEISERA, W.L. & HAUSSMANN, B.I.G. Phosphorus uptake and utilization efficiency in West African pearl millet inbred lines. *Field Crops Res*. 2015; 171:54–66

HEADY, E.O. & PESEK J.A. A fertilizer production surface with specification of economic optima for corn grown on calcareous Ida Silt Loam. *Journal Farm Economics*, 36:446-482, 1954.

HORST, W.J.; ABDOU, M. & WIESLER, F. Genotypic differences in phosphorus efficiency of wheat. In: BARROW, N.J. (Ed.). *Plant nutrition - from genetic engineering to field practice*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. 1993. p. 367-370.

HYAMS, D.G. CurveExpert basic. Release 1.4. 2010. Disponível em <http://docs.curveexpert.net/curveexpert/basic/_static/CurveExpertBasic.pdf>. Acesso em: 13 out. 2014.

KURIHARA, C.H.; ALVAREZ V. V.H.; NEVES J.C.L. & NOVAIS R.F. Acúmulo de matéria seca e nutrientes em soja, como variável do potencial produtivo. *Rev. Ceres*. 2013; 60: 690-698.

KURIHARA, C.H.; ALVAREZ V., V.H.; NEVES, J.C.L.; NOVAIS, R.F & STAUT, L.A. Faixas de suficiência para teores foliares de nutrientes em algodão e em soja, definidas em função de índices DRIS. *Rev. Ceres*. 2013; 60: 412-419.

LAVIOLA, B.G.; MARTINEZ, H.E.P.; SALOMÃO, L.C.C., CRUZ, C.D. & MENDONÇA, S.M. Acúmulos de nutrientes em frutos de cafeeiro em quatro altitudes de cultivo: cálcio, magnésio e enxofre. *R. Bras. Ci. Solo*, 31:1451-1462, 2007

LI M.; ZHANG H.; YANG X.; GE M.; MA Q.; WEI H.; DAI Q.; HUO Z.; XU K. & LUO D. Accumulation and utilization of nitrogen, phosphorus and potassium of irrigated rice cultivars with high productivities and high N use efficiencies. *Field Crops Res*. 2014; 161:55-63.

MALAVOLTA E.; FERNANDES F.M.; CABRINI H.M.; ZANINI J.R.; DE SÁ M.E.; BARRETO M.; DO NASCIMENTO V.M.; KAMINSKI J.; URQUIAGA CABALLERO S.; GRACIOLLI L.A.; PEREZ A.L.; CAVICHIOLLI C.; JACOVO A. & MELETTI M.C. Exigências minerais comparadas de dois cultivares de soja (*Glycine Max* (L.) Merrill) Santa Rosa e UFV-1. Anais da ESALQ, 37: 463-471. 1980.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO - MAPA. Secretaria de Relações Internacionais do Agronegócio. Informe de produtos. 2013. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/internacional/indicadores-e-estatisticas/informes-de-produtos>>. Acessado em 06/03/2014.

MARTINEZ, H.E.P.; NOVAIS, R.F.; SACRAMENTO, L.V.S. & RODRIGUES, L.A. Comportamento de variedades de soja cultivadas sob diferentes níveis de fósforo. II. Translocação do fósforo absorvido e eficiência nutricional. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 17, p. 239-244, 1993b.

MELGES, E; LOPES, N.F. & OLIVA M.A. Crescimento, produção de matéria seca e produtividade da soja submetida a quatro níveis de radiação solar. *Pesq. Agrop. Bras.* 1989; 24: 1073-1080.

MITSCHERLICH, EA. Das Gesetz des Minimus und das Gesetz des abnehmenden Bodenertrages. *Landwirtschaftliche Jahrbucher*, 38:537-552, 1909. Germany

MORAES, E.A. Concentração, acúmulo de P, K, Ca e Mg e crescimento da soja (*Glycine max* (L.) Merrill) em diferentes estágios de desenvolvimento. Lavras, Escola Superior de Agricultura de Lavras. 1983. 139p. (Tese de Mestrado)

MUNIZ, A.S.; NOVAIS, R.F.; BARROS, N.F. & NEVES, J.C.L. Nível crítico de fósforo na parte aérea da soja como variável do fator capacidade de fósforo do solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 9:237-243, 1985.

PARTELLI, F.L.; ESPINDULA, M.C.; MARRÉ, W.B. & VIEIRA, H.D. Dry matter and macronutrient accumulation in fruits of Conilon coffee with different ripening cycles. *R. Bras. Ci. Solo*, 38:214-222, 2014.

POZZAN, M. & TRIBONI, H.R. Colheita e qualidade do fruto. In: MATTOS JÚNIOR, D.; DE NEGRI, J.D.; PIO, R. M.; POMPEU JÚNIOR, J. Citros. Campinas: Instituto Agrônômico e Fundag, 2005. p. 801-822.

RAJU, P.S.; CLARK, R.B.; MAITI, R.K. & MARANVILL, J.W. Phosphorus uptake, distribution and use by glossy and nonglossy sorghum. *Journal of Plant Nutrition*, v. 10, p. 2017-2024, 1987.

SANTOS, F.C.; NEVES J.C.L.; NOVAIS R.F.; ALVAREZ V.V.H. & SEDIYAMA C.S. Modelagem da recomendação de corretivos e fertilizantes para a cultura da soja. *R. Bras. Ci. Solo*. 2008; 32:1661-1674.

SCHULTE, E.E. & KELLING, K.A. Crop Fertilization — Plant Analysis: a Diagnostic Tool National Corn Growers Handbook—46. Purdue University, West Lafayette, IN 47907; 2013. Accessed 4 January 2015. Disponível <https://www.extension.purdue.edu/extmedia/nch/nch-46.html>

SHATAR, T.M. & MCBRATNEY, A.B. Boundary-line analysis of field-scale yield response to soil properties. *Journal of Agricultural Science*, 142, 553–560, 2004.

SOUSA, D.M.G. de; LOBATO, E.; REIN, T.A. Adubação com fósforo. In: SOUSA, D.M.G.; LOBATO, E.(Ed.). *Cerrado: correção do solo e adubação*. Planaltina, DF. Embrapa Cerrados, 2004. 416p.

SOUZA, R.F.; FAQUIN, V.; TORRES, P.F.R. & BALIZA, D.P. Calagem e adubação orgânica: influência na adsorção de fósforo em solos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 30(6), p.975-983, 2006.

SOUZA, T.R.; VILLAS BOAS, R.L.; QUAGGIO, J.A. & SALOMÃO, L.C. Nutrientes na seiva de plantas cítricas fertirrigadas. *Rev. Bras. Frutic.* 2012; 34: 482-492.

VIEIRA, RD. Avaliação do efeito de níveis de alguns nutrientes na composição química e na qualidade de sementes de soja. Viçosa, MG. Universidade Federal de Viçosa. 1985. 156p. (Tese de Doutorado)

WEBB, J.R.; OHLROGGE, J. & BARBER, S.A. The effect of magnesium upon the growth and the phosphorus content of soybean plants. *Soil Sci. Soc. Proc.*, p.458-462. 1954.

WEBB, R.A. Use of the Boundary Line in the analysis of biological data. *Journal of Horticultural Science*, 47, p. 309–319, 1972.

WIENEKE, J. Phosphorus efficiency and phosphorus remobilization in two sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) cultivars. *Plant and Soil*, v. 123, p. 139-145, 1990.

Capítulo 2 - Eficiência nutricional superior e demanda inferior de K para a cultura da soja

Resumo

Os elevados custos com fertilização potássica para a cultura da soja justificam o uso de modelos que permitam estimar com exatidão a demanda inferior de K para cultura da soja em função da produtividade almejada. Pois, isso poderia otimizar as recomendações potássicas para cultura da soja. O presente trabalho teve como objetivos: determinar os valores de eficiência superior e demanda inferior de K para da cultura da soja nas condições de solo e clima tropical do Brasil Central; bem como, caracterizar os fatores de produção das lavouras de soja que se relacionam com a demanda inferior e eficiência superior de K nas condições de elevada produtividade, nas condições de solo e clima tropical do Brasil Central. Para isso, utilizou-se um banco de dados referente a 673 talhões comerciais de soja, localizados no município de Campo Novo do Parecis (MT). No banco de dados estavam contempladas, para cada lavoura de soja, as seguintes informações: produtividade, ciclo de maturação das cultivares, textura do solo, análises químicas do solo e da folha. Foram utilizados modelos matemático proposto por Kurihara et al., 2013, que permitiram estimar, por meio da produtividade de grãos e do conteúdo de potássio no terceiro trifólio com pecíolo (cK_{Ttp}), a massa de matéria seca produzida pela planta (mMS_{Pl}) e os conteúdos de nutrientes extraídos pela planta (cK_{Pl}) e exportados pelo grão (cK_{Gr}). Com isso, foram obtidos os coeficientes de utilização biológico (cub) da planta (mMS_{Pl}/cK_{Pl}) e do grão (mMS_{Gr}/cK_{Gr}) para K. Os $cubK_{Pl,Gr}$ dos talhões foram agrupados em classe textural e aqueles provenientes dos solos argilosos foram subdivididos em diferentes ciclos de maturação das cultivares. Os $cubK_{Pl,Gr}$ foram submetidos a estatísticas descritivas e testes de t. Os valores dos $cubK_{Pl,Gr}$ (y) em função da produtividade (x) foram relacionados em um gráfico de dispersão e foram selecionados os pares yx da linha de fronteira superior, que correspondem à população com eficiência nutricional superior e média. Foram ajustadas equações de regressão relacionando a produtividade com o $cubK_{Pl,Gr}$, para a população de eficiência nutricional superior e média. Por meio da razão entre a $mMS_{Pl,Gr}$ e os $cubK_{Pl,Gr}$ das populações de eficiência superior e média, no uso de K, foram obtidas as demandas inferiores e médias de K na planta e no grão ($d_{inf}K_{Pl,Gr}$ e $d_{med}P,K_{Pl,Gr}$), respectivamente. Com isso a produtividade de soja (y) foi relacionada, em um gráfico de dispersão com esses conteúdos (x). Foram obtidas as estatísticas descritivas (frequência absoluta, média e

valores menores e maiores) dos principais fatores de produção na soja, bem como a frequência relativas das cultivares e de seus ciclos de maturação, as quais foram observados nas safras dos talhões com os maiores valores de *cubK_Pl* e elevadas produtividades. A demanda inferior de K na planta e no grão correspondeu em média a 25,15 e 11,27 kg t⁻¹ de grão produzido, respectivamente. A diferença média entre as demandas médias e inferiores de K na planta e no grão corresponderam, respectivamente, 9,73 e 1,66 kg t⁻¹ de grão produzido. Cultivares de soja com maior ciclo de maturação foram mais eficientes na utilização de K.

Termos de indexação: Coeficiente de utilização de K na planta e no grão; Conteúdo de K na planta e no grão; adubação potássica.

Chapter 2 - Boundary maximum nutritional efficiency and minimum demand of K for soybean

Abstract

The high costs of potassium fertilization for soybean crop justify the use of models to estimate accurately the minimum demand of K for soybean crop due to the yield desired. This could optimize potassic recommendations for soybean. This study aimed to: determine the boundary nutritional efficiency values and lower demand of K in soybean in conditions of soil and tropical climate of Central Brazil; and characterize productions factors of soybean fields that relate to the lower demand and boundary efficiency of K in higher yields conditions of Central Brazil. For this, we used a database provided by 673 soybean commercial plots located in the city of Campo Novo do Parecis (MT). Each plot of this database contains: yield, maturation cycle of cultivars, soil texture, chemical analysis of soil and leaf. Were used mathematical models proposed by Kurihara et al., 2013 which allowed the estimation, by the yield and the content of K in the third trifoliolate with petiole (cK_{Ttp}), the dry matter produced by the plant (mMS_{Pl}) and K content extracted by the plant (cK_{Pl}) and exported by grain (cK_{Gr}). Thus, the biological use coefficients were obtained ($cubK_{Pl}$) plant (mMS_{Pl} / cK_{Pl}) and grain (mMS_{Gr}/cK_{Gr}) for K. The $cubK_{Pl,Gr}$ of the stands were grouped into textural class and those from the clay soils were divided into different cycles of maturation of cultivars. These $cubK_{Pl,Gr}$ were submitted to descriptive statistics and t tests. The values of $cubK_{Pl,Gr}$ (y) as a function of productivity (x) are related in a scatter plot and were selected yx pair of the upper boundary line which corresponds to the upper boundary nutritional efficiency population, and lower nutritional efficiency. Regression equations were adjusted relating productivity with $cubK_{Pl,Gr}$, for the upper boundary and lower nutritional efficiency. By the ration between mMS_{Pl} and $cubK_{Pl}$ of each population with the upper boundary and lower efficiency in the use of K can be obtained the minimum and medium demands of K in the plant and in grain ($d_{min}K_{Pl, Gr}$ and $d_{med}K_{Pl,Gr}$), respectively. The soybean productivity (y) was related in a scatter plot with such content (x). Descriptive statistics were obtained (absolute frequency, mean, minimum and maximum values) of the main production factors in soybeans, and the frequency on the cultivars and their maturation cycles, which were observed in the crops of the fields with the highest values of $cubK_{Pl}$ and high productivities. The minimum demand for K in plant and grain was 25.15 and 11.27 $kg t^{-1}$ of grain yield, respectively. The mean

difference between the medium demand and minimum demand of K in plant and grain corresponded, respectively, to 9.73 and 1.66 kg t⁻¹ of grain yield. Soybean cultivars with higher maturation cycle were more efficient in the use of K.

Tabela de abreviações e seus significados

Variáveis	Significado	Materiais	Significado	Complementos	Significado
<i>c</i>	Conteúdo	Gr	Grão	C	Caule
<i>cub</i>	Coefficiente de utilização biológico	MS	Matéria seca	m	Cultivar de ciclo médio
<i>d_{inf}, dm_{inf}</i>	Demanda inferior	K	Potássio	PA	Parte aérea da planta
<i>d_{med}</i>	Demanda média			Pl	Planta
<i>ic</i>	Índice de colheita			<i>p/t</i>	Para cada tonelada de grão de soja produzida Cultivar de ciclo
<i>m</i>	Massa			sp	semiprecoce e precoce Cultivar de ciclo
<i>p</i>	Produtividade de grão de soja			st	semitardio e tardio
<i>t</i>	Teor de nutriente			t	Todos os talhões
				Ttp	Terceiro trifólio com pecíolo (folha índice)
				V	Vagem

1.Introdução

O potássio atua na regulação do fechamento e abertura estomática, na ativação enzimática e no controle osmótico dos tecidos dentre outras funções na planta (Epstein & Bloom, 2005; Malavolta, 2006). O potássio é o segundo nutriente mais extraído pela cultura da soja (Tanaka & Mascarenhas, 1992), o que demonstra a importância de estudos quanto ao manejo desse nutriente para a cultura.

Por isso, o uso de instrumentos que otimizem as recomendações potássicas para a cultura da soja tornam-se muito úteis. O modelo FERTICALC-Soja[®] (Santos et al., 2008), criado pelo Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa – UFV é um exemplo de ferramenta que pode contribuir para otimização das recomendações potássicas para a cultura da soja. Nesse modelo as doses de fertilizantes são calculadas a partir do balanço entre o requerimento de nutrientes pela planta e o suprimento de nutrientes disponibilizado pelo solo.

No módulo Requerimento do FERTICALC[®] o conteúdo do nutriente é estimado com base na meta de produtividade da cultura e em seu coeficiente de utilização biológico (*cub*). O *cub* é o quociente entre a quantidade de matéria seca produzida pela quantidade de nutriente absorvida (Barros et al., 1986). Pode-se dizer que plantas com maiores valores de *cub* para um dado nutriente são mais eficientes na utilização do mesmo.

No trabalho de Santos et al., 2008, foram considerados os valores de *cub* derivados da literatura, em termos da média dos trabalhos consultados, refletindo a eficiência de utilização de nutrientes de cultivares de soja mais antigas e com menores produtividades em relação às cultivares mais utilizadas atualmente (Bender et al., 2015). Por isso, a utilização de dados obtidos com variedades de soja mais atuais e cultivadas sob condições específicas de campo poderiam contribuir para predições mais adequadas dos valores de *cub* e, conseqüentemente, dos conteúdos nutricionais da cultura da soja.

Com o intuito de obter os valores de maior eficiência de K na cultura da soja do Brasil Central, seria de grande utilidade identificar no relacionamento *cubK* (*y*) e produtividade (*x*) as lavouras que apresentam os maiores *cubK*. Isso permitiria identificar plantas com maior eficiência no uso de K ou menor demanda de K, que no presente trabalho foram denominadas como “eficiência de K superior” e “demanda de K inferior”, respectivamente. Essas amostras poderiam ser identificadas por meio da utilização da técnica da linha de fronteira, especificamente pela linha de fronteira superior. Essa técnica, apresentada por Webb (1972), permite isolar os talhões de maior

resposta produtiva, (ou os de maior *cubK*) e identificar como se comportam os fatores de produtividade desses talhões (Shatar & McBratney, 2004).

Desse modo, o presente trabalho tem como objetivo:

Determinar os valores de eficiência de K superior e da demanda de K inferior da cultura da soja nas condições de solo e clima tropical do Brasil Central.

Caracterizar os fatores de produção das lavouras de soja que apresentaram as demandas de K inferior e a eficiência de K superior em condições de elevada produtividade.

2. Material e Métodos

2.1. Caracterização do banco de dados

Foi utilizado um banco de dados referente a 293 talhões comerciais de soja, localizados no município de Campo Novo do Parecis (MT). A altitude média é de 500 m e a área total é de 17 580 ha.

No banco de dados foram obtidos para cada safra, as produtividades de grãos obtidas (umidade em torno de 130 g kg⁻¹), a precipitação pluviométrica, a classe textural do solo, bem como informações sobre correção do solo (quantidade e tipo de corretivo), adubação (tipo e quantidade de adubo aplicado) e ciclo de maturação das espécies cultivadas. Além disso, o banco de dados também contempla os resultados das análises químicas do solo e na folha índice (terceiro trifólio com pecíolo, Ttp). Como o banco de dados é referente a materiais coletados entre as safras de 1998/99 a 2002/03 foi considerado que as informações de cada safra de um talhão de soja correspondessem aos dados de uma lavoura de soja. Portanto, foi considerado que o banco de dados utilizados contemplou 673 lavouras (devido à ausência de informações em algumas safras).

Durante o cultivo de verão (outubro a março) a radiação média foi de 12,6 Mm⁻² d⁻¹, a precipitação pluvial média de 1 908 mm, a temperatura mínima nesse mesmo período foi de 20,5 °C e a máxima de 31,3 °C. A maior parte dos solos estudados (87 %) são classificados como Latossolos Vermelhos distróficos (LVd), de textura argilosa à média, sendo o restante (13 %) composto por Neossolos Quartzarênicos órticos (RQo).

As amostras de solo para análise química foram compostas por 12 amostras simples coletadas a 15 cm de profundidade sendo essas coletadas logo após a colheita, entre abril e maio.

As amostras foliares (Ttp) foram coletadas no estágio R3 (final da floração: vagens com 1,5 cm), entre os quatro últimos nós superiores, em pelo menos 30 plantas.

2.2. Produção de matéria seca da planta, demandas de K na planta e no grão e os coeficientes de utilização biológicos do K na planta e no grão

Por meio dos modelos matemáticos desenvolvidos por Kurihara et al. (2013), foi estimado a massa de matéria seca do terceiro trifólio com pecíolo (mMS_Ttp ; t ha⁻¹), a massa de matéria seca da parte aérea da planta (mMS_PA ; t ha⁻¹) e massa de matéria seca do grão (mMS_Gr ; kg ha⁻¹) em função da produtividade (p ; t ha⁻¹), para cada safra das lavouras de soja comercial provenientes desse banco de dados. Enquanto, a demanda de K na parte aérea da planta (dK_PA ; kg ha⁻¹) e no grão (dK_Gr ; kg ha⁻¹) foram estimada em função do conteúdo de K no terceiro trifólio com pecíolo (cK_Ttp ; kg ha⁻¹).

Desse modo, por meio desses modelos, foi estimado a massa de matéria seca do terceiro trifólio com pecíolo (mMS_Ttp) no estágio de desenvolvimento R2 em função da produtividade (p). Conforme, pode ser observado na Eq. 1.

$$mMS_Ttp = 0,044 e^{0,524**p} \quad R^2 = 0,65 \quad \forall 2,813 \leq p \leq 4,813 \text{ t ha}^{-1} \quad \text{Eq. 1}$$

Em que: mMS_Ttp : massa de matéria seca do terceiro trifólio com pecíolo (t ha⁻¹); p : produtividade (t ha⁻¹)

Também, por meio dos modelos matemáticos desenvolvidos por Kurihara et al. (2013), foi estimada a produção de matéria seca da parte aérea da planta (mMS_PA) no estágio de desenvolvimento R6 em função da produtividade (p) (Eq. 2).

$$mMS_PA = 0,717 e^{0,611**p} \quad R^2 = 0,75 \quad \forall 2,813 \leq p \leq 4,813 \text{ t ha}^{-1} \quad \text{Eq. 2}$$

Em que: mMS_PA : massa de matéria seca da parte aérea (t ha⁻¹); p : produtividade (t ha⁻¹)

A massa de matéria seca dos grãos (mMS_Gr) foi determinada considerando-se a produtividade de grãos com 130 g kg⁻¹ de umidade (p ; kg ha⁻¹) de cada safra do talhão (Eq. 3).

$$mMS_Gr = p 0,87 \quad \text{Eq. 3}$$

Em que: mMS_Gr : massa de matéria seca dos grãos (kg ha^{-1}); p : produtividade (kg ha^{-1})

Os modelos de Kurihara et al. (2013) não consideraram a produção de matéria seca das raízes de soja. Desse modo, foi considerado que a massa de matéria seca do sistema radicular da soja corresponde, em média, a 18 % da máxima produção acumulada da parte aérea (Webb et al., 1954; Moraes, 1983; Vieira, 1985; Melges et al., 1989). Por meio, dessa relação, bem como, a consideração da mMS_Gr foram obtidas a produção de massa de matéria seca da planta (mMS_Pl), conforme pode ser observado na Eq. 4.

$$mMS_Pl = (mMS_PA + mMS_Gr) 1,18 \quad \text{Eq. 4}$$

Em que: mMS_Pl : massa de matéria seca da planta (kg ha^{-1}); mMS_PA : massa de matéria seca da parte aérea (kg ha^{-1}); mMS_Gr : massa de matéria seca dos grãos (kg ha^{-1})

Em seguida, os teores de K da folha índice (tK_Ttp) foram multiplicados pela massa de matéria seca deste componente, o que resultou no conteúdo de K no terceiro trifólio com pecíolo (cK_Ttp) no estágio R2 (Eq. 5).

$$cK_Ttp = mMS_Ttp * tK_Ttp \quad \text{Eq. 5}$$

Em que: cK_Ttp : conteúdo de P e K no terceiro trifólio com pecíolo (kg ha^{-1}); mMS_Ttp : massa de matéria seca do terceiro trifólio com pecíolo (t ha^{-1}); tP,K_Ttp : teor de P e K no terceiro trifólio com pecíolo (g kg^{-1})

Com base no cK_Ttp , foram estimados os conteúdos de K (kg ha^{-1}) no caule (cK_C ; Eq. 6) pecíolo (cK_P ; Eq. 7) e trifólios (cK_T ; Eq. 8), nos estádios de desenvolvimento de máximo acúmulo na parte aérea (R4 para K segundo Kurihara et al., 2013).

$$cK_C = 5,29 cK_Ttp^{0,973} \quad R^2 = 0,67 \quad \forall 3,1 \leq cK_Ttp \leq 14 \text{ kg ha}^{-1} \quad \text{Eq. 6}$$

$$cK_P = 4,52 cK_Ttp^{0,937} \quad R^2 = 0,58 \quad \forall 3,1 \leq cK_Ttp \leq 14 \text{ kg ha}^{-1} \quad \text{Eq. 7}$$

$$cK_T = 5,25 cK_Ttp^{0,821} \quad R^2 = 0,78 \quad \forall 3,1 \leq cK_Ttp \leq 14 \text{ kg ha}^{-1} \quad \text{Eq. 8}$$

Em que: cK_C : Conteúdo de K no caule (kg ha^{-1}); cK_P : Conteúdo de K no pecíolo (kg ha^{-1}); cK_Ttp : Conteúdo de K no terceiro trifólio com pecíolo (kg ha^{-1})

Além disso, por meio dos mesmos modelos foram estimados os conteúdos de K, nas vagens (cK_V ; Eq. 9) e dos grãos (cK_Gr ; Eq. 10) nos estádios R6 e R8, respectivamente, segundo Kurihara et al. 2013.

$$cK_V = 0,312 + 0,441 cK_{Ttp} \quad R^2 = 0,73 \quad \forall 3,1 \leq cK_{Ttp} \leq 14 \text{ kg ha}^{-1} \quad \text{Eq. 9}$$

$$cK_{Gr} = 23,9 cP_{Ttp}^{0,399} \quad R^2 = 0,65 \quad \forall 3,1 \leq cK_{Ttp} \leq 14 \text{ kg ha}^{-1} \quad \text{Eq. 10}$$

Em que: cK_V : Conteúdo de K na vagem (kg ha^{-1}); cK_{Gr} : Conteúdo de K no grão (kg ha^{-1}); cK_{Ttp} : Conteúdo de K no terceiro trifólio com pecíolo (kg ha^{-1})

Dessa forma, por meio do conteúdo desses componentes vegetativos foram obtidos a dK_{PA} (kg ha^{-1}). Conforme, observado na Eq. 11.

$$dK_{PA} = cK_C + cK_P + cK_V + cK_{Gr} \quad \text{Eq. 11}$$

Em que: dK_{PA} : d : Demanda (kg ha^{-1}); c : conteúdo (kg ha^{-1}); C: Caule; Gr: grão; P: Pecíolo; PA: Parte aérea; V: Vagem.

Da mesma forma, que os modelos de Kurihara et al. (2013) não consideraram as produções de massa de matéria seca das raízes os mesmo também não consideraram o acúmulo de nutrientes nesse componente vegetativo. Portanto, para correção do conteúdo de K presente nas raízes foi considerado que os mesmos representam 7 % do acumulado na planta toda (Malavolta et al., 1980; Moraes, 1983; Faquin, 1988). Por meio, dessa correção foi obtida a demanda K (Eq. 12) na planta (dK_{Pl}).

$$dK_{Pl} = dK_{PA}/0,93 \quad \text{Eq. 12}$$

Em que: dK_{Pl} : Demanda de K na planta (kg ha^{-1}); dK_{PA} : Demanda de K na parte aérea (kg ha^{-1})

Além das demandas de nutrientes e da produção de massa de matéria seca das plantas, também foram estimados os coeficientes de utilização biológica do K na planta e no grão ($cubK_{Pl,Gr}$, em kg kg^{-1}), para cada lavoura comercial de soja proveniente desse banco de dados (Eq. 13 e 14, respectivamente).

$$cubK_{Pl} = (mMS_{Pl}) / [(dK_{PA})/0,93] \quad \text{Eq. 13}$$

$$cubK_{Gr} = mMS_{Gr}/cK_{Gr} \quad \text{Eq. 14}$$

Em que: $cubK_{Pl}$: Coeficiente de utilização biológica de K na planta (kg kg^{-1}); mMS_{Pl} : Massa de matéria seca da planta (kg ha^{-1}); dK_{PA} : Demanda de K da parte aérea (kg ha^{-1}); $cubK_{Gr}$: Coeficiente de utilização biológica de K no grão (kg kg^{-1}); mMS_{Gr} : Massa de matéria seca do grão (kg ha^{-1}); cK_{Gr} : Conteúdo de K no grão (kg ha^{-1})

2.3. Estatísticas descritivas e testes de t dos coeficientes de utilização biológicos de K na planta e no grão

Os valores dos $cubP,K_{Pl,Gr}$, de cada safra dos talhões, foram estratificados para solos de textura arenosa, não-argilosa (agrupamento das safras dos talhões arenosos

com os de textura média) e argilosa. Foram obtidas as estatísticas descritivas: média, desvio padrão e coeficiente de variação dos valores de *cubK_Pl,Gr* referentes a cada classe textural e de todas as safras dos talhões. As médias dos *cubK_Pl,Gr* dos talhões de cada classe textural do solo e de todas as lavouras foram comparadas pelos teste t de Student.

Dentro dos solos de textura argilosa os valores dos *cubK_Pl,Gr* de cada lavoura de soja também foram estratificados em cultivares de soja com diferentes ciclos de maturação: semiprecoce e precoce (*cubK_Plsp,Grsp*); médio (*cubK_Plm,Grm*); semitardio e tardio (*cubK_Plst,Grst*) das cultivares de soja. Foram obtidas as estatísticas descritivas (média, desvio padrão e coeficiente de variação) dos valores desses *cubK_Pl,Gr*. As médias dos *cubK_Pl,Gr* dos talhões de cada ciclo de maturação cultivados em solos argilosos também foram comparadas pelos teste t de Student.

Deve-se ressaltar que devido ao número reduzido de informações referentes aos solos de textura média, os dados provenientes dessa classe textural foram agrupados com aqueles referentes às lavouras dos solos arenosos, o que resultou na classe textural denominada não-argilosa. Esse agrupamento se fez necessário para que não houvesse perda de informações.

2.4. Modelos matemáticos utilizados para estimativa dos coeficientes de utilização biológicos superiores e médios de K na planta e no grão

Foram ajustados gráficos de dispersão dos valores dos *cubK_Pl,Gr* (y) em função da produtividade (x), para todas as lavouras de soja e para classe argilosa subdividida em diferentes ciclos de maturação. As linhas de fronteira superior e média (*cubK_Pl,Gr* maior e médio, respectivamente) foram obtidas por meio da seleção dessas lavouras com o auxílio do aplicativo Boundary Fit.

Em seguida, com o auxílio do aplicativo “Curve Expert 1.4” (Hyams, 2010) foram ajustados os modelos relacionando os valores dos *cubK_Pl,Gr* com a produtividade, considerando as populações de superior e média eficiência nutricional de K. Dentre os modelos obtidos pelo aplicativo, selecionou-se para cada população aquele com maior coeficiente de determinação e menor erro padrão.

2.5. Demanda inferior e média de K na planta e no grão

Conforme observado nas equações 10 e 12 (item 2.2.) utilizadas para estimar a demanda de K na planta e no grão ($dK_{Pl,Gr}$; em $kg\ ha^{-1}$) para todas as lavouras de soja. Também foi observado no item 2.4 que os talhões com maiores valores de $cubK_{Pl,Gr}$ (linha de fronteira superior) foram identificados, por meio do aplicativo Boundary Fit. Dessa forma, considerou-se que os talhões de soja com demanda inferior e média na planta e no grão ($d_{inf}K_{Pl,Gr}$ e $d_{med}K_{Pl,Gr}$, respectivamente; em $kg\ ha^{-1}$) corresponderem, respectivamente, às safras dos talhões de $cubK_{Pl,Gr}$ superior e médio. Com isso, foram obtidas as $d_{inf}K_{Pl,Gr}$ e $d_{med}K_{Pl,Gr}$ de todos os talhões ($d_{inf}K_{Plt,Grt}$ e $d_{med}K_{Plt,Grt}$; em $kg\ ha^{-1}$); com também das lavouras de solos argilosos que foram estratificadas em variedades de ciclo semiprecoce e precoce ($d_{inf}K_{Plsp,Grsp}$ e $d_{med}K_{Plsp,Grsp}$; em $kg\ ha^{-1}$); médio ($d_{inf}K_{Plm,Grm}$ e $d_{med}K_{Plm,Grm}$; em $kg\ ha^{-1}$) e semitardio e tardio ($d_{inf}K_{Plst,Grst}$ e $d_{med}K_{Plst,Grst}$; em $kg\ ha^{-1}$).

Em seguida, foram calculados, para cada lavoura de soja proveniente das populações de $d_{inf}K_{Pl,Gr}$ e $d_{med}K_{Pl,Gr}$, as $dK_{Pl,Gr}$ obtidas para cada tonelada de soja produzida (em $kg\ t^{-1}$) (Eq. 15).

$$dK_{Pl,Gr_p/t} = dK_{Pl,Gr} / pGr \text{ em } t \quad \text{Eq. 15}$$

Em que: $dK_{Pl,Gr_p/t}$: Demanda de K na planta e no grão para cada tonelada de grão de soja produzida ($kg\ t^{-1}$); $dK_{Pl,Gr}$: Demanda de K na planta e no grão ($kg\ ha^{-1}$); pGr em t: Produtividade de grão de soja em tonelada ($t\ ha^{-1}$)

Após esse cálculo, foram obtidos a frequência das lavouras de soja amostradas, as médias e os desvios padrões das $d_{inf}K_{Plt,Grt}$ e $d_{med}K_{Plt,Grt}$; $d_{inf}K_{Plsp,Grsp}$ e $d_{med}K_{Plsp,Grsp}$; $d_{inf}K_{Plm,Grm}$ e $d_{med}K_{Plm,Grm}$; $d_{inf}K_{Plst,Grst}$ e $d_{med}K_{Plst,Grst}$, em $kg\ t^{-1}$ de soja produzida.

Conforme observado no item 2.4, foram obtidos modelos que estimaram os $cubK_{Pl,Gr}$ superiores e médios em função da produtividade, de todos os talhões, como também das lavouras com solos argilosos que foram subdivididas em grupos de variedades de soja com diferentes ciclos de maturação. Portanto, por meio dos modelos com os $cubK_{Pl,Gr}$ ($kg\ kg^{-1}$) superiores e médios e da mMS_{Pl} ($kg\ ha^{-1}$), ambas estimadas em função das produtividades de soja, foram obtidas as $d_{inf}K_{Pl,Gr}$ (Eq. 16) e $d_{med}K_{Pl,Gr}$ (Eq. 17) de todos os talhões (em $kg\ ha^{-1}$), como também das lavouras com solos argilosos que foram estratificadas em grupos de variedades de soja com diferentes ciclos de maturação (em $kg\ ha^{-1}$).

$$d_{\text{inf}}K_{\text{Pl,Gr}} = mMS_{\text{Pl,Gr}}/\text{maior } cubK_{\text{Pl,Gr}} \quad \text{Eq. 16}$$

$$d_{\text{med}}K_{\text{Pl,Gr}} = mMS_{\text{Pl,Gr}}/\text{médio } cubK_{\text{Pl,Gr}} \quad \text{Eq. 17}$$

Em que: $d_{\text{inf}}K_{\text{Pl,Gr}}$: Demanda inferior de K na planta e no grão (kg ha^{-1});
 $mMS_{\text{Pl,Gr}}$: Massa de matéria seca da planta e do grão (kg ha^{-1}); $cubK_{\text{Pl,Gr}}$:
 Coeficiente de utilização biológico de K na planta e no grão (kg kg^{-1});
 $d_{\text{med}}K_{\text{Pl,Gr}}$: Demanda média de K na planta e no grão (kg ha^{-1})

Posteriormente, relacionou-se, em um gráfico de dispersão, a produtividade de soja com as $d_{\text{inf}}K_{\text{Pl,Gr}}$ e $d_{\text{med}}K_{\text{Pl,Gr}}$, referentes às safras de todos os talhões. Também relacionou-se, em um gráfico de dispersão, a produtividade de soja com as $d_{\text{inf}}K_{\text{Pl,Gr}}$ e $d_{\text{med}}K_{\text{Pl,Gr}}$ das lavouras de solos argilosos que foram subdivididas em diferentes ciclos de maturação.

2.6. Caracterização dos talhões com maior produtividade e coeficiente de utilização biológico de K na planta

No banco de dados, foram selecionadas, dentre todos os talhões, aquelas em que se obtiveram os $cubK_{\text{Pl}}$ superior e produtividades iguais ou maiores que 3600 kg ha^{-1} de soja. Em seguida, por meio de análise descritiva foram avaliados, nessa população com elevada produtividade e maior $cubK_{\text{Pl}}$, as frequências absoluta dos talhões, os valores menores e maiores e as médias dos seguintes atributos de produção: pluviosidade acumulada durante o ciclo da cultura da soja; teores de K, Ca e Mg (g kg^{-1}) no Ttp; frequência absoluta dos talhões com solos de textura arenosa, média e argilosa; teores de P e K (mg dm^{-3}) e saturação por bases (V em %) nos solos; a relação $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\text{K}^{+}$ disponíveis no solo e K (K_2O em kg ha^{-1}) aplicado no solo. Devido à maior amplitude dos teores de P, K, da V e das quantidades de K aplicadas no solo, foram obtidas as estatísticas descritivas desses atributos quando os valores desses atributos apresentavam-se entre os percentis 10 a 90. Nessa mesma população, também foram obtidas as frequências relativas: das cultivares, de cada ano das safras e do ciclo de maturação dessas cultivares de soja.

2.7. Índice de colheita de K

Foram obtidos os índices de colheita de K (pela razão entre as demandas do nutriente nos grãos e na planta) para todas as lavouras de soja. Os índices de colheita de K (y) referente às populações de *cubK_Pl* superior e médio foram subdivididas e relacionadas as produtividades de soja (x) em um gráfico de dispersão.

Em seguida, com o auxílio do aplicativo “Curve Expert 1.4” (Hyams, 2010) foram ajustados os modelos relacionando os valores dos índices de colheita de K e a produtividade, considerando as populações de *cubK_Pl* superior e médio. Dentre os modelos obtidos pelo aplicativo, selecionou-se para cada população aquele com maior coeficiente de determinação e menor erro padrão.

3. Resultados e discussão

3.1. Estatísticas descritivas e teste de t dos coeficientes de utilização biológicos de K na planta e no grão

Solos com maior teor de argila apresentaram menores médias dos *cubK_Pl,Gr* em relação aos solos mais arenosos (Tabela 2). Esses resultados podem ter ocorrido, pois os cátions trocáveis Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ seguem uma série denominada liotrófica quanto à energia de retenção nos colóides do solo, o que resulta na maior lixiviação de K em solos bem drenados, principalmente em solos com menor CTC (Raij, 1991). Pode ter havido maior lixiviação de K nos solos mais arenosos, o que poderia ter contribuído para a menor disponibilidade de K para as plantas nos solos arenosos. Isso poderia ter favorecido o aumento da eficiência no uso de K nesses solos quando comparado aos mais argilosos. Entretanto, o aumento da eficiência no uso de K nesses solos mais arenosos não foi suficiente para que houvesse diferenças significativas entre as médias dos *cubK_Pl,Gr* obtidos nas diferentes classes texturais (Tabela 3).

O aumento das médias dos *cubK_Pl,Gr* foi significativo com o prolongamento do ciclo de maturação das cultivares de soja provenientes dos solos argilosos (Tabela 3). Resultados similares foram obtidos por Souza et al. (2012), Bruetsch & Estes (1976) e Furlani et al. (2002) na utilização eficiente do N na citricultura, como também no uso eficiente de P nas culturas do milho e da soja, respectivamente. Na citricultura os autores Pozzan & Tribone (2005) observaram que posteriormente à abertura das flores e à queda das pétalas a velocidade das transformações bioquímicas dos frutos é maior em algumas cultivares precoces. Desse modo, os menores ciclos, aliados ao alto potencial

produtivo de algumas variedades precoces, acabaram por favorecer uma exigência nutricional pontual maior, em um espaço de tempo menor, em relação a algumas variedades de ciclo tardio. Além disso, os autores Bruetsch & Estes (1976) e Baker et al. (1970) comentam que, algumas variedades de milho com maior ciclo de desenvolvimento acabam por absorver o P de maneira mais eficiente, devido à maior profundidade de penetração de seus sistemas radiculares no solo. Entretanto, em cultivares de milho, com diferentes ciclos de maturação e cultivadas em solos com baixos teores de P, Bayuelo-Jiménez & Ochoa-Cadavid (2014) constataram, nas cultivares de ciclo tardio os menores valores de eficiência de utilização de P, apesar dessas apresentarem as maiores produtividades. De maneira geral, os resultados obtidos nesse trabalho ocorreram, pois o prolongamento no ciclo de maturação permitiu que a planta tivesse mais tempo, para produzir matéria seca, bem como, ciclar bioquimicamente os nutrientes acumulados. Essas características podem conferir a essas cultivares de soja, com maior ciclo de maturação, maior eficiência no uso de K.

Tabela 2. Estatística descritiva do $cubK_{Pl,Gr}$ obtidos de acordo com a classe textural e por meio da subdivisão da classe argilosa em diferentes ciclo de maturação das cultivares de soja

Textura e Ciclo	^{1/} $cubK_{Pl}$				^{2/} $cubK_{Gr}$			
	n	\bar{y}	S	CV	n	\bar{y}	s	CV
		----kg kg ⁻¹ ----		%		----kg kg ⁻¹ ----		%
Arenosa	102	95,12	18,15	19,08	102	69,04	6,97	10,10
Não Argilosa	127	94,84	17,31	18,25	127	68,99	6,67	9,66
Argilosa	532	92,75	13,76	14,84	532	68,35	5,57	8,15
Semi. e Precoce	38	85,62	9,39	10,97	38	65,21	4,26	6,53
Médio	197	91,45	12,90	14,11	197	67,88	5,28	7,78
Semi. e Tardio	296	94,48	14,41	15,25	296	69,04	5,74	8,31
Todos os talhões	658	93,15	14,52	15,59	658	68,47	5,79	8,46

^{1/}Coeficiente de utilização biológico de K na planta; ^{2/}Coeficiente de utilização biológico de K no grão.

Tabela 3. Média do *cubK_Pl,Gr* obtido a partir da classe textural do solo e por meio da subdivisão da classe argilosa em diferentes ciclos de maturação das cultivares de soja, bem como a comparação dessas médias pelo teste t de Student

Textura e Ciclo	Teste t	
	<i>cubK_Pl</i>	<i>cubK_Gr</i>
Arenosa vs Não-Argilosa	ns	ns
Arenosa vs Argilosa	ns	ns
Arenosa vs Todos	ns	ns
Não-Argilosa vs Argilosa	ns	ns
Não-Argilosa vs Todos	ns	ns
Argilosa vs Todos	ns	ns
Ciclo de maturação em solo argiloso		
Semiprecoce e Precoce vs Médio	**	**
Semiprecoce e Precoce vs Semitardio e Tardio	***	***
Médio vs Semitardio e Tardio	**	*

ns não significativo; * significativo a 5%; ** significativo a 1%; *** significativo a 0,1%.

3.2. Modelos matemáticos utilizados para estimar os coeficientes de utilização biológicos de K na planta e no grão

Com as equações utilizadas para estimar os *cubK_Pl,Gr* superiores foram obtidos os maiores coeficientes de determinação (Figuras 1, 2, 3 e 4).

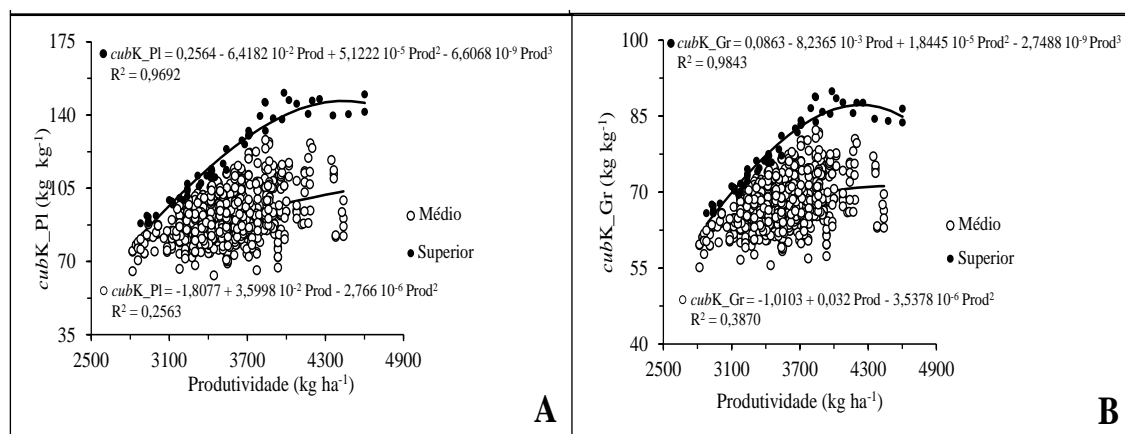


Figura 1. Relação entre o valor do *cubK_Pl* superior (A) e *cubK_Gr* médio (B) em função da produtividade de todas as lavouras de soja contidas no banco de dados.

Também podem ser observadas nas figuras 1, 2, 3 e 4 que com o aumento da produtividade os valores dos *cubK_Pl,Gr* aumentaram (Gemenet et al., 2015; Li et al., 2014), até atingirem um valor máximo e depois diminuíram com o aumento do rendimento de grão. Esse comportamento fica mais nítido nas relações entre produtividade com os valores dos *cubK_Pl,Gr* superiores. Esses resultados diferem dos obtidos por Santos et al. (2008), neste trabalho o aumento da produtividade de grãos

resultou em uma redução imediata dos *cubK* nas partes vegetativas da planta mais vagens, indicando que plantas mais produtivas são menos eficientes no uso desses nutrientes. Além disso, não foi observada relação entre os valores dos *cubP,K_Gr* com a produtividade (Santos et al., 2008). A diferença entre os resultados pode ser atribuída ao número de amostras e à forma com que os dados foram obtidos. A maior parte dos dados de Santos et al. (2008) foram obtidos em condições de casa de vegetação e com menor número de informações, pois foram retirados da literatura, enquanto nesse trabalho os mesmos foram gerados em condições de campo e com maior número de dados. Ainda, nas figuras 1, 2, 3 e 4 observou-se que com o maior aumento da produtividade os valores dos *cubK_Pl,Gr* decresceram. Esses decréscimos demonstraram que as produções de matéria seca, na planta e no grão, não acompanharam os crescentes acúmulos desses nutrientes, o que evidencia uma certa tendência de “consumo de luxo” de K tanto na planta como no grão quando são obtidas as maiores produtividades (Schulte & Kelling, 2013). Além disso, foi observado, na comparação entre as curvas dos modelos obtidas entre os *cubP_Pl,Gr* em função da produtividade (obtidas no capítulo 1) com as curvas dos modelos obtidos entre *cubK_Pl,Gr* em função da produtividade (figuras 1, 2, 3 e 4), que o decréscimo dos valores dos *cubP_Pl,Gr* se inicia em produtividades menores do que nos *cubK_Pl,Gr*, havendo no caso dos valores de menor *cubK_Pl* tendência de crescimento contínuo desses valores. Esses resultados demonstram que as lavouras de soja continuam produzindo matéria seca com o crescente acúmulo de K. Isso ocorre devido as baixas disponibilidades e as menores quantidades aplicadas de K nesses talhões.

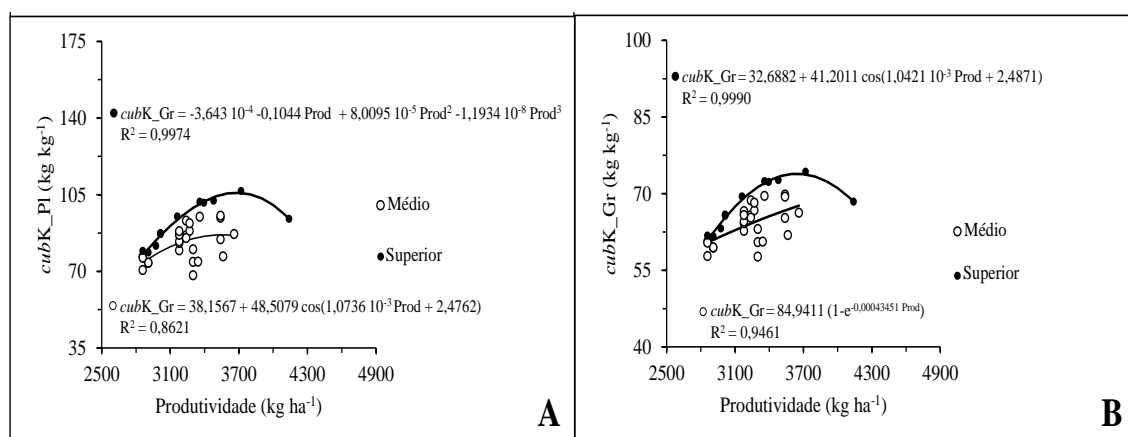


Figura 2. Relação entre o valor do *cubK_Pl* superior (A) e *cubK_Gr* médio (B) em função da produtividade, obtidas em solos argilosos que foram subdivididos em safras de lavouras de soja cultivadas com variedade de ciclo semiprecoce e precoce.

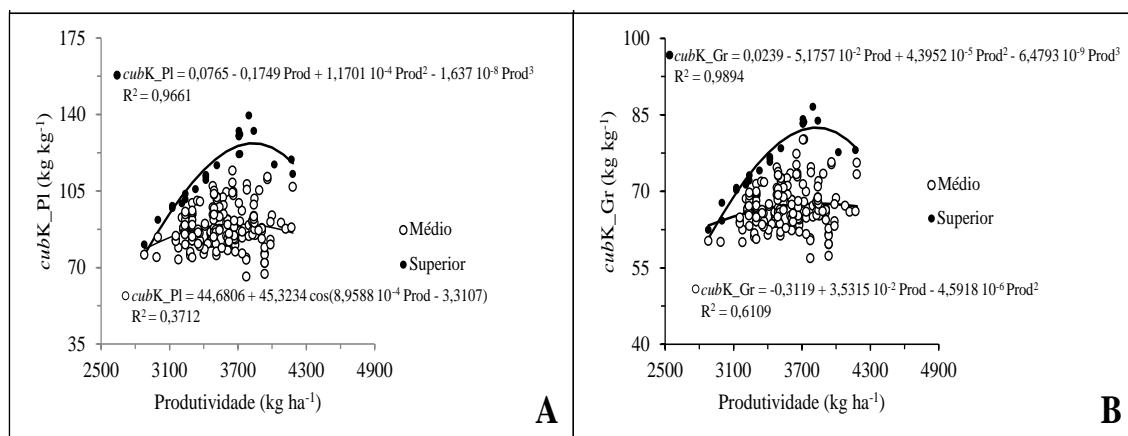


Figura 3. Relação entre o valor do *cubK_Pl* superior (A) e *cubK_Gr* médio (B) em função da produtividade, obtidas em solos argilosos que foram subdivididos em safras de lavouras de soja cultivadas com variedade de ciclo médio.

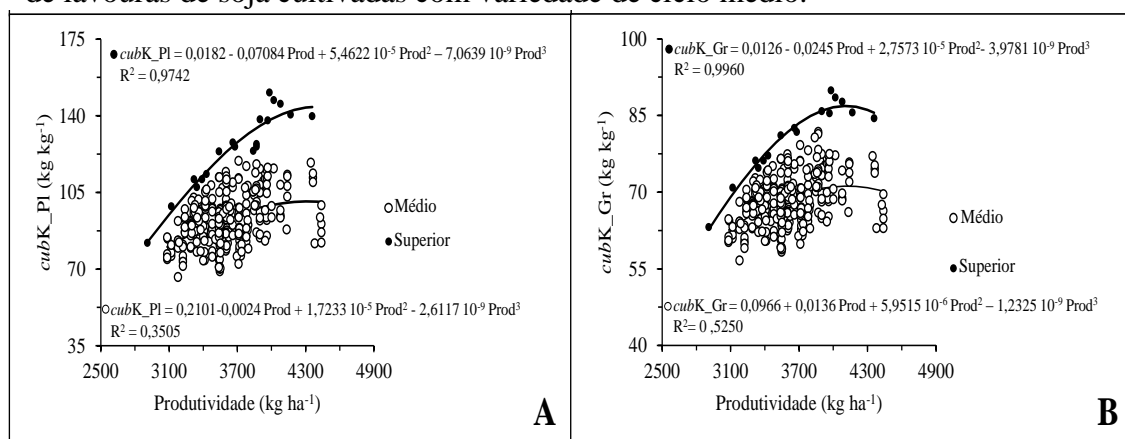


Figura 4. Relação entre o valor do *cubK_Pl* superior (A) e *cubK_Gr* médio (B) em função da produtividade, obtidas em solos argilosos que foram subdivididos em safras de lavouras de soja cultivadas com variedade de ciclo semitardio e tardio.

De maneira a corroborar com essa afirmação foi observado que 78,9 % dos talhões possuíam muito baixos a baixos teores de K no solo (Mascarenhas & Tanaka, 1996), além disso 61,63 % dos talhões receberam maiores quantidades de P do que K.

3.3. Demanda inferior e média de K na planta e no grão de acordo com a produção

O acúmulo médio de K da planta ($46,2 \text{ kg t}^{-1}$) e do grão ($14,3 \text{ t}^{-1}$) obtidas por Kurihara (2004) estão superestimados quando comparadas com as $d_{\text{med}}K_{\text{Pl,Gr}}$ obtidas nesse trabalho (Tabela 4). Esses resultados podem ocorrer, pois nesse trabalho grande parte dos talhões possuíam baixa disponibilidade de K nos solos. De maneira, a corroborar com essa afirmação foi observado que 78,9 % dos talhões possuíam muito baixos a baixos teores de K no solo (Mascarenhas & Tanaka, 1996).

Tabela 4. Estatísticas descritivas das demandas inferior e média de K na planta e no grão para produção de uma tonelada de grão de soja, obtidas com todas as lavouras de soja e a partir da estratificação dos solos argilosos em diferentes ciclos de maturação das cultivares de soja

	$d_{inf}K_{Pl,Gr}$			$d_{med}K_{Pl}$			$d_{inf}K_{Gr}$			$d_{med}K_{Gr}$		
	n	\bar{y}	s	n	\bar{y}	s	n	\bar{y}	s	n	\bar{y}	s
		---kg t ⁻¹ ---			----kg t ⁻¹ ----			----kg t ⁻¹ ----			----kg t ⁻¹ ----	
T.L. ^{1/}	51	25,15	2,27	608	34,88	4,10	54	11,27	1,08	605	12,93	0,91
Precoce ^{2/}	12	32,31	2,68	26	35,58	3,09	12	12,89	0,85	26	13,63	0,80
Médio ^{3/}	23	27,74	2,62	174	35,71	4,16	21	11,56	1,07	176	13,05	0,80
Tardio ^{4/}	19	26,29	2,30	277	34,76	4,06	16	10,87	1,07	280	12,79	0,91

^{1/}Todas as lavouras de soja amostradas; ^{2/}Cultivares de soja de ciclo semiprecoce e precoce; ^{3/}Cultivares de soja de ciclo médio; ^{4/}Cultivares de soja de ciclo semitardio e tardio.

Observou-se, para todas as lavouras amostradas, que a diferença das medias entre as demandas medias e inferior de K na planta e no grão corresponderam, respectivamente, a 9,73 e 1,66 kg t⁻¹ de grão produzido. Portanto, em muitos talhões pode ter ocorrido consumo de luxo de K. Dessa forma, a utilização dos modelos que estimam os $cubK_{Pl,Gr}$ superior seriam muito úteis para obtenção das $d_{inf}K_{Pl,Gr}$ e com isso colaborariam para recomendações mais sustentáveis desses nutrientes.

Na figura 5 pode ser observada as relações entre a produtividade e as estimativas da $d_{inf}K_{Pl,Gr}$ (A e C, respectivamente) e $d_{med}K_{Pl,Gr}$ (B e D, respectivamente). Essas demandas foram obtidas por meio dos modelos de $cubK_{Pl,Gr}$ superior e médio de todos os talhões, como também das lavouras de solos argilosos que foram subdivididos em cultivares de ciclo semiprecoce e precoce; médio e semitardio e tardio o que permitiu a obtenção dos $d_{inf}K_{Plt,Gr}$, $d_{med}K_{Plt,Gr}$; $d_{inf}K_{Plsp,Grsp}$; $d_{med}P,K_{Plsp,Grsp}$; $d_{crit}P,K_{Plm,Grm}$ e $d_{med}P,K_{Plm,Grm}$; $d_{crit}P,K_{Plst,Grst}$ e $d_{med}K_{Plst,Grst}$, respectivamente.

Foi observado na figura 5 uma tendência quanto a quantidade das $d_{inf}K_{Pl,Gr}$ e $d_{med}K_{Pl,Gr}$ as quais seguem a seguinte ordem: ciclo semiprecoce e precoce > ciclo médio > todas as amostras \geq ciclo semitardio e tardio. Esses resultados demonstraram que o acúmulo de nutrientes na soja é influenciado pelo ciclo de maturação. Observando-se uma tendência de diminuição das $d_{inf}K_{Pl,Gr}$ e $d_{med}K_{Pl,Gr}$, com a maior duração do ciclo de maturação das cultivares.

No trabalho de Partelli et al. (2014) foi avaliado os acúmulos relativos de P e K nos frutos de quatro genótipos (clones) de café Conilon, após a antese até a maturação dos frutos de café. Os genótipos de menor e maior ciclo de maturação apresentaram os maiores e menores acúmulos relativos desses nutrientes, respectivamente. Nos estudos de Laviola et al. (2007) foi observado que os frutos de *Coffea arabica* (L.) que

maturaram em menor tempo, da antese à maturação, também apresentaram os maiores acúmulos relativos de Ca, Mg e S.

Apesar dos trabalhos de Partelli et al. (2014) e Laviola et al. (2007) não focarem na demanda total de nutrientes na planta e no grão do café, como foi o foco deste estudo para a soja, os resultados desses autores são corroborados com os resultados obtidos neste trabalho. Esses resultados podem ocorrer, pois as cultivares de ciclo semitardio e tardio possuem maior tempo para produzir matéria seca, bem como, ciclar bioquimicamente os nutrientes acumulados. Essas características podem conferir às essas cultivares de soja, maior eficiência (conforme observado no item 3.2.) e menor demanda no uso desses nutrientes.

A relação entre a produtividade e as $d_{infK_Pl,Gr}$ (A e C) e d_{medK_Pl} (B e D) mostrou resposta curvilínea (Figura 5) o que está de acordo com a lei dos incrementos marginais decrescentes (Mitscherlich, 1909). Além disso, a curvilinearidade observada, permite a análise econômica das recomendações de fertilizantes (Heady & Pesek, 1954).

Observou-se na figura 5 A e C que até as produtividades de 3200, 3400 e 3500 kg ha⁻¹ as respectivas demandas inferiores de K obtidas com as cultivares de ciclo semiprecoce e precoce; ciclo médio; e de ciclo semitardio e tardio foram decrescentes em relação a produtividade. Nessas lavouras de menor produtividade pode ter ocorrido o efeito de diluição, dos teores de K no Ttp, nos talhões de maior $cubK_Pl,Gr$ (Steenbjerg, 1951). Esse efeito pode ocorrer em plantas severamente deficientes, mas com teores de nutrientes maiores do que algumas plantas bem nutridas, entretanto com o aumento do rendimento de grão (ou incremento da produção de matéria seca da planta) o nutriente acaba sendo diluído (Atwell et al., 1999). Como o teor da folha índice foi utilizado para estimar a demanda de K na planta e no grão esse efeito pode ter contribuído para esses resultados.

Entretanto, as d_{infK_Pl} (Figura 6 A) e d_{infK_Gr} (Figura 6 B), novamente, comportaram-se de forma curvilínea quando as estimativas das demandas inferiores de K obtidas com as cultivares de ciclo semiprecoce e precoce; ciclo médio; e de ciclo semitardio e tardio foram obtidas a partir, das respectivas, produtividades de 3200, 3400 e 3500 kg ha⁻¹. Portanto, as demandas de K, obtidas por meio do $cubK_Pl,Gr$ superior, poderiam ser utilizadas, no auxílio das recomendações de K, a partir do rendimento de grão em que se inicia a relação curvilínea entre as $d_{infK_Pl,Gr}$ e as produtividades da soja.

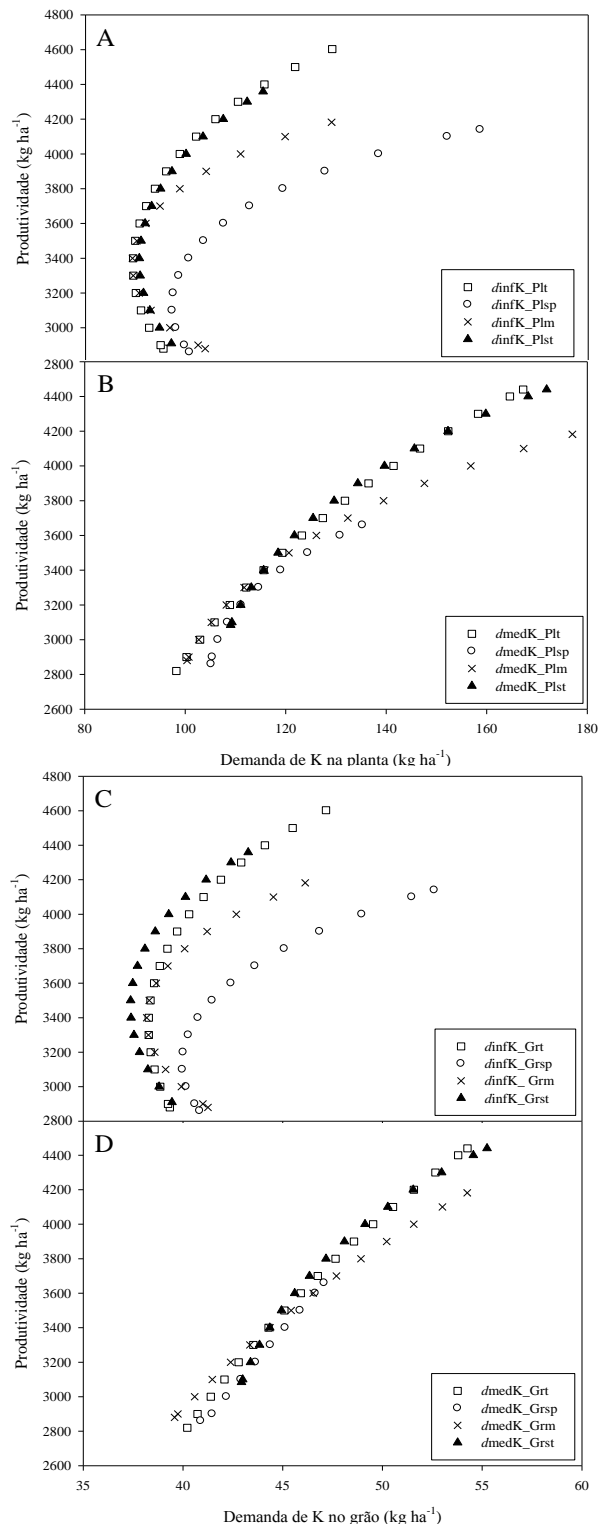


Figura 5. Relação entre a produtividade e a estimativa de demanda inferior de K na planta (A) e no grão (C) e da demanda média de K na planta (B) e no grão (D) referentes a todas os talhões (*dinfK_Plt,Grt* e *dmedP_Plt,Grt*), bem como, para as demandas obtidas nos solos argilosos que foram subdivididos em lavouras de soja cultivadas com cultivares de ciclo semiprecoce e precoce (*dinfK_Plsp,Grsp* e *dmedK_Plsp,Grsp*); ciclo médio (*dinfK_Plm,Grm* e *dmedK_Plm,Grm*); semitardio e tardio (*dinfK_Plst,Grst* e *dmedK_Plst,Grst*).

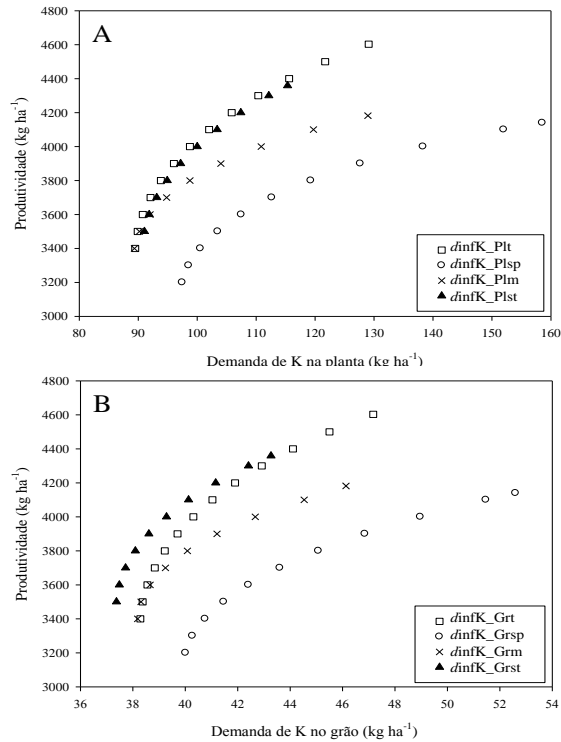


Figura 6. Relação entre a produtividade e a estimativa de demanda inferior de K na planta (A) e no grão (B) referente a todos os talhões (*dlnfK_Plt,Grt*), bem como, para as demandas obtidas nos solos argilosos que foram subdivididos em lavouras de soja cultivadas com variedades de ciclo semiprecoce e precoce (*dlnfK_Plsp,Grsp*); médio (*dlnfK_Plm,Grm*); semitardio e tardio (*dlnfK_Plst,Grst*).

3.4. Caracterização dos talhões com maior produtividade e eficiência no uso de K na planta

Observou-se, por meio das faixas e médias de precipitação pluviométrica, que as produtividades e valores de *cubK_Pl* superior ocorreram sob intensa pluviosidade, característica essa que é intrínseca da região de cultivo (Tabela 5). Entretanto, as médias de precipitação pluviométrica (Tabela 5) concentraram-se abaixo da média acumulada na região (média de 1 908 mm durante outubro a março, período do cultivo de verão no município de Campo Novo do Parecis). Essa média corresponde ao histórico de precipitação da região no mesmo período de cultivo em que foram obtidos os dados desse trabalho. Portanto, o aumento da pluviosidade pode aumentar a absorção de nutrientes nas plantas (Dias et al., 2002), que em condições de alta produtividade e boa fertilidade dos solos, esse aumento pode diminuir o *cubK_Pl* apesar do pequeno incremento nas produções de matéria seca.

Tabela 5. Estatísticas descritivas: dos teores de K, Ca e Mg da folha índice, da fertilização potássica, da pluviosidade e dos atributos do solo utilizados para caracterizar as lavouras de soja com *cubK_Pl* superior e alta produtividade (≥ 3600 kg ha⁻¹)

Faixas e médias dos atributos	Pluv. ^{1/}	Teor dos nutrientes no Ttp ^{2/}			Atributos do solo					Fert. ^{6/}		
		K	Ca	Mg	Classe Textural			K	P	V	Ca+Mg/K	K ₂ O
	mm	-----g kg ⁻¹ -----			Are. ^{3/}	Méd. ^{4/}	Arg. ^{5/}	mg dm ⁻³	%		mmol _c dm ⁻³ / mmol _c dm ⁻³	kg ha ⁻¹
Menor	1680	9,3	7,0	2,1	-	-	-	20	16	42	17,5	108
Maior	1737	11,6	16,1	4,9	-	-	-	63	41	61	110	137
\bar{y}	1733,3	10,6	11,0	3,6	-	-	-	42	26	50	45	121
n	22	22	22	22	6	1	15	17	17	17	22	18

^{1/} Pluviosidade acumulada durante outubro a março, período do cultivo de verão no município de Campo Novo do Parecis; ^{2/} terceiro trifólio com pecíolo; ^{3/} solos arenosos; ^{4/} solos de textura média; ^{5/} solos argilosos; ^{6/} fonte do fertilizante aplicado; - no banco de dados utilizado foram computados apenas a classe textural de cada lavoura de soja enquanto os valores contínuos do teor de argila de cada talhão não foram computados.

Quando comparadas as faixas de suficiência nutricional (método DRIS) da cultura da soja as quais foram propostas por Kurihara et al. (2013) para os Estados do Mato Grosso e Mato Grosso do Sul com as médias dos teores dos nutrientes no terceiro trifólio com pecíolo (Tabela 5) foi observado que os teores médios de Ca e Mg encontravam-se, com altos teores e na faixa de suficiência (suficiente) proposta por Kurihara et al. (2013), respectivamente. Isso demonstra que as lavouras mais produtivas e eficientes no uso do K devem estar supridas de outros nutrientes de modo a atender o equilíbrio nutricional. Enquanto, o teor médio de K no terceiro trifólio com pecíolo (Tabela 5), bem como o teor de K no terceiro trifólio com pecíolo de todas as lavouras com *cubK_Pl* superior e de alta produtividade apresentaram-se deficientes quando comparado as faixas de suficiência proposta por Kurihara et al. (2013). Isso não significa que esses talhões apresentaram deficiência de K, mas sim que esses nutrientes foram diluídos, ou seja, foram supridos de maneira a atender a demanda inferior de K na planta.

Também foi observado, dentre os talhões de alta produtividade e maiores *cubK_Pl*, a presença de solos de textura arenosa, média e argilosa (Tabelas 5), embora, a presença dos solos argilosos foi predominante. Isso ocorreu, pois a maior parte dos talhões, que compõem o banco de dados, possuía textura argilosa.

De acordo com a amplitude dos teores de K no solo (Tabela 5) e com as faixas de disponibilidade propostas por Mascarenhas & Tanaka (1996) a disponibilidade de K nos solos variaram de baixa a média.

Os talhões de alta produtividade e *cubK_Pl* superior (Tabela 6), foram compostos em sua maioria por talhões de safras mais recentes (02-03) o que difere

das lavouras com *cubP*_Pl superior e alta produtividade apresentados no capítulo 1 (compostos em sua maioria por lavouras cultivadas nas safras de 98-99). Portanto, a fertilidade dos solos das lavouras de alta produtividade e *cubK*_Pl superior (Tabela 5) foi mais intensamente construída do que nos solos com *cubP*_Pl superior e alta produtividade (apresentados no capítulo 1). Por isso, o solos dos talhões com alta produtividade e *cubK*_Pl superior (Tabela 5) possuíram maiores teores de P, matéria orgânica e pH (logo maior saturações por bases e menor acidez trocável) do que nos talhões com *cubP*_Pl superior e alta produtividade (apresentados no capítulo 1). Esses atributos do solo podem colaborar para menor fixação de P junto aos óxidos de Al e Fe do solo (Souza et al., 2006), o que pode favorecer para a maior disponibilidade de P para as plantas, que por sua vez contribuiria para o aumento da produtividade ou da produção de matéria seca. Mas, depois de atingidos no solo os teores de P necessários para o suprimento de altas produtividades, o aumento da disponibilidade desse nutriente poderia favorecer a diminuição do *cubP*_Pl. Portanto, nos talhões com *cubK*_Pl superior e altas produtividades (Tabela 5) pode ter ocorrido consumo de luxo de P, enquanto para os talhões com alta produtividade e *cubP*_Pl superior (apresentados no capítulo 1) esse nutriente foi suprido de maneira a atender $d_{inf}P_{Pl}$. De maneira a corroborar com esses resultados, no trabalho de Martinez et al. (1993) foi observado que a maior eficiência no uso de P (*cubP*_Pl) ocorreu quando, as três variedades de soja avaliadas foram cultivadas sob soluções nutritivas menos concentradas em P.

Na tabela 5, foi observado que o teor médio de K (42 mg dm^{-3}) e a dose média de K (K_2O) aplicada (121 kg ha^{-1}) nos solos dos talhões de alta produtividade e *cubK*_Pl superior (Tabela 5) foram superiores ao teor médio de K (36 mg dm^{-3}) e a dose média de K aplicada (113 kg ha^{-1} , dado não inserido na tabela) nos solos dos talhões com alta produtividade e *cubP*_Pl superior apresentados no capítulo 1. Entre esses talhões com faixas de produtividade semelhantes, se esperava que os talhões cujos solos apresentassem os maiores teores e quantidades aplicadas de K, fossem as lavouras menos eficientes no uso do K, pois iriam absorver maior quantidade de K para uma mesma produção de matéria seca (produtividade). Entretanto, esses resultados podem ocorrer, pois nos solos dos talhões com *cubP*_Pl superior e alta produtividade (apresentados no capítulo 1) a relação média de $(Ca+Mg)/K$ obtida nos solos foi menor do que a mesma relação observada nos solos dos talhões de alta produtividade e *cubK*_Pl superior (Tabela 5). Isso demonstra, que os teores de Ca e Mg dos solos desses

últimos talhões (Tabela 5), encontram-se maiores do que nos talhões com alta produtividade e *cupP_Pl* superior (apresentados no capítulo 1). Portanto, o aumento nos teores de Ca e Mg nos solos podem diminuir a absorção de K devido a competição desses cátions por sítios do complexo de troca de cátions no solo, bem como pela competição desses cátions por sítios de absorção na membrana plasmática (Mascarenhas et al., 2000; Goedert et al., 1975; Oliveira et al., 2001), apesar das plantas absorverem preferencialmente o K (Prado, 2008; Oliveira et al., 2001).

Observou-se que diferentes cultivares apresentaram *cupK_Pl* superior e altas produtividades (Tabela 6). Entretanto, a maior parte dessas cultivares é de ciclo semitardio e tardio, havendo menor frequência e ausência de espécies de ciclo médio e semiprecoce e precoce, respectivamente. Esses resultados acabam por corroborar com as afirmações mencionadas no item 3.1. onde se observou que com o prolongamento do ciclo de maturação as variedades de soja acabam por utilizar o K de maneira mais eficiente.

Tabela 6. Frequência das cultivares, ano da safra e o ciclo de maturação das cultivares de soja, obtidas a partir dos talhões de alta produtividade ($\geq 3\ 600\ \text{kg ha}^{-1}$) e maiores *cupK_Pl*

Cultivares	Frequência ^{1/}	Fr. cv. Total ^{2/}	Ano da Safra	Frequência ^{1/}	Ciclo de Maturação	Frequência ^{1/}
	%			%		%
A 7002	9,09	22,22	98-99	4,55	Prec. e Semiprec. ^{3/}	0
Arara Azul	4,55	8,33	00-01	4,55	Médio	31,82
E315	4,55	50,00	02-03	90,91	Tardio e Semitardio	68,18
Jiripoca	4,55	50,00				
M 8914	9,09	12,5				
M 9350	18,18	12,5				
Pintado	9,09	9,72				
UFV 18	4,55	100,00				
Tucano	13,64	9,00				
Tucunaré	4,55	7,69				
Uirapuru	18,18	4,93				

^{1/} Frequência de lavouras de soja em relação a todas as lavouras de alta produtividade ($\geq 3\ 600\ \text{kg ha}^{-1}$) e com *cupP_Pl* superior; ^{2/} Frequência de cultivar de soja com elevada produtividade e *cupK_Pl* superior em relação ao total de cada cultivar contemplado no banco de dados.

3.5. Índice de colheita de K na soja

Deve-se mencionar que os talhões que apresentaram *cupK_Pl* superior foram os mesmos talhões que contemplaram as populações com *cupK_Gr* superior (dados não apresentados). A semelhança entre essas populações permitiu que as relações entre os *icK* (razão entre os conteúdos de K no grão e da planta toda) e a produtividade (Figura 6)

fossem demonstradas utilizando-se os talhões de *cubK* superior e médio da planta ou do grão.

O *icK* apresentaram tendência de decréscimo com o aumento da produtividade (Figura 6). Dessa forma, foi observado nesse trabalho que os tecidos vegetais (raiz, pecíolo, trifólios e caule) dos talhões mais produtivos tenderam a acumular maiores quantidade de K do que os menos produtivos. Portanto, as entre safras e safras subsequentes foram beneficiadas com os restos culturais dos talhões mais produtivos, os quais contribuiriam para a maior ciclagem de K em comparação aos talhões menos produtivos. Diferentemente dos resultados apresentados nesse trabalho, Araújo & Teixeira (2012) observaram, em experimento a campo, com 64 variedades de feijão, que os *icN,P,K* obtiveram aumento com o ganho de produtividade.

Os talhões com *cubK_Pl* superior apresentaram os maiores *icK* (Figura 6). Gemenet et al. (2015) observaram em milho cultivado a campo no oeste da Africa, que os talhões de milho mais eficientes no uso do P também foram os que apresentaram os maiores valores de *icP*. Isso ocorre porque as plantas mais eficiente no uso dos nutrientes móveis (como K) possuem as maiores taxas de translocação, desses nutrientes, dos tecidos velhos para os novos (Raju *et al.*, 1987; Wieneke, 1990; Horst et al., 1993). Dessa forma, plantas mais eficientes no uso de K, possuem maior redistribuição desse nutriente dos tecidos velhos para o grão, pois esse é o último componente vegetativo a ser formada.

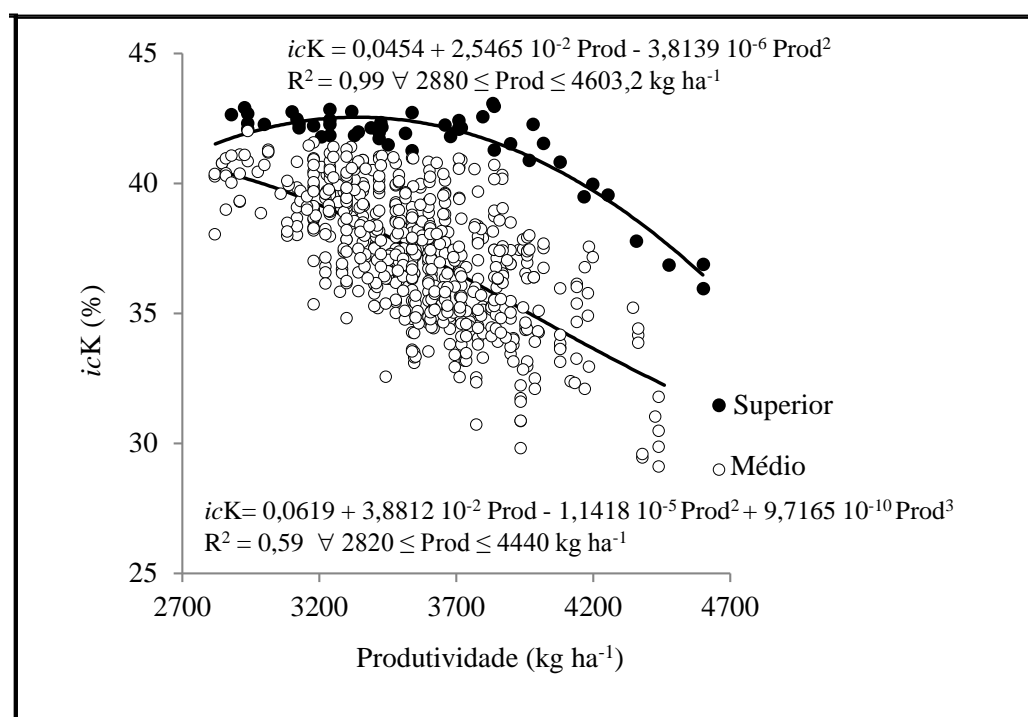


Figura 6. Índice de colheita de K (*icP,K*) obtidos por meio da subdivisão das lavouras de soja com *cubK_Pl* superior e médio.

Portanto, os restos culturais deixados nos talhões de *cubK_P1* superior foram nutricionalmente mais pobres do que aqueles provenientes dos talhões com médio *cubK_P1*. Isso ocorre devido aos menores acúmulo de K na planta toda, bem como os menores índices colheita de K obtidos nesses talhões em comparação com aqueles de *cubK_P1* superior. Desse modo, a ciclagem desse nutriente nos talhões de *cubK_P1* superior é menor do que nos de médio *cubK_P1*.

4. Conclusões

A demanda inferior de K na planta e no grão correspondeu em média de 25,15 e 11,27 kg t⁻¹ de soja produzida, respectivamente.

A diferença das medias entre as demandas medias e inferior de K na planta e no grão corresponderam, respectivamente, a 9,73 e 1,66 kg t⁻¹ de grão produzido.

Cultivares de soja com maior ciclo de maturação possuem maior eficiência de utilização de K.

5. Referências bibliográficas

ARAÚJO, A.P. & TEIXEIRA, M.G. Variabilidade dos índices de colheita de nutrientes em genótipos de feijoeiro e sua relação com a Produção de Grãos. R. Bras. Ci. Solo, 36:137-146, 2012.

ATWELL, B.J.; KRIEDEMANN, P.E. & TURNBULL C.G.N. Plants in Action: Adaptation in Nature, Performance in Cultivation. Macmillan Education AU, 1999; 664.(Livro)

BAKER, D.E.; JARREL A.E.; MARSHAL, L.E. & THOMAS, W.I. Phosphorus uptake from soils by corn hybrids selected from high and low phosphorus accumulation. Agron. J; 1970. 62:103-106.

BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F.; CARMO D.N. & NEVES JCL. Classificação nutricional de sítios florestais – Descrição de uma metodologia. Rev. Árvore. 1986; 10:106-112.

BAYUELO-JIMÉNEZ J.S. & OCHOA-CADAVID I. Phosphorus acquisition and internal utilization efficiency among maize landraces from the central Mexican highlands. Field Crops Res. 2014; 156:123-134.

BENDER, R.R.; HAEGELE, J.W. AND BELOW, F.E. Modern soybean varieties' nutrient uptake patterns. *Better Crops with Plant Food*. 2015; 99:7-10.

BRUETSCH TF & ESTES, GO. Genotype variation in nutrient uptake efficiency in corn. *Agron. J*. 1976; 68:521-523.

DIAS, H.C.T.; FIGUEIRA, M.D.; SILVEIRA, V.; FONTES, M.A.L.; de OLIVEIRA-FILHO, A.T. & SCOLFORO, J.R.S. Variação temporal de nutrientes na serapilheira de um fragmento de floresta estacional semidecidual em Lavras, Minas Gerais - Brasil. *Revista Cerne*, v.8, n.2, p. 1-16, 2002.

EPSTEIN, E. & BLOOM, A.J. *Mineral nutrition of plants: Principles and perspectives*. 2.ed. Sunderland, Sinauer Associates, 2005. 400p.

FAQUIN V. Cinética de absorção de fosfato, nutrição mineral, crescimento e produção da soja sob influência de micorriza vesículo-arbuscular (MVA). Piracicaba, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 1988. 136p. (Tese de Doutorado)

FURLANI, A.M.C.; FURLANI, P.R.; TANAKA, R.T.; MASCARENHAS, H.A.A. & DELGADO, M.D.P. Variability of Soybean germplasm in relation to phosphorus uptake and use efficiency. *Scientia Agricola*. 2002; 59:529-536.

GEMENET, D.C.; HASHB, C.T.; SANOGO, M.D.; SY, O.; ZANGREC, R.G.; LEISERA, W.L. & HAUSSMANNA, B.I.G. Phosphorus uptake and utilization efficiency in West African pearl millet inbred lines. *Field Crops Res*. 2015; 171:54-66

GOEDERT, W.J.; COREY, R.B. & SYERS, J.K. The effects on potassium equilibria in soils of Rio Grande do Sul, Brazil. *Soil Science*, v.120, p.107-111, 1975.

HEADY, E.O. & PESEK J.A. A fertilizer production surface with specification of economic optima for corn grown on calcareous Ida Silt Loam. *Journal Farm Economics*, 36:446-482, 1954.

HORST, W.J.; ABDU, M. & WIESLER, F. Genotypic differences in phosphorus efficiency of wheat. In: BARROW, N.J. (Ed.). *Plant nutrition - from genetic engineering to field practice*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. 1993. p. 367-370.

HYAMS, D.G. CurveExpert basic. Release 1.4. 2010. Disponível em <http://docs.curveexpert.net/curveexpert/basic/_static/CurveExpertBasic.pdf>. Acesso em: 13 out. 2014.

KURIHARA, CH. Demanda de nutrientes pela soja e diagnose de seu estado nutricional. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 2004. 101p. (Tese de Doutorado)

KURIHARA, C.H.; ALVAREZ V., V.H.; NEVES, J.C.L. & NOVAIS, R.F. Acúmulo de matéria seca e nutrientes em soja, como variável do potencial produtivo. Rev. Ceres. 2013; 60: 690-698.

KURIHARA, C.H.; ALVAREZ V., V.H.; NEVES, J.C.L.; NOVAIS, R.F & STAUT, L.A. Faixas de suficiência para teores foliares de nutrientes em algodão e em soja, definidas em função de índices DRIS. Rev. Ceres. 2013; 60: 412-419.

LAVIOLA, B.G.; MARTINEZ, H.E.P.; SALOMÃO, L.C.C., CRUZ, C.D. & MENDONÇA, S.M. Acúmulos de nutrientes em frutos de cafeeiro em quatro altitudes de cultivo: cálcio, magnésio e enxofre. R. Bras. Ci. Solo, 31:1451-1462, 2007

LI M.; ZHANG H.; YANG X.; GE M.; MA Q.; WEI H.; DAI Q.; HUO Z.; XU K. & LUO D. Accumulation and utilization of nitrogen, phosphorus and potassium of irrigated rice cultivars with high productivities and high N use efficiencies. Field Crops Res. 2014; 161:55-63.

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

MALAVOLTA E.; FERNANDES F.M.; CABRINI H.M.; ZANINI J.R.; DE SÁ M.E.; BARRETO M.; DO NASCIMENTO V.M.; KAMINSKI J.; URQUIAGA CABALLERO S.; GRACIOLLI L.A.; PEREZ A.L.; CAVICHIOLLI C.; JACOVO A. & MELETTI M.C. Exigências minerais comparadas de dois cultivares de soja (*Glycine Max* (L.) Merrill) Santa Rosa e UFV-1. Anais da ESALQ, 37: 463-471. 1980.

MARTINEZ, H.E.P.; NOVAIS, R.F.; SACRAMENTO, L.V.S. & RODRIGUES, L.A. Comportamento de variedades de soja cultivadas sob diferentes níveis de fósforo. II. Translocação do fósforo absorvido e eficiência nutricional. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 17, p. 239-244, 1993b.

MASCARENHAS, H.A.A.; TANAKA, R.T.; CARMELLO, Q.A.D.C.; GALLO, P.B.; & AMBROSANO, G.M.B. Calcário e potássio para a cultura de soja. *Revista Scientia Agricola*. 2000; 57:445-449.

MASCARENHAS, H.A.A. & TANAKA, R.T. Soja. In: Raij, B. van; Cantarella, H.; Quaggio, J.A.; Furlani, A.M. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agronômico, 1996. p.202-203. (Boletim Técnico, 100).

MELGES, E; LOPES, N.F. & OLIVA M.A. Crescimento, produção de matéria seca e produtividade da soja submetida a quatro níveis de radiação solar. *Pesq. Agrop. Bras.* 1989; 24: 1073-1080.

MITSCHERLICH, EA. Das Gesetz des Minimus und das Gesetz des abnehmenden Bodenertrages. *Landwirtschaftliche Jahrbucher*, 38:537-552, 1909. Germany

MORAES, E.A. Concentração, acúmulo de P, K, Ca e Mg e crescimento da soja (*Glycine max* (L.) Merrill) em diferentes estágios de desenvolvimento. Lavras, Escola Superior de Agricultura de Lavras. 1983. 139p. (Tese de Mestrado)

OLIVEIRA, F.A. de; CARMELLO, Q.A.C. & MASCARENHAS, H.A.A. Disponibilidade de potássio e suas relações com cálcio e magnésio em soja cultivada em casa de vegetação. *Scientia Agricola*,v.58, n.2, p.329-335, 2001.

PARTELLI, F.L.; ESPINDULA, M.C.; MARRÉ, W.B. & VIEIRA, H.D. Dry matter and macronutrient accumulation in fruits of Conilon coffee with different ripening cycles. *R. Bras. Ci. Solo*, 38:214-222, 2014.

POZZAN, M. & TRIBONI, H.R. Colheita e qualidade do fruto. In: MATTOS JÚNIOR, D.; DE NEGRI, J.D.; PIO, R. M.; POMPEU JÚNIOR, J. *Citros*. Campinas: Instituto Agronômico e Fundag, 2005. p. 801-822.

PRADO, R.M. *Nutrição de Plantas*. São Paulo. Editora: UNESP, 2008. 407 p.

RAIJ, B.VAN. Fertilidade do solo e adubação. Piracicaba, *Ceres*, 1991. 343p.

RAJU, P.S.; CLARK, R.B.; MAITI, R.K. & MARANVILL, J.W. Phosphorus uptake, distribution and use by glossy and nonglossy sorghum. *Journal of Plant Nutrition*, v. 10, p. 2017-2024, 1987.

SANTOS, F.C.; NEVES J.C.L.; NOVAIS R.F.; ALVAREZ V.V.H. & SEDIYAMA C.S. Modelagem da recomendação de corretivos e fertilizantes para a cultura da soja. R. Bras. Ci. Solo. 2008; 32:1661-1674.

SCHULTE, E.E. & KELLING, K.A. Crop Fertilization — Plant Analysis: a Diagnostic Tool National Corn Growers Handbook—46. Purdue University, West Lafayette, IN 47907; 2013. Accessed 4 January 2015. Disponível <https://www.extension.purdue.edu/extmedia/nch/nch-46.html>

SHATAR, T.M. & MCBRATNEY, A.B. Boundary-line analysis of field-scale yield response to soil properties. Journal of Agricultural Science, 142, 553–560, 2004.

SOUZA, R.F.; FAQUIN, V.; TORRES, P.F.R. & BALIZA, D.P. Calagem e adubação orgânica: influência na adsorção de fósforo em solos. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 30(6), p.975-983, 2006.

SOUZA, T.R.; VILLAS BOAS, R.L.; QUAGGIO, J.A. & SALOMÃO, L.C. Nutrientes na seiva de plantas cítricas fertirrigadas. Rev. Bras. Frutic. 2012; 34: 482-492.

STEENBJERG, F. Yield curves and chemical plant analyses. Journal Plant Soil. 1951; 3: 97-109.

TANAKA, R.T.; MASCARENHAS, H.A.A. Soja, nutrição, correção do solo e adubação. Campinas: Fundação Cargill, 1992. 60p. (Série Técnica, 7)

VIEIRA, RD. Avaliação do efeito de níveis de alguns nutrientes na composição química e na qualidade de sementes de soja. Viçosa, MG. Universidade Federal de Viçosa. 1985. 156p. (Tese de Doutorado)

WEBB, J.R.; OHLROGGE, J. & BARBER, S.A. The effect of magnesium upon the growth and the phosphorus content of soybean plants. Soil Sci. Soc. Proc., p.458-462. 1954.

WEBB, R.A. Use of the Boundary Line in the analysis of biological data. Journal of Horticultural Science, 47, p. 309–319, 1972.

WIENEKE, J. Phosphorus efficiency and phosphorus remobilization in two sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) cultivars. Plant and Soil, v. 123, p. 139-145, 1990.

Capítulo 3 - Níveis críticos de P e K nos solos com base no requerimento e na eficiência nutricional das lavouras de soja do Brasil Central

Resumo

Tradicionalmente, a adubação é formulada a partir de níveis críticos obtidos por meio de ensaios de calibração, nas condições de campo. Esses experimentos de calibração demandam tempo e recursos financeiros. No Brasil, costuma-se obter os níveis críticos dos nutrientes no solo com base em 90 % da máxima produtividade. Entretanto, os níveis críticos variam em função: dos preços dos insumos, do produto comercializado, dos modelos estatísticos utilizados na calibração, da eficiência nutricional da planta e outras condições. Desse modo, o presente trabalho tem como objetivo determinar os níveis críticos de P e K dos solos do Brasil Central, obtidos com base na modelagem do requerimento de P e de K pela soja e compará-las aos níveis críticos obtidos por meio de diferentes métodos de determinação da produtividade de máxima eficiência econômica, para lavouras de soja com eficiência nutricional superior e média. Os requerimentos de P e K para cada produtividade de soja, foram obtidos por simulação. Para isso, foram consideradas as produtividades (2900 a 4440 kg ha⁻¹), as condições de lavouras com coeficiente de utilização biológico de P e K superior e médio na planta e diferentes capacidades tampão dos solos (37,7 a 5,9 mg L⁻¹ de P remanescente). Os lucros para cada produtividade almejada foram estimados a partir das produtividades, das doses de P e K requeridas para cada produtividade, dos preços médios de insumo e produto, praticados, em 2014 e 2015, na região Central do Brasil. Para estimativa da produtividade de máxima eficiência econômica foram utilizados quatro métodos de determinação do nível crítico. O método 1 consiste em obter a produtividade de máxima eficiência econômica a partir da equação do lucro em função da produtividade, igualando-se a derivada da função a zero. No método 2 a produtividade de máxima eficiência econômica foi calculada igualando a primeira derivada das regressões ajustadas entre a produtividade de soja em função das doses de P requeridas à razão de preços de P (P₂O₅) e da soja (R\$ kg⁻¹). No método 2 também foram realizados esses mesmos procedimentos para se obter as produtividades de máxima eficiência econômica associadas às doses de K requeridas. Dessa forma, as produtividades de máxima eficiência econômica obtidas no método 2 corresponderam à média das produtividades de máxima eficiência econômica associadas às doses de P e K requeridas. A produtividade de máxima eficiência econômica do método 3 correspondeu a 90 % da máxima produtividade (4440 kg ha⁻¹). O método 4 corresponde ao método iterativo de

Cate e Nelson, por meio desse método também foi calculada a produtividade de máxima eficiência econômica. As produtividades de máxima eficiência econômica de cada método foram inseridas como dados de entrada para cálculo: das doses requeridas de P e K de máxima eficiência econômica e o lucro de máxima eficiência econômica. Os níveis críticos de P e K do solo, para cultura da soja, foram obtidos por meio da multiplicação das doses requeridas de P e K de máxima eficiência econômica com as, respectivamente, taxas de recuperação de P (para extrator Mehlich-1 e resina mista) e K (para extrator Mehlich-1) do solo. Os níveis críticos de P e K dos solos, estimados em cada método, para cultura da soja, foram comparados com os observados na literatura. A modelagem do requerimento de P e K pode ser utilizada para obter os níveis críticos de P e K no solo para lavouras de soja de maior e média eficiência nutricional do Brasil Central. Os níveis críticos de P e K no solo, obtidos com método 1 foram os que com maior frequência se relacionaram com os maiores lucros, para as condições de lavouras de soja com eficiência superior e média no uso de P e K, da região Central do Brasil.

Termos de indexação: Demanda de P e K na planta e no grão; produtividade de máxima eficiência econômica; recomendação de fertilizantes.

Chapter 3 - Critical levels of P and K in soil based on the requirement and nutritional efficiency of soybean crops in Central Brazil

Abstract

Traditionally, the fertilization is determined by calibrations tests in field conditions. These calibration experiments require time and financial resources. In Brazil, it is used to obtain the critical levels of nutrients in the soil based on 90% of the maximum productivity. However, critical levels changes in function of prices of inputs, the marketed product, the statistical models used in the calibration, the nutritional efficiency of the plant and other conditions. Thus, this study aims to determine and compare the critical concentration of P and K of Central Brazil soils, obtained based on the modeling of nutrient required by soybean and through different methods of determining the maximum economic yield for soybeans crops with maximum and medium nutritional efficiency. The calculation of the requirement of P and K, for the soybean crop was obtained by simulation. For this, we considered the yields (2900 to 4440 kg ha⁻¹), the conditions of crops with higher and medium biological utilization coefficient of P and K in the plant and the different soil buffer capacity (37.7 to 5.9 mg L⁻¹ remaining P). Profits for each desired yield were estimated from the yield, the doses of P and K requirements, the median prices of inputs and product, carried out in 2014 and 2015 in the region Central Brazil. To estimate the maximum economic yield were used four methods of determining the critical level. Method 1 is to achieve the maximum economic yield from the profit equation in functional of yield, equating the derivative of the function to zero. In the method 2 the maximum economic yield was calculated by equating the first derivative of the regressions adjusted between function in soybean yield of P doses required at a ratio of P (P₂O₅) and soybean prices (R \$ kg⁻¹). These same procedures to obtain the maximum economic yield efficiency associated with K levels required in Method 2 were also performed. Thus, the maximum economic yield obtained in Method 2 corresponded to the mean of the maximum economic yield associated with doses of P and K required. The maximum economic yield of the method 3 corresponds to 90% of maximum yield (4440 kg ha⁻¹). Method 4 is the iterative method of Cate and Nelson, through this method was also calculated the maximum economic yield. The maximum economic yield of each method were used as input data to calculate: maximum economic required doses of P and K and maximum profit. The critical concentration of P and K in the soil for soybean was obtained by multiplying maximum economic required doses of P and K with the, respectively, extractor recovery rates of P and K of the soil. The critical concentration of

P and K in the soil, estimated in each method for soybean was compared with those observed in the literature. The requirement modeling of P and K can be used to obtain the critical concentration of P and K in the soil for soybean crops with maximum and medium nutritional efficiency of the central of Brazil. The critical levels of P and K in the soil , obtained with method 1 were the most frequently related with higher profits for the conditions of soybean crops with higher efficiency and average use of P and K , Brazil's Central region.

Tabela de abreviações e seus significados

Abreviações	Significado
$c_{med}P,K_{PI}$	Conteúdo médio de P e K na planta
$c_{min}P,K_{PI}$	Conteúdo mínimo de P e K na planta
cNu_i_{PI}	Conteúdo dos nutrientes em toda a planta
cP,K_{PI}	Conteúdo de P e K na planta
$cubP,K_{PI,Gr}$	Coefficiente de utilização biológico do P e do K na planta e no grão
ctF	Custo variável com fertilizante
drK	Dose de requerimento de K
drP	Dose de requerimento de P
drP,K_{MEE}	Doses dos requerimentos de P e K de máxima eficiência econômica
fc	Fator de conversão
lc	Lucro
mMS_{Gr}	Massa de matéria seca dos grãos
mMS_{PA}	Massa de matéria seca da parte aérea da planta
mMS_{PI}	Massa de matéria seca da planta
ncK_{SI}	Nível crítico de K no solo
ncP_{SI}	Nível crítico de P no solo
p	Produtividade
peK	Preço médio de K_2O
peP	Preço médio de P_2O_5
$peSJ$	Preço médio de soja
$pMÁX$	Produtividade máxima
$pMEE$	Produtividade de máxima eficiência econômica
$pMEE_{drK}$	Produtividade de máxima eficiência econômica associadas às doses do requerimento de K
$pMEE_{drP}$	Produtividade de máxima eficiência econômica associadas às doses do requerimento de P
$prMEE$	Produtividade relativa de máxima eficiência econômica
pSJ	Produtividade de soja
$p\bar{Y}_{MEE}$	Produtividade média de máxima eficiência econômica
rNu_i	Requerimento de nutrientes pela planta
SQ	Soma de quadrados
trP,K_{Ex}	Taxa de recuperação de P e K pelo extrator
$trNu_i_{PI}$	taxa de recuperação dos nutrientes pela planta

1.Introdução

O Brasil é o segundo maior exportador e produtor de soja (*Glycine max* L. Merrill) no mundo (MAPA, 2014), sendo maior parte dela produzida na região central do país (CONAB, 2016). Nessa região, predominam solos de Cerrado, ácidos e de baixa fertilidade natural (Sousa & Lobato, 2002). Para isto, foram necessários programas adequados de correção e adubação do solo para a expansão do uso dessas áreas, mas quais o manejo de corretivos e fertilizantes tem contribuído em 40 % para o aumento da produtividade agrícola (Haas, 1997).

Tradicionalmente, a adubação é formulada a partir de níveis críticos obtidos por meio de ensaios de calibração nas condições de campo. Segundo, Cate e Nelson (1971) o nível crítico é o teor de um nutriente no solo ou na planta que separa populações de alta probabilidade de resposta à adubação daquelas de baixa probabilidade. O nível crítico também pode ser definido como o teor de nutriente no solo necessário para obtenção da produtividade de máxima eficiência econômica (*p*MEE), quando os nutrientes e outros fatores de produção estão em níveis adequados (Alvarez V., 1996).

Os níveis críticos são utilizados em tabelas de recomendações de corretivos e fertilizantes de vários Estados ou regiões (Raij et al., 1996; Tomé Jr., 1997; Ribeiro et al., 1999; Embrapa, 2002; CQFSRS/ SC, 2004). Entretanto, as tabelas de recomendação podem estar desatualizadas. Pois, foram obtidas por meio de trabalhos de calibração realizados com cultivares de soja mais antiga, que em geral, possuem menor potencial produtivo que as utilizadas atualmente. Também podem ser citados outros aspectos limitantes quanto ao uso dessas tabelas de recomendação como: sua aplicação regionalizada, mesmo quando não há diferenças edafoclimáticas entre alguns limites geográficos; a desconsideração da variação das demandas nutricionais das plantas em função da produtividade; o uso de faixas de níveis críticos de nutrientes no solo (valores descontínuos) e não de valores contínuos; e doses de recomendação fixas para determinadas faixas de produtividade, quando consideradas (Santos et al., 2008).

Além disso, os níveis críticos dos nutrientes do solo os quais estão presentes nas tabelas de recomendação para a cultura da soja foram obtidos com base em fertilizações associadas a 90 % da máxima produtividade obtida nas condições de campo. Entretanto, os níveis críticos variam em função do clima (Mallarino & Blackmer, 1992), cultivares, modelos matemáticos utilizados para o cálculo (Coelho et al., 2013), com a eficiência nutricional da planta (Silva et al., 2002), os preços da soja e dos insumos agrícolas

(Maro et al., 2014) entre outras condições. O que impossibilita a utilização de um nível crítico universal.

A partir de um banco de dados referente às lavouras de soja comerciais que foram cultivadas nas safaras de 98/99 a 03/04 na região Central do Brasil foi possível obter modelos que estimam os valores superiores e médios dos coeficientes de utilização biológico da planta para P e K ($cubP, K_{PI}$) os quais foram apresentados, respectivamente, nos capítulos 1 e 2. A partir desses modelos foram estimadas as demandas inferiores e médias de P e K na planta em função da produtividade as quais também foram apresentadas nos capítulos 1 e 2, respectivamente. Isso significa que lavouras de soja com produtividades equivalentes podem extrair diferentes quantidades de P e K. Essas diferenças, provavelmente, podem resultar em diferentes níveis críticos de P e K no solo entre as lavouras comerciais de soja com maior e menor extração de P e K na planta (cP, K_{PI}). Entretanto, essas diferenças não são consideradas nas tabelas de recomendação de fertilizantes.

Souza et al., 2014 obtiveram níveis críticos para atributos químicos do solo por meio da distribuição normal reduzida em áreas de agricultura familiar de subsistência, no semiárido brasileiro, cultivadas com feijão-caupi e milho. Já Santos et al., 2008 obtiveram um modelo alternativo de recomendação de doses de corretivos e fertilizantes para a cultura da soja tomando-se como base o equilíbrio entre o requerimento de nutrientes pela planta e os seus suprimentos pelo solo. Esses trabalhos foram realizados sem a necessidade de ensaios de calibração, o que contribui para economia de tempo e de recursos financeiros. Dessa forma, seria de grande importância utilizar a modelagem do requerimento nutricional para obter níveis críticos dos nutrientes no solo sem a necessidade de ensaios de calibração, no campo.

Esse trabalho tem como objetivo determinar os níveis críticos de P e K dos solos do Brasil Central, obtidos com base na modelagem do nutriente requerido pela soja e compará-los com os níveis críticos obtidos por meio de diferentes métodos de determinação da produtividade de máxima eficiência econômica ($pMEE$), para lavouras de soja com eficiência nutricional superior e média.

2. Material e Métodos

2.1. O modelo utilizado para calcular o requerimento de P e K para cultura da soja

O requerimento de nutrientes pela planta (rNu_i_{PI}) pode ser definido como demanda de nutrientes em toda a planta (dNu_i_{PI}), corrigida pela taxa de recuperação desses nutrientes pela planta ($trNu_i_{PI}$):

$$rNu_i = dNu_i_{PI} / trNu_i_{PI}.$$

2.2.1. Modelos utilizados para calcular as demandas inferiores e médias de P e K em lavouras de soja da região Central do Brasil

Para calcular as demandas de P e K para cultura da soja utilizou-se inicialmente os modelos matemáticos desenvolvidos por Kurihara et al. (2013) para estimar a produção de matéria seca da parte aérea da planta (mMS_{PA} , em $t\ ha^{-1}$) no estágio de desenvolvimento R6 em função do rendimento de grão (p em $t\ ha^{-1}$) (Eq. 1).

$$mMS_{PA} = 0,717 e^{0,611**p} \quad R^2 = 0,75 \quad \text{Eq. 1}$$

Em que: mMS_{PA} : massa de matéria seca da parte aérea da planta ($t\ ha^{-1}$); p : produtividade das lavouras de soja ($kg\ ha^{-1}$)

Em seguida, a massa de matéria seca dos grãos (mMS_{Gr}) foi determinada considerando-se a produtividade de grãos com $130\ g\ kg^{-1}$ de umidade (p ; $kg\ ha^{-1}$).

$$mMS_{Gr} = p\ 0,87 \quad \text{Eq. 2}$$

Em que: mMS_{Gr} : massa de matéria seca do grão de soja ($kg\ ha^{-1}$)

Os modelos de Kurihara et al. (2013) não consideraram a produção de matéria seca das raízes. Para preencher esta falta de informação, foi considerado que a massa de matéria seca do sistema radicular corresponde, em média, a 18 % da máxima produção acumulada da parte aérea (Webb et al., 1954; Moraes, 1983; Vieira, 1985; Melges et al., 1989). Por meio, dessa relação e a adição da mMS_{Gr} foram obtidas a produção de massa de matéria seca da planta mMS_{PI} ($kg\ ha^{-1}$), conforme apresentado na Eq. 3.

$$mMS_{PI} = (mMS_{PA} 1\ 000 + mMS_{Gr}) 1,18 \quad \text{Eq. 3}$$

Em que: mMS_{PI} : massa de matéria seca da planta ($kg\ ha^{-1}$);
 mMS_{PA} : massa de matéria seca da parte aérea ($t\ ha^{-1}$);
 mMS_{Gr} : massa de matéria seca do grão de soja ($kg\ ha^{-1}$)

As demandas inferiores e médias de P e K das lavouras de soja, da região central do Brasil, foram estimados conforme as equações 4 e 5, respectivamente.

$$d_{inf_P,K_Pl} = mMS_Pl / cubP,K_Pl \text{ superior} \quad \text{Eq. 4}$$

$$d_{med_P,K_Pl} = mMS_Pl / cubP,K_Pl \text{ médio} \quad \text{Eq. 5}$$

Em que: d_{inf_P,K_Pl} : demanda inferior de P e K na planta (kg ha⁻¹); d_{med_P,K_Pl} : demanda média de P e K na planta (kg ha⁻¹); mMS_Pl : massa de matéria seca da planta (kg ha⁻¹); $cubP,K_Pl$: coeficiente de utilização biológico de P e K na planta (kg kg⁻¹)

Os modelos de $cubP,K_Pl$ superior e médio foram desenvolvidos, no capítulo 1, por meio de banco de dados referente à lavouras de soja, da região central do Brasil. Segue abaixo, os modelos de $cubP,K_Pl$ superior e médio utilizados para estimar as demanda inferiores e médias de P e K das lavouras de soja, em função da produtividade esperada:

$$\begin{aligned} cubP_Pl \text{ superior} &= -0,6728 - 0,1414 p + 1,6225 \cdot 10^{-4} p^2 - 2,5802 \cdot 10^{-8} p^3; \quad R^2 = 0,89; \forall 2\,820 \leq p \leq 4\,440 \text{ kg ha}^{-1} \\ cubP_Pl \text{ médio} &= -1,0782 + 0,1422 p - 1,6815 \cdot 10^{-5} p^2; \quad R^2 = 0,17; \forall 2\,820 \leq p \leq 4\,440 \text{ kg ha}^{-1} \\ cubK_Pl \text{ superior} &= 0,2564 - 6,4182 \cdot 10^{-2} p + 5,1222 \cdot 10^{-5} p^2 - 6,6068 \cdot 10^{-9} p^3; \quad R^2 = 0,97; \forall 2\,880 \leq p \leq 4\,603 \text{ kg ha}^{-1} \\ cubK_Pl \text{ médio} &= -1,8077 + 3,5998 \cdot 10^{-2} p - 2,7660 \cdot 10^{-6} p^2; \quad R^2 = 0,26; \forall 2\,820 \leq p \leq 4\,440 \text{ kg ha}^{-1} \end{aligned}$$

Em que: $cubP_Pl$: coeficiente de utilização biológico de P na planta (kg kg⁻¹); $cubK_Pl$: coeficiente de utilização biológico de K na planta (kg kg⁻¹); p : produtividade de grão de soja (kg ha⁻¹)

2.2.2. Taxas de recuperação utilizadas para calcular os requerimentos inferiores e médios de P e K em lavouras de soja da região Central do Brasil

Para calcular as doses inferiores (lavouras em condição de $cubP,K_Pl$ superior) e médias (lavouras em condição de $cubP,K_Pl$ médio) de P e K requerida pelas lavouras de soja da região Central do Brasil foram utilizadas as taxas de recuperação de P e K (trP,K_Pl) desenvolvidas por Santos et al. (2008) para cultura da soja (Eq. 6 e 7).

$$trP_Pl = 4,508 e^{0,0347 Prem} \quad R^2 = 0,837 \quad \forall 2,6 \leq P \text{ rem} \leq 40,2 \quad \text{Eq. 6}$$

$$trK_Pl = 87,506 e^{-0,044 dK_Pl} \quad R^2 = 0,998 \quad \forall 33 \leq P \text{ rem} \leq 200 \quad \text{Eq. 7}$$

Em que: trP_Pl : taxa de recuperação de P pela planta (%); $P \text{ rem}$: P remanescente (mg L⁻¹); trK_Pl : taxa de recuperação de K pela planta (%); dK_Pl : demanda de K na planta (kg ha⁻¹)

A taxa de recuperação de P na planta (trP_Pl) foi multiplicada por um fator de conversão (fc), desenvolvido por Santos et al. (2008). Esse fator foi utilizado nos modelos de recomendação de corretivos e fertilizantes Ferticalc Soja. Nesse modelo de recomendação o fc é utilizado para converter a trP_Pl a partir das dose de P recomendadas a lançar para doses de P recomendadas no sulco de plantio na camada de 0–20 cm:

$$f_c = 4,2-0,04 \text{ Prem}$$

2.3. Estimativa da produtividade e da dose de requerimento de P e K de máxima eficiência econômica e do nível crítico de P e K por Mehlich-1 no solo, para cultura da soja na região Central do Brasil

As produtividades de máxima eficiência econômica para cultura da soja da região Central do Brasil foram estimadas a partir de simulações. Nessas simulações foram calculadas as doses de P e K requeridas para as seguintes produtividades do grão de soja: 2900; 3000; 3100; 3200; 3300; 3400; 3500; 3600; 3700; 3800; 3900; 4000; 4100; 4200; 4300; 4400 e 4440 kg ha⁻¹ nas condições de *cubP,K_Pl* superior e médio. Também foram considerados nos cálculos das doses de P e K requeridas (requerimento de P e K) pela cultura da soja os seguintes atributos do solo: textura arenosa (37,7 mg L⁻¹ de P rem), média (25,7 mg L⁻¹ de P rem), argilosa (16,2 mg L⁻¹ de P rem) e muito argilosa (5,9 mg L⁻¹ de P rem). Em seguida, foram aplicados, para cada condição de solo e de *cubP,K_Pl* superior e médio, diferentes métodos de determinação das produtividades de máxima eficiência econômica (*pMEE*) em função das doses requeridas de P e K. Entretanto, por meio desses métodos foi possível estimar uma única *pMEE*, tanto em função das doses de P como de K requeridas pelas plantas. A partir dessa *pMEE* obtida em cada método de determinação da *pMEE* foram calculadas as doses requeridas de máxima eficiência econômica de P e K e os níveis críticos desses nutrientes no solo.

2.3.1. Método de determinação da produtividade de máxima eficiência econômica 1

Para estimativa da *pMEE*, pelo método 1, foram utilizadas as doses requerimento de P e K calculadas para cada produtividade de soja apresentada no item 2.3. As doses de requerimento de P e K (requerimento de P e K) também foram calculadas para as condições de *cubP,K_Pl* superior e médio e para as diferentes classes texturais do solo apresentadas no item 2.3. Foram calculados os custos variáveis com fertilizante para cada produtividade almejada (apresentado no anexo 1) conforme equação 8. Nesses cálculos os outros custos de produção (defensivos agrícolas, mão-de-obra e etc) foram considerados fixos conforme Grimm, 1970 e Carmona et al., 2009. Os custos fixos (R\$ ha⁻¹) foram obtidos pela somada das despesas com mão de obra, operação com máquinas agrícolas, defensivos agrícolas, sementes, corretivos agrícolas,

fertilizantes com exceção dos fertilizantes fosfatados e potássicos, assistência técnica, impostos e outras despesas. Todos esses custos foram obtidos pelo Instituto Mato-Grossense de Economia Agropecuária (IMEA, 2016) e foram referentes a média dos custos fixos dos meses de junho a agosto de 2014 (1543,39 R\$ ha⁻¹).

$$ctP = drP peP + drK peK + ctFX \quad \text{Eq. 8.}$$

Em que: *ctP*: custo de produção (R\$ ha⁻¹); *drP*: Dose de P requerida para determinada produtividade (kg ha⁻¹ de P₂O₅); *peP*: preço médio de P₂O₅ (R\$ kg⁻¹; apresentado no item 1 do anexo); *drK*: dose de K requerida para determinada produtividade (kg ha⁻¹ de K₂O); *peK*: preço médio de K₂O (R\$ kg⁻¹; apresentado no item 1 do anexo); *ctFX*: custos fixos de produção de soja (R\$ ha⁻¹).

Foram calculadas as receitas brutas para cada produtividade almejada e cada classe textural de solo, nas condições de *cubP,K_Pl* superior e médio (Eq. 9).

$$rB = pSJ peSJ \quad \text{Eq. 9}$$

Em que: *rB*: receita bruta (R\$ ha⁻¹); *pSJ*: produtividade de soja (kg ha⁻¹); *peSJ*: preço médio da soja (R\$ kg⁻¹; anexo 1);

Em seguida, foram calculados os lucros para cada produtividade almejada e cada classe textural de solo, nas condições de *cubP,K_Pl* superior e médio (Eq. 10).

$$lc = rB - ctP \quad \text{Eq. 10}$$

Em que: *lc*: lucro (R\$ ha⁻¹); *rB*: receita bruta (R\$ ha⁻¹); *ctP*: Custo de produção (R\$ ha⁻¹).

Com o auxílio do aplicativo “Curve Expert 1.4” (Hyams, 2010) foram ajustados os modelos relacionando os lucros (*lc*) em função das produtividades de soja (*pSJ*) apresentadas no item 2.3. Esses modelos foram ajustados para as condições de *cubP,K_Pl* superior e médio e para cada classe textural do solo apresentados no item 2.3. Dentre os modelos obtidos pelo aplicativo, foram selecionados aqueles com menor erro padrão (EP) e maior coeficiente de determinação (R²). Para estimar a *pMEE*, igualou-se a zero a primeira derivada dos modelos ajustados entre lucro, em função das produtividades de soja ($dL/dY = 0$). Por meio da *pMEE* foram calculadas as produtividades relativas de máxima eficiência econômica (*prMEE*):

$$prMEE = (pMEE / pMÁX) 100$$

Em que: *prMEE*: Produtividade relativa de máxima eficiência econômica (%); *pMEE*: Produtividade de máxima eficiência econômica (kg ha⁻¹); *pMÁX*: Produtividade máxima de soja (4440 kg ha⁻¹)

A partir da *pMEE*, de cada classe textural do solo e condições de *cubP,K_Pl* superior e médio foram calculadas as doses dos requerimentos de P e K de máxima eficiência econômica (*drP,K_MEE*), para cultura da soja da região Central do Brasil.

Em seguida, foram utilizados as drP,K_MEE e as taxas de recuperação de P e K pelo extrator (trP,K_Ex) para estimar os níveis críticos de P e K por M1 em cada classe textural do solo e condições de $cubP,K_Pl$ superior e médio das lavouras de soja do Brasil Central (Eq. 11 e 12).

$$ncP_Sl = (drP_MEE) [(trP_Ex)/pER/10] \quad \text{Eq. 11}$$

$$ncK_Sl = (drK_MEE) [(trK_Ex)/pER/10] \quad \text{Eq. 12}$$

Em que: ncP_Sl : estimativa de nível crítico de P M1 no solo ($mg\ dm^{-3}$); drP_MEE : dose do requerimento de P de máxima eficiência econômica ($kg\ ha^{-1}$); trP_Ex : taxa de recuperação de P pelo extrator ($mg\ dm^{-3}/mg\ dm^{-3}$); pER : profundidade efetiva de raiz (20 cm); ncK_Sl : estimativa de nível crítico de K no solo ($mg\ dm^{-3}$); drK_MEE : dose do requerimento de K de máxima eficiência econômica ($kg\ ha^{-1}$); trK_Ex : taxa de recuperação de K pelo extrator ($mg\ dm^{-3}/mg\ dm^{-3}$)

As taxas de recuperação de P e K pelo extrator foram desenvolvida por Santos et al. (2008) e podem ser observadas no item 2 em anexo.

2.3.2. Método de determinação da produtividade de máxima eficiência econômica 2

Para estimativa da $pMEE$, pelo método 2, foram utilizadas as doses requerimento de P e K calculadas para cada produtividade de soja apresentada no item 2.3. As doses de requerimento de P e K também foram calculadas para as condições de $cubP,K_Pl$ superior e médio e para as diferentes classes texturais do solo apresentadas no item 2.3.

Em seguida, com o auxílio do aplicativo “Curve Expert 1.4” (Hyams, 2010) foram ajustados para cada classe textural do solo (apresentados no item 2.3) e condições de $cubP_Pl$ superior e médio, modelos relacionando as produtividades de soja ($kg\ ha^{-1}$) em função das doses de requerimento de P ($kg\ ha^{-1}$ de P_2O_5). Também foi utilizado o aplicativo “Curve Expert 1.4” para ajustar modelos entre a relação das produtividades de soja em função das doses de requerimento de K ($kg\ ha^{-1}$ de K_2O). Esses modelos foram ajustados para cada classe textural do solo (apresentados no item 2.3) e condições de $cubK_Pl$ superior e médio. Dentre esses modelos obtidos por esse aplicativo, foram selecionados aqueles com menor erro padrão (EP) e maior coeficiente de determinação (R^2). Para obter a $pMEE$, igualou-se a primeira derivada dos modelos ajustados entre a produtividade de soja em função das doses do requerimento de P ($kg\ ha^{-1}$ de P_2O_5) à relação de preços do P_2O_5 e da soja (Eq. 13). Também foram realizados esses mesmos procedimentos para calcular as $pMEE$ associadas às doses do requerimento de K ($kg\ ha^{-1}$

de K₂O), para cada condição de eficiência nutricional das lavouras de soja e classe textural do solo (Eq. 14).

$$d\bar{Y}/dP = peP/peSJ \quad \text{Eq. 13}$$

$$d\bar{Y}/dK = peK/peSJ \quad \text{Eq. 14}$$

Em que: *peP*: preços médios de P₂O₅ obtidos no item 2.1 (R\$ kg⁻¹);
peK: preço médios de K₂O obtidos no item 2.1 (R\$ kg⁻¹); *peSJ*:
 preço médios da soja (R\$ kg⁻¹) obtidos no item 2.1

Foi calculada a média entre as *pMEE* associadas às doses do requerimento de P e K (Eq. 15) para cada classe textural do solo. A média da *pMEE* associadas às doses do requerimento de P e K também foram obtidas para cada condição de *cubP,K_PI* superior e médio (mencionados no item 2.3).

$$p\bar{Y}_{MEE} = pMEE_P + pMEE_K/2 \quad \text{Eq. 15}$$

Em que: *p \bar{Y} _{MEE}*: produtividade média de máxima eficiência econômica;
pMEE_{drP}: produtividade de máxima eficiência econômica associadas às doses do requerimento de P; *pMEE_{drK}*: produtividade de máxima eficiência econômica associadas às doses do requerimento de K

A produtividade média de máxima eficiência econômica (*p \bar{Y} _{MEE}*) foi utilizada no cálculo da *prMEE*, conforme apresentado no item 2.3.1. Embora, nesse item tenha sido utilizado a *pMEE* ao invés de *p \bar{Y} _{MEE}* para o cálculo da *prMEE*. A partir, da *p \bar{Y} _{MEE}*, de cada classe textural do solo e condições de lavoura de soja com *cubP,K_PI,Gr* superior e médio, foram calculadas as *drP,K_MEE*, para cultura da soja da região Central do Brasil. Também foram utilizados as *drP,K_MEE* e as *trP,K_Ex* para estimar os níveis críticos de P e K M1 em cada classe textural do solo e nas condições de *cubP,K_PI* superior e médio das lavouras de soja, conforme demonstrado nas Eq. 11 e 12 do item 2.3.1.

2.3.3. Método de determinação da produtividade de máxima eficiência econômica 3

No método 3 foi considerado que a *pMEE* corresponde a 90 % da máxima produtividade (4440 kg ha⁻¹) utilizada no item 2.3.

A partir, da *pMEE*, de cada classe textural do solo e condições de *cubP,K_PI* superior e médio foram calculadas as *drP,K_MEE*, para cultura da soja da região Central do Brasil. Também foram utilizados as *drP,K_MEE* e as *trP,K_Ex* para estimar os níveis críticos de P e K M1 em cada classe textural do solo e nas condições de *cubP,K_PI* superior e médio das lavouras de soja, conforme demonstrado nas Eq. 11 e 12 do item 2.3.1.

2.3.4. Método de determinação da produtividade de máxima eficiência econômica 4

O método 4 corresponde ao método iterativo de Cate e Nelson (1971). Para estimativa da $pMEE$, pelo método 4, foram utilizadas as doses requerimento de P e K calculadas para cada produtividade de soja apresentada no item 2.3. As doses de requerimento de P e K também foram calculadas para as condições de $cubP,K_{PI}$ superior e médio e para as diferentes classes texturais do solo apresentadas no item 2.3.

Em seguida, foram estimados, para cada produtividade, classe textural do solo e condições de $cubP,K_{PI}$ superior e médio os teores de P e K Mehlich-1 (M1) no solo conforme apresentado nas equações 11 e 12 do item 2.3.1. Posteriormente, aplicou-se o processo iterativo de Cate e Nelson (1971). Entretanto, para obtenção da $pMEE$, de cada classe textural do solo e condição de $cubP,K_{PI}$, foi obtida a média entre a produtividade da última amostra da população A e o da primeira amostra da população B, para o maior R^2 (Eq. 16) indicado por Braga (1974).

$$R^2 = (SQ_{Total} - SQ_{Pop.A} - SQ_{Pop.B}) / SQ_{Total} \quad \text{Eq. 16}$$

Em que: SQ: Soma dos quadrados

A partir, da $pMEE$, de cada classe textural do solo e condições de maior e médio $cubP,K_{PI}$, foram calculadas as drP,K_{MEE} , para cultura da soja da região Central do Brasil. Também foram utilizados as drP,K_{MEE} e as trP,K_{Ex} para estimar os níveis críticos de P e K por M1 em cada classe textural do solo e nas condições de maior e médio $cubP,K_{PI}$ das lavouras de soja da região Central do Brasil, conforme demonstrado nas Eq. 11 e 12 do item 2.3.1.

2.4. Estimativa dos níveis críticos de P resina no solo, para a cultura da soja na região Central do Brasil

Para estimativa dos níveis críticos de P resina no solo, para cultura da soja, foi utilizado um banco de dados de um laboratório particular, que contem os resultados de análises químicas e físicas de solos do Estado do Mato Grosso do Sul (MS), no ano de 2010. Desse banco de dados foram selecionadas 372 resultados de análise de solo, coletados no MS na camada de 0 a 20 cm. Esses resultados de análise de solos continham os teores de P resina (mista), P por M1 e de argila do solo. Com os resultados desses atributos do solo foi obtido, por meio de regressão múltipla, um modelo que estima P resina do solo em função dos teores de P M1 e de argila dos solos.

Dessa forma, por meio desse modelo preditivo foram estimados os níveis críticos de P resina em função dos níveis críticos de P M1 e do teor de argila de cada classe textural do solo, utilizado nessa simulação.

2.5. Comparação entre os níveis críticos estimados e observados na literatura

Os níveis críticos de P (M1 e resina) e K (M1) estimados em cada método de determinação da produtividade de máxima eficiência econômica foram comparados, respectivamente, com os níveis críticos de P (M1 e resina) e K (M1) observados na literatura.

3. Resultados e Discussão

3.1. Método de determinação da produtividade de máxima eficiência econômica 1

No método de determinação da produtividade de máxima eficiência econômica 1 foi observado em todos os solos com diferentes texturas que o aumento da produtividade proporcionou em um primeiro momento aumento dos lucros até atingir a $pMEE$ (Figura 1). Em seguida, os lucros decresceram (Figura 1), isso ocorreu, pois essa simulação está de acordo com a lei dos rendimentos marginais decrescentes proposta por Mitscherlich, 1909. Esses resultados diferem das doses de requerimento obtidas por Santos et al. (2008) pelo modelo Ferticalc Soja. Nesse modelo as doses requeridas de P e K aumentaram linearmente com produtividade de soja esperada.

Nas condições de lavouras de soja com $cubP,K_{PI}$ superior foram obtidos os maiores lucros (Figura 1). Isso ocorreu, pois, as plantas que produzem sob maior eficiência nutricional, $cubP,K_{PI}$ superior, possuem menor demanda por esses recursos (Mosier et al., 2004), o que resulta em diminuição dos custos com fertilizantes e consequente aumento dos lucros (Gehl et al., 2005).

Nos solos mais arenosos os lucros obtidos para cada produtividade foram maiores do que nos solos com maior teor de argila (Figura 1). Isso ocorreu, pois, nos solos mais arenosos há maior difusão de P (Villani et al., 1993) e menor formação de formas de P não-lábeis (Gonçalves et al., 1989). Enquanto, nos solos mais argilosos, mais tamponados, apesar da maior resistência às perdas de suas reservas de nutrientes, esses solos mais argilosos também resistiriam mais ao incremento de P (Novais, 1996). Dessa forma, nos solos mais argilosos o dreno-solo é maior em relação ao dreno-planta

e por isso é necessário aplicar maiores doses de P nesses solos (Santos et al., 2008). Portanto, a necessidade de aplicação de doses mais elevadas de P nos solos mais argilosos acabam por aumentar os custos de produção, o que resultaria em menores lucros. A necessidade de aplicação de elevadas doses de P nos solos mais argilosos (Figura 1, D) contribuiu para que as lavouras com *cubP,K_Pl* médio (lavouras com maior exigência de P e K) apresentassem lucros negativos quando as produtividades de soja foram menores que 3500 kg ha⁻¹ e maiores que 4000 kg ha⁻¹. Isso não significa necessariamente que produtores que produzem abaixo de 3500 kg ha⁻¹ e acima de 4000 kg ha⁻¹ devem obter lucros negativos. Deve-se ressaltar que nessas simulações foi considerado que esses solos possuíam teor de P e K Melich-1 igual a zero. Pois, nessas simulações os cálculos dessas doses foram obtidos considerando-se apenas o requerimento de P e K pela planta enquanto a fertilidade do solo foi desconsiderada. Logo, as doses de P e K requeridas pela planta devem estar superestimadas quando comparado com as doses de recomendação de P e K obtidas por tabelas de recomendação ou modelos de recomendação de fertilizantes como o Ferticalc-Soja. Esse modelo de recomendação de corretivos e fertilizantes calcula a dose de P e K para determinada produtividade de soja almejada a partir da diferença entre a dose requerida de nutrientes pela planta e o suprimento de nutrientes pelo solo. Portanto, a desconsideração do suprimento de P e K pelo solo, nesse trabalho, resultou em doses elevadas de P e K, principalmente nas lavouras de médio *cubP,K_Pl*. Isso pode ter contribuído para estimativas de menores lucros mesmo quando comparado com as doses recomendadas para solos com baixos teores de P e K obtidos por tabelas de recomendação ou modelos de recomendação de fertilizantes como o Ferticalc Soja.

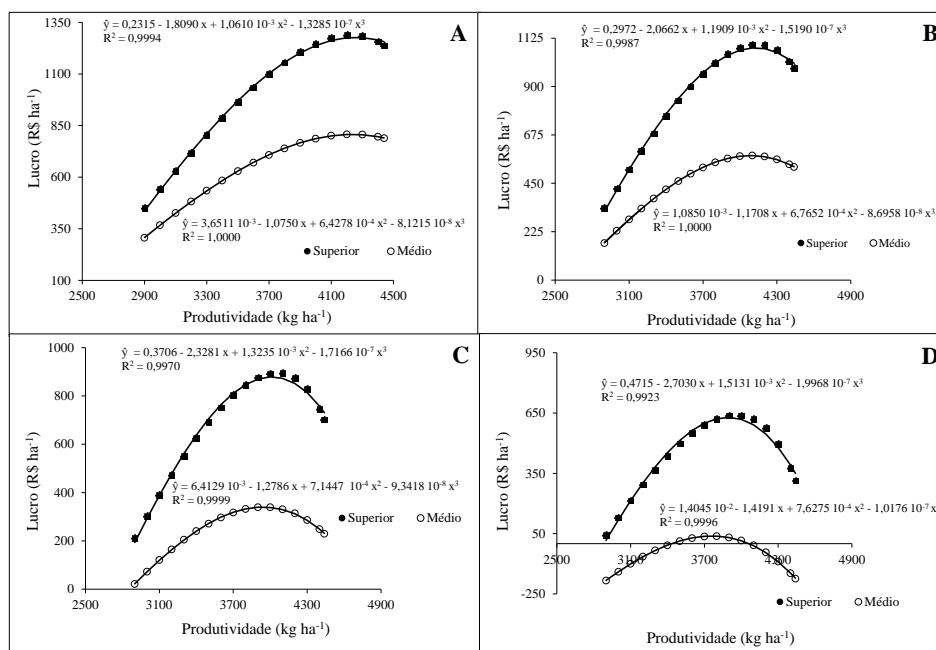


Figura 1. Relação entre o lucro e a produtividade de soja, obtidos na condição de lavouras de *cubP,K_Pl* superior e médio, para solos de textura arenosa (A), média (B), argilosa (C) e muito argilosa (D).

3.2 Estimativa da produtividade e da dose do requerimento de P e K de máxima eficiência econômica e do nível crítico de P e K no solo, para cultura da soja na região Central do Brasil

Os lucros, obtidos com a *pMEE*, diminuíram com o aumento do teor de argila de cada classe textural do solo utilizada nesse trabalho (Tabela 1). Isso ocorre devido ao maior poder tampão de P nos solos mais argilosos, do Cerrado, o que resulta em estimativas de maiores doses de P requeridas, pela soja, nesses solos mais argilosos (Santos et al., 2008). Portanto, o aumento das doses de P estimadas para os solos mais argilosos acaba por aumentar os custos de produção nesses solos o que resultaria em menores lucros, conforme observado na figura 1 do item 3.1.

Também foi observado nos métodos de determinação da *pMEE* e nas suas condições de lavouras de *cubP,K_Pl* superior e médio, que os níveis críticos de P (por M1) reduziram com o aumento do teor de argila de cada classe textural do solo utilizada nesse trabalho (Tabela 1). Isso ocorre devido ao desgaste do extrator Mehlich-1 nos solos mais argilosos e intemperizados do Cerrado. Em solos mais argilosos, com acidez mais tamponada, o pH inicial do extrator é rapidamente elevado e os sulfatos são adsorvidos em sítios não ocupados por P. Isso faz com que o extrator seja desgastado, ou seja perca a capacidade de extração de P disponível do solo (Novais e Smyth, 1999; Freitas et al., 2013). Por isso, que no modelo de Santos et al. (2008) os valores das taxas

de recuperação de P com o extrator M1 foram menores nos solos mais argilosos do Cerrado (mais intemperizados) do que nos solos arenosos.

Foi observado, na tabela 1, que no método 1, bem como nas condições de lavouras de *cubP,K_Pl* superior e médio, que as doses de requerimento de K e os níveis críticos de K M1 diminuíram com o aumento do teor de argila nos solos. Isso ocorreu devido a diminuição da *pMEE* gerada com o aumento do teor de argila nos solos. As *pMEE* estimadas, pelo método 1, foram menores nos solos mais argilosos devido ao aumento das doses de requerimento de P nesses solos o que resultou no aumento dos custos de produção.

Entretanto, as *pMEE* estimadas pelos métodos 3 e 4 foram constantes em todas as classes texturais do solo (Tabela 2). Isso resultou em doses de requerimento de K e níveis críticos de K por M1 constantes em todas as classes texturais do solo (Tabela 1). Esses resultados estão de acordo com o indicado por Alvarez V. et al. (1999) e Novais (1999) esses autores indicaram que os níveis críticos de K no solo e as doses recomendadas de K_2O , para a cultura da soja, fossem respectivamente constantes em todas as classe texturais do solo. Entretanto, Broch & Ranno (2008) observaram que os níveis críticos de K, no solo, e as doses recomendadas de K_2O , para a cultura da soja, foram maiores nos solos mais argilosos do que nos arenosos.

Em todos os métodos de determinação da *pMEE* e nas suas respectivas lavouras de *cubP,K_Pl* superior e médio foi demonstrado que os níveis críticos de P resina (estimado pelo modelo apresentado na tabela 2 do item 3.3) possuíram tendência de ser maiores nos solos mais argilosos. Esses resultados estão de acordo com os apresentados por Schlindwein & Gianello (2008). Esses autores observaram que os níveis críticos de P resina nos solos mais argilosos foram maiores do que nos arenosos, para cultura do milho, trigo e da soja, no sistema plantio direto. Entretanto, Sousa & Lobato (2004) e Mascarenhas & Tanaka (1996) observaram que os níveis críticos de P resina para a cultura da soja são constantes em todas as classes texturais do solo.

Para cada método de determinação da *pMEE* e para cada classe textural do solo, foi demonstrado que as lavouras em condição de *cubP,K_Pl* superior resultaram em níveis críticos de K M1, P M1 e resina menores do que aqueles apresentados pelo lavouras em condição de médio *cubP,K_Pl* (Tabela 1). Isso ocorre, pois as lavouras de *cubP,K_Pl,Gr* superior demandaram menor quantidade de P e K. Logo, a recomendação das doses de P e K para obtenção da *pMEE*, dessas lavouras, também reduziu comparativamente àquelas de médio *cubP,K_Pl,Gr* (Tabela 1). Por isso, os lucros obtidos nos talhões com eficiência nutricional superior de P e K, foram maiores. Esses

resultados demonstram a importância de se identificar e caracterizar esses talhões de eficiência nutricional superior, conforme abordado no capítulo 1 e 2 em que foram identificados por meio de técnicas de linha de fronteira os talhões com *cubP*_Pl e *cubK*_Pl superior, respectivamente. Além disso, nos capítulos 1 e 2 também foram caracterizados os atributos do solo, os teores de nutrientes nas folhas índices, os ciclos de maturação de cada cultivar e as cultivares de soja das lavouras com eficiência nutricional superior e elevada produtividade.

As *pMEE* e os níveis críticos de P M1, Resina e K M1 no solo, obtidos com o método 1, foram aqueles que com maior frequência se relacionaram com os maiores lucros, para condições de lavouras de soja com *cubP,K*_Pl superior e médio (Tabela 1). Isso ocorreu, pois, com o uso do método 1 as *pMEE* foram estimadas com maior exatidão.

Deve-se ressaltar que a *pMEE* estimada por meio desses quatro métodos acaba por influenciar nos valores dos níveis críticos estimados. Pois, a *pMEE* estimada influencia diretamente nas doses de máxima eficiência econômica de P e K, e essas doses influenciam diretamente na estimativa dos níveis críticos de P e K conforme apresentado nas equações 11 e 12 do item 2.3.1.

Os maiores valores de níveis críticos de P e K no solo e das doses de requerimento de P e K de MEE foram obtidas quando o método 2 foi utilizado (Tabela 1). Isso ocorreu, pois as *pMEE* e *prMEE* estimadas por meio desse método foram as maiores. Portanto, as maiores *pMEE* corresponderam a plantas com maiores demandas por P e K. Enquanto, a maior demanda por esses nutrientes resultou em maiores doses de P e K de MEE, que por sua vez resultou em maiores níveis críticos estimados de P e K no solo.

Tabela 1. Estimativas: da produtividade e da dose do requerimento de P e K de máxima eficiência econômica, do nível crítico de P e K no solo, da produtividade relativa de máxima eficiência econômica e do lucro com a produtividade de máxima eficiência econômica obtidos nos métodos de determinação da *pMEE* 1, 2, 3 e 4, para lavouras com coeficiente de utilização biológico de P e de K da planta superior e médio na região Central do Brasil

¹ Métodos <i>ncPK</i>	² <i>cub</i> P,K	³ <i>pMEE</i>	⁴ <i>pRMEE</i>	P ₂ O ₅	K ₂ O	⁵ <i>ncPM1</i>	⁶ <i>ncPRes</i>	⁷ <i>ncK</i>	Lucro com a <i>pMEE</i>
		kg ha ⁻¹	%	-----kg ha ⁻¹ -----		-----mg dm ⁻³ -----			R\$ ha ⁻¹
Textura Arenosa									
Método 1	Superior	4 272	96,2	236	236	27,1	18,6	75,6	1 288,6
	Médio	4 255	95,8	269	410	31,0	21,0	131,2	807,9
Método 2	Superior	4 384	98,7	266	255	30,6	20,8	81,5	1263,6
	Médio	4 423	99,6	293	458	33,8	22,8	146,4	792,0
Método 3	Superior	3 996	90,0	187	205	21,5	15,0	65,5	1 244,9
	Médio	3 996	90,0	237	351	27,3	18,6	112,1	786,0
Método 4	Superior	3 650	82,2	152	184	17,5	12,4	58,8	1 066,5
	Médio	3 650	82,2	202	291	23,3	16,1	93,0	689,5
Textura Média									
Método 1	Superior	4 133	93,1	267	218	22,0	27,5	69,9	1 097,0
	Médio	4 091	92,1	319	371	26,3	31,9	118,6	579,6
Método 2	Superior	4 370	98,4	336	252	27,8	33,3	80,7	1 036,6
	Médio	4 402	99,1	373	451	30,8	36,5	144,3	537,6
Método 3	Superior	3 996	90,0	240	205	19,8	25,1	65,5	1 079,1
	Médio	3 996	90,0	304	351	25,1	30,7	112,1	575,7
Método 4	Superior	3 650	82,2	196	184	16,2	21,4	58,8	931,3
	Médio	3 650	82,2	260	291	21,5	26,9	93,0	510,0
Textura Argilosa									
Método 1	Superior	4 011	90,3	303	206	17,1	30,4	65,9	893,9
	Médio	3 931	88,5	369	338	20,8	35,7	108,1	339,8
Método 2	Superior	4 349	98,0	410	248	23,2	39,0	79,5	792,9
	Médio	4 371	98,4	459	442	25,9	42,9	141,5	260,4
Método 3	Superior	3 996	90,0	300	205	17,0	30,2	65,5	892,6
	Médio	3 996	90,0	380	351	21,5	36,6	112,1	339,1
Método 4	Superior	3 650	82,2	245	184	13,8	25,7	58,8	779,1
	Médio	3 650	82,2	325	291	18,4	32,2	93,0	308,0
Textura Muito Argilosa									
Método 1	Superior	3 887	87,5	355	196	10,8	25,7	62,8	636,4
	Médio	3 744	84,3	431	305	13,1	30,5	97,6	37,1
Método 2	Superior	4 313	97,1	503	243	15,3	35,0	77,6	484
	Médio	4 319	97,3	568	427	17,3	39,1	136,6	-98,6
Método 3	Superior	3 996	90,0	382	205	11,6	27,4	65,5	638,3
	Médio	3 996	90,0	484	351	14,7	33,8	112,1	16,5
Método 4	Superior	3 650	82,2	311	184	9,5	22,9	58,8	571,7
	Médio	3 650	82,2	413	291	12,6	29,4	93,0	32,5

¹Método de determinação da *pMEE* de P e de K no solo para cultura da soja; ² *cubP,K_PI* superior e médio; ³Produtividade de máxima eficiência econômica; ⁴Produtividade relativa de máxima eficiência econômica; ⁵Estimativa de nível crítico de P para extrator Mehlich-1; ⁶Estimativa de nível crítico de P para extrator Resina; ⁷Estimativa de nível crítico de K para extrator Mehlich-1

Foi observado que as menores estimativas de lucro ocorreram nos solos de classe textural muito argilosa quando utilizado o método 2, para as condições de *cubP,K_PI*

superior e médio das lavouras de soja (Tabela 1). Esses resultados ocorreram pois, a maior *pMEE* estimada por esse método aliado a maior capacidade tampão de P, da classe textural muito argilosa, fizeram com que as doses de P fossem muito elevadas. Isso resultou no aumento dos custos de produção o que contribuiu para o menor lucro.

Os lucros obtidos por meio do método 3 foram, em geral, próximos daqueles obtidos pelo método 1 o qual gerou os maiores lucros (Tabela 1). Isso demonstrou boa exatidão desse método em estimar as *pMEE* e, conseqüentemente, os níveis críticos de P e K no solo para cultura da soja.

Os menores valores de níveis críticos de P e K no solo e das doses de requerimento de P e K de MEE foram estimados quando o método 4 foi utilizado (Tabela 1). Isso ocorreu, pois as *pMEE* e *prMEE* estimadas por meio desse método foram as menores dentre todos os outros. Portanto, menores produtividades corresponderam a plantas com menores demandas por P e K. Enquanto, a menor demanda por esses nutrientes resultou em menores doses de requerimento de P e K, que por sua vez resultou em menores níveis críticos estimados de P e K no solo.

As *pMEE* estimadas pelo método 4 resultaram em níveis críticos de P e K no solo os quais se relacionaram com maior frequência em menores lucros (Tabela 1). Esses resultados divergem das observações de Mallarino e Blackmer (1992). Esses autores observaram em condições de campo, que o método de Cate e Nelson foi aquele que estimou o nível crítico de P no solo com maior lucro para cultura do milho para o Estado de Iowa, nos Estados Unidos.

3.3. Modelo utilizado para estimativa de nível crítico de P resina no solo para cultura da soja na região Central do Brasil

Devido ao bom ajuste do modelo utilizado para estimar os níveis críticos de P resina no solo para a cultura da soja, esses níveis críticos puderam ser estimados em função dos níveis críticos de P M1 e dos teores de argila de cada classe textural do solo utilizada nesse trabalho (Tabela 2).

Tabela 2. Modelo utilizado para estimar nível crítico de P resina por meio dos teores de P Mehlich-1 e argila dos solos do Cerrado

Equação	R ²
$P \text{ Resina} = -4,54173 + 0,24675 \text{ ***PM1} + 0,0463 \text{ ***Arg} - 0,00005 \text{ ***Arg}^2 + 0,00260 \text{ ***PM1} \text{ ***Arg}$	0,90

*** Significativo a 0,1% de probabilidade. PM1: teor de P pelo extrator Mehlich-1 (mg dm⁻³); Arg: teor de argila no solo (g kg⁻¹).

3.4. Comparação entre nível crítico de P e K estimado e observado no solo para cultura da soja

Em cada método da determinação da *p*MEE, foi observado que os níveis críticos estimados de P por M1 do solo diminuíram com o aumento do teor de argila dos solos (Tabela 3). As tabelas de recomendação também apresentaram essa diminuição dos níveis críticos de P por M1 do solo com o aumento do teor de argila dos solos. Essa diminuição dos níveis críticos ocorreu devido ao desgaste do extrator Mehlich-1 nos solos mais argilosos e intemperizados do Cerrado. Isso demonstrou que os modelos utilizados para estimar os níveis críticos de P por M1 do solo foram sensíveis ao desgaste do extrator.

Os níveis críticos estimados de P por resina (Tabela 4) não foram constantes em todas as classes texturais do solo como a maior parte dos resultados retirados da literatura. Sousa et al. (2006) definiram que, para cultura da soja, os níveis críticos de P resina, em todas as classes texturais do solo, foi de 15 mg dm⁻³.

Os níveis críticos de K por M1 obtidos com os métodos de determinação da *p*MEE 3 e 4 (Tabela 5) foram constantes em todas as classes texturais do solo, conforme a maior parte dos resultados retirados da literatura. Zancaro et al. (2002) definiu que, para cultura da soja, os níveis críticos de K por M1, em todas as classes texturais do solo, foi de 60 mg dm⁻³. Entretanto, os níveis críticos de K (por M1) estimados com os métodos de determinação da *p*MEE 1 e 2 (Tabela 5) não foram constantes em todas as classes texturais do solo. Isso ocorreu, pois, a *p*MEE estimada pelos métodos 1 e 2 também não foram constantes em todas as classes texturais do solo. A variação da *p*MEE estimada, pelos métodos 1 e 2, em cada classes textural fizeram com que as doses de K de MEE também fossem variadas com a textura do solo. Isso ocorreu, pois, as demandas de K pelas plantas variaram com a produtividade almejada. Logo, essa variação das doses de K de MEE contribui para que os níveis críticos de K estimados, pelos métodos 1 e 2, variassem com a textura do solo. Isso ocorreu, pois, as dose de K de MEE correspondeu a uma variável do modelo que estimou o nível de crítico de K no solo (Eq. 12 do item 2.3.1).

Os níveis críticos de P (por M1 e resina) e K (por M1) estimados para as condições de lavouras com *cubP,K_P1* superior foram aqueles que mais se aproximaram dos sugeridos pela literatura (Tabela 3, 4 e 5). Porém, quando as estimativas dos níveis críticos de P (por M1 e resina) e K (por M1) foram

calculadas para as condições de lavouras com *cubP,K_Pl* médio o valor desses níveis foram superiores aos sugeridos pelos manuais de recomendação de corretivos e fertilizantes (Tabela 3, 4 e 5). Esses resultados podem levantar duas hipóteses. A primeira seria que os níveis críticos propostos pelas tabelas de recomendações de calagem e fertilizantes possa já não atender as atuais expectativas de produtividade de soja. Exemplo disso foram as doses de P e K recomendadas por Novais (1999) as quais foram sugeridas para produtividades entre 2 500 a 3 000 kg ha⁻¹ de soja. A segunda hipótese seria que nas condições de lavouras de médio *cubP,K_Pl* os níveis adequados de algum dos fatores de produção não foram atingidos, o que contribuiu para que os níveis críticos de P e K estimados no solo fossem superiores aos dos manuais de recomendação de corretivos e fertilizantes (Tabelas 3, 4 e 5). Essa segunda hipótese se baseia nos resultados dos capítulos 1 e 2 em que foram observadas que as lavouras de soja com alta produtividade e *cubP,K_Pl* superior da região Central do Brasil, apresentaram teores médios dos nutrientes no terceiro trifólio com pecíolo acima ou na faixa de suficiência proposta por Kurihara et al. (2013). Esses resultados podem demonstrar que lavouras de soja com alta produtividade e maior eficiência no uso de P e K foram supridas de forma adequada por outros nutrientes. Além disso, nos capítulos 1 e 2, foi observado que as lavouras de soja com alta produtividade e *cubP,K_Pl* superior da região Central do Brasil, apresentaram médias elevadas de precipitação pluviométrica durante o ciclo de cultivo. Portanto, as condições das lavouras de soja com alta produtividade e com eficiência superior no uso de P e K atendem os pressupostos dos experimentos de calibração. Pois, nesses experimentos as doses do nutriente calibrado variam, mas procura-se fixar em níveis adequados os outros fatores de produção. Por isso, que os valores de níveis críticos entre de P e K observados na literatura e calculados a partir das condições de *cubP,K_Pl* superior foram semelhantes. Enquanto nas condições de lavouras de *cubP,K_Pl* médio algum nível do fator produtivo não está fixado em níveis adequados. Por isso, a eficiência nutricional dessas lavouras é menor do que aquelas de *cubP,K_Pl* superior. Dessa forma, nas condições das lavouras de soja com médio *cubP,K_Pl* as doses de requerimento de P e K calculadas para obtenção das *pMEE* foram maiores do que nas condições das lavouras de soja com *cubP,K_Pl* superior. Isso fez com que os valores dos níveis críticos de P e K, verificados na literatura fossem menores do que os níveis críticos de P e K calculados para as condições de médio *cubP,K_Pl* (Tabelas 3, 4 e 5).

Os níveis críticos de P (por M1 e resina) e K (por M1) estimados a partir do método de determinação da $pMEE$ 4, foram os que mais se aproximaram dos níveis críticos de P e K do solo estabelecidos na literatura (Tabelas 3, 4 e 5). Esses resultados podem ter ocorrido, pois as menores $pMEE$ estimadas no método 4 (Tabela 1), dentre todos os outros, conferiram a esse método valores de $pMEE$ mais próximos daqueles obtidos na literatura. Isso pode ter contribuído para que os requerimentos de P e K destinados para suprir a $pMEE$ obtida na literatura estejam mais próximos das doses de requerimento de P e K calculadas para atender o suprimento da $pMEE$ estimada no método 4. Como consequência disso, seria esperado que os níveis críticos de P e K no solo calculados a partir da drP,K_MEE obtida no método 4 (Equação 11 e 12 do item 2.3.1) apresentassem valores mais próximos dos níveis críticos de P e K estabelecidos na literatura.

Tabela 3. Comparação entre os níveis críticos de P, por Melich-1, do solo estimados para cada método de determinação da *p*MEE e para lavouras de soja com *cubP*_PI superior e médio com os níveis críticos obtidos em tabelas de recomendação

Nutrientes e extratores	Métodos ^{1/}	Classe textural ^{2/}	nc estimado ^{3/}	CFSEMG-MG ^{4/}	CPAC-Cerrado ^{5/}
-----mg dm ⁻³ -----					
cubP_Pi superior					
P M1	1	Arenosa	27,1	30	18
	2	Arenosa	30,6	30	18
	3	Arenosa	21,5	30	18
	4	Arenosa	17,5	30	18
	1	Média	22,0	20	15
	2	Média	27,8	20	15
	3	Média	19,8	20	15
	4	Média	16,2	20	15
	1	Argilosa	17,1	12	8
	2	Argilosa	23,2	12	8
	3	Argilosa	17,0	12	8
	4	Argilosa	13,8	12	8
	1	M. argilosa ^{6/}	10,8	8	4
	2	M. argilosa ^{6/}	15,3	8	4
	3	M. argilosa ^{6/}	11,6	8	4
	4	M. argilosa ^{6/}	9,5	8	4
cubP_Pi médio					
P M1	1	Arenosa	31,0	30	18
	2	Arenosa	33,8	30	18
	3	Arenosa	27,3	30	18
	4	Arenosa	23,3	30	18
	1	Média	26,3	20	15
	2	Média	30,8	20	15
	3	Média	25,1	20	15
	4	Média	21,5	20	15
	1	Argilosa	20,8	12	8
	2	Argilosa	25,9	12	8
	3	Argilosa	21,5	12	8
	4	Argilosa	18,4	12	8
	1	M. argilosa ^{6/}	13,1	8	4
	2	M. argilosa ^{6/}	17,3	8	4
	3	M. argilosa ^{6/}	14,7	8	4
	4	M. argilosa ^{6/}	12,6	8	4

^{1/}Método de determinação da *p*MEE de P e de K no solo para cultura da soja; ^{2/}Classe textural do solo; ^{3/}Nível crítico estimado de acordo com o modelo proposto nas equações 11 do item 2.3.1; ^{4/}Comissão da Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais (Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais 5ª Aproximação apresentada por Alvarez V. et al., 1999); ^{5/}Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados (Cerrado - Correção do solo e adubação 2ª Edição apresentada por Sousa et al., 2004); ^{6/}Classe textural do solo muito argilosa.

Tabela 4. Comparação entre os níveis críticos de P, por Resina, do solo estimados para cada método de determinação da *p*MEE e para lavouras de soja com *cubP*_PI superior e médio com os níveis críticos obtidos em tabelas de recomendação

Nutrientes e extratores	Métodos ^{1/}	Classe textural ^{2/}	nc estimado ^{3/}	IAC-SP ^{4/}	CPAC-Cerrado ^{5/}
-----mg dm ⁻³ -----					
<i>cubP</i> _PI superior					
P Resina	1	Arenosa	18,6	15	14
	2	Arenosa	20,8	15	14
	3	Arenosa	15,0	15	14
	4	Arenosa	12,4	15	14
	1	Média	27,5	15	14
	2	Média	33,3	15	14
	3	Média	25,1	15	14
	4	Média	21,4	15	14
	1	Argilosa	30,4	15	14
	2	Argilosa	39,0	15	14
	3	Argilosa	30,2	15	14
	4	Argilosa	25,7	15	14
	1	M. argilosa ^{6/}	25,7	15	14
	2	M. argilosa ^{6/}	35,0	15	14
	3	M. argilosa ^{6/}	27,4	15	14
	4	M. argilosa ^{6/}	22,9	15	14
<i>cubP</i> _PI médio					
P Resina	1	Arenosa	21,0	15	14
	2	Arenosa	22,8	15	14
	3	Arenosa	18,6	15	14
	4	Arenosa	16,1	15	14
	1	Média	31,9	15	14
	2	Média	36,5	15	14
	3	Média	30,7	15	14
	4	Média	26,9	15	14
	1	Argilosa	35,7	15	14
	2	Argilosa	42,9	15	14
	3	Argilosa	36,6	15	14
	4	Argilosa	32,2	15	14
	1	M. argilosa ^{6/}	30,5	15	14
	2	M. argilosa ^{6/}	39,1	15	14
	3	M. argilosa ^{6/}	33,8	15	14
	4	M. argilosa ^{6/}	29,4	15	14

^{1/}Método de determinação da *p*MEE de P e de K no solo para cultura da soja; ^{2/}Classe textural do solo; ^{3/}Nível crítico estimado de acordo com o modelo proposto na tabela 1 do item 2.4.; ^{4/}Instituto Agrônômico de Campinas (Recomendação de adubação e calagem para o Estado de São Paulo 2ª Edição apresentada por Mascarenhas & Tanaka 1996); ^{5/}Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados (Cerrado - Correção do solo e adubação 2ª Edição apresentada por Sousa et al., 2004); ^{6/}Classe textural do solo muito argilosa.

Tabela 5. Comparação entre os níveis críticos de K, por Melich-1, do solo estimados para cada método de determinação da *p*MEE e para lavouras de soja com *cub*K_Pl superior e médio com os níveis críticos obtidos em tabelas de recomendação

Nutrientes e extratores	Métodos ^{1/}	Classe textural ^{2/}	nc estimado ^{3/}	CFSEMG-MG ^{4/}	CPAC-Cerrado ^{5/}	
-----mg dm ⁻³ -----						
cubK_Pl superior						
K M1	1	Arenosa	79,6	70	30	
	2	Arenosa	85,5	70	30	
	3	Arenosa	69,5	70	30	
	4	Arenosa	62,8	70	30	
	1	Média	73,9	70	50	
	2	Média	84,7	70	50	
	3	Média	69,5	70	50	
	4	Média	62,8	70	50	
	1	Argilosa	69,9	70	50	
	2	Argilosa	83,5	70	50	
	3	Argilosa	69,5	70	50	
	4	Argilosa	62,8	70	50	
	1	M. argilosa ^{6/}	66,8	70	50	
	2	M. argilosa ^{6/}	81,6	70	50	
	3	M. argilosa ^{6/}	69,5	70	50	
	4	M. argilosa ^{6/}	62,8	70	50	
	cubK_Pl médio					
	K M1	1	Arenosa	135,2	70	30
		2	Arenosa	150,4	70	30
		3	Arenosa	116,1	70	30
4		Arenosa	97,0	70	30	
1		Média	122,6	70	50	
2		Média	148,3	70	50	
3		Média	116,1	70	50	
4		Média	97,0	70	50	
1		Argilosa	112,1	70	50	
2		Argilosa	145,5	70	50	
3		Argilosa	116,1	70	50	
4		Argilosa	97,0	70	50	
1		M. argilosa ^{6/}	101,6	70	50	
2		M. argilosa ^{6/}	140,6	70	50	
3		M. argilosa ^{6/}	116,1	70	50	
4		M. argilosa ^{6/}	97,0	70	50	

^{1/}Método de determinação da *p*MEE de P e de K no solo para cultura da soja; ^{2/}Classe textural do solo; ^{3/} Nível crítico estimado de acordo com o modelo proposto nas equações 12 do item 2.3.1; ^{4/}Comissão da Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais (Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais 5ª Aproximação apresentada por Alvarez V. et al., 1999); ^{5/}Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados (Cerrado - Correção do solo e adubação 2ª Edição apresentada por Vilela et al., 2004); ^{6/}Classe textural do solo muito argilosa.

4. Conclusões

A modelagem do requerimento de P e K pode ser utilizada para obter os níveis críticos de P e K no solo para lavouras de soja com condições de eficiência nutricional superior e média.

As *p*MEE e os níveis críticos de P M1, Resina e K M1 no solo, calculados a partir do método 1 foram aqueles que com maior frequência se relacionaram com os maiores lucros, para condições de lavouras de soja com *cub*P,K_Pl superior e médio da região Central do Brasil.

5.Revisões bibliográficas

ALVAREZ V., V.H. Correlação e calibração de métodos de análise de solos. In: ALVAREZ V., V.H.; FONTES, L.E.F. & FONTES, M.P.F., eds. O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1996. p.615-645.

ALVAREZ VVH, NOVAIS RF, BARROS, NF, CANTARUTTI RB, LOPES AS. Interpretação dos resultados das análises de solos. In: RIBEIRO, A.C.; GUIMARÃES, P.T.G. & ALVAREZ V., V.H., eds. Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais, 5ª Aproximação. Viçosa, MG, Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. p.25-32.

BROCH, D.L. & RANNO, S.K. Fertilidade do solo, adubação e nutrição da cultura da soja. In: Tecnologia de produção de soja e milho 2008/2009. Maracajú, Fundação MS, 2008. p.5-36.

CARMONA, F.C.; CONTE, O.; FRAGA, T.I.; BARROS, T.; PULVER, E. & ANGHINONI, I. Disponibilidade no solo, estado nutricional e recomendação de enxofre para o arroz irrigado. R. Bras. Ci. Solo. 33:345-355, 2009.

CATE, R.B. & NELSON, L.A. A simple statistical procedure for partitioning soil test correlation in two classes. Soil Science Society of America proceedings, Madison, 35(4):658-660, 1971.

COELHO, F.S.; FONTES, P.C.R.; CECON, P.R.; BRAUN, H. & da SILVA, I.R. Valor e predição do nível crítico de índices para avaliar o estado nitrogenado da batateira. Rev. Ciênc. Agron. 44:115-122, 2013.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO – CQFSRS/SC. Manual de adubação e calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. 10.ed. Porto Alegre, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo - Núcleo Regional Sul, 2004. 394p.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento; Séries Históricas. Disponível em<<http://www.conab.gov.br/conteudos.php/premiodevideospaa/docS/conteudos.php?a=1252&t=2#this>> Acessado em 10/02/2016.

CONAB- Preço da soja em Rondonópolis MT -
http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/15_01_15_16_29_21_soja_-_2a_semana_-05_a_09.pdf Acessado em 31/12/2015

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Soja Tecnologias de produção de soja - Paraná - 2003. Londrina, Embrapa Soja, 2002. 195p. (Sistemas de Produção, 2)

FREITAS, I.F.; NOVAIS, R.F.; VILLANI, E.M.A. & NOVAIS, S.V. Phosphorus extracted by ion exchange resins and Mehlich-1 from Oxisols (Latosols) treated with different phosphorus rates and sources for varied soil-source contact periods. R Bras Ci Solo. 37:667-77, 2013.

GEHL, R.J.; SCHMIDT, J.P.; MADDUX, L.D. AND GORDON, W.B. Corn yield response to nitrogen rate and timing in sandy irrigated soils. Agron J. 97:1230-1238, 2005.

GONÇALVES, J.L.M.; NOVAIS, R.F.; BARROS, N.F.; NEVES, J.C.L. & RIBEIRO, A.C. Cinética de transformação de fósforo-lábil em não-lábil, em solos de Cerrado. R. Bras. Ci. Solo, 13:13-24, 1989.

GRIMM, S.S. Aspectos econômicos da adubação. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1970. 14p. (Boletim Técnico, 6)

HAAS, F.D. Plantio direto, fatores que interferem na eficiência da adubação. In: CURSO SOBRE ASPECTOS BÁSICOS DE FERTILIDADE E MICROBIOLOGIA DO SOLO NO SISTEMA DE PLANTIO DIRETO, Passo Fundo, 1997. Resumo de palestras. Passo Fundo, 1997. 64p.

HYAMS, D.G. Curve Expert basic. Release 1.4. 2010. Disponível em <http://docs.curveexpert.net/curveexpert/basic/_static/CurveExpertBasic.pdf>. Acesso em: 13 out. 2014.

INSTITUTO MATO-GROSSENSE DE ECONOMIA AGROPECUÁRIA - IMEA: Publicações: Soja: Custo de Produção, [2016]. Disponível em: <<http://www.imea.com.br/site/publicacoes.php?categoria=4&subcategoria=3>>. Acesso em: 28 jun. 2016.

INVESTING.COM: Mercados: Câmbio: USD/BRL: Dados Históricos, [2016]. Disponível em: <<http://www.http://br.investing.com/currencies/usd-brl-historical-data>>. Acesso em: 05 mar. 2016.

KURIHARA, C.H.; ALVAREZ V. V.H.; NEVES J.C.L. & NOVAIS R.F. Acúmulo de matéria seca e nutrientes em soja, como variável do potencial produtivo. Rev. Ceres. 2013; 60: 690-698.

KURIHARA, C.H.; ALVAREZ V., V.H.; NEVES, J.C.L.; NOVAIS, R.F & STAUT, L.A. Faixas de suficiência para teores foliares de nutrientes em algodão e em soja, definidas em função de índices DRIS. Rev. Ceres. 2013; 60: 412-419.

MALLARINO A.P. & BLACKMER, A.M. Comparison of methods for determining critical concentration of soil test phosphorus for corn. Agronomy Journal, 84:850–856, 1992.

MARO G.; JANSSEN B.; MSANYA B. & MREMA J. Economic optimization of nutrient application to coffee in northern Tanzania using SAFERNAC. International Journal of Plant & Soil Science. 3:1096-1111, 2014.

MASCARENHAS, H.A.A. & TANAKA, R.T. Soja. In: Raij, B. van; Cantarella, H.; Quaggio, J.A.; Furlani, A.M. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agrônomo, 1996. p.202-203. (Boletim Técnico, 100).

MELGES, E; LOPES, N.F. & OLIVA M.A. Crescimento, produção de matéria seca e produtividade da soja submetida a quatro níveis de radiação solar. Pesq. Agrop. Bras. 1989; 24: 1073-1080.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO - MAPA. Secretaria de Relações Internacionais do Agronegócio. Informe de produtos. 2013. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/internacional/indicadores-e-estatisticas/informes-de-produtos>>. Acessado em 06/03/2014.

MITSCHERLICH, E.A. Das Gesetz des Minimus und das Gesetz des abnehmenden Bodenertrages. Landwirtschaftliche Jahrbucher, 38:537-552, 1909. Germany

MORAES, E.A. Concentração, acúmulo de P, K, Ca e Mg e crescimento da soja (*Glycine max* (L.) Merrill) em diferentes estágios de desenvolvimento. Lavras, Escola Superior de Agricultura de Lavras. 1983. 139p. (Tese de Mestrado)

MOSIER, A.R.; SYERS J.K. & FRENEY, J.R. Agriculture and the Nitrogen Cycle. Assessing the Impacts of Fertilizer Use on Food Production and the Environment. Scope-65. Island Press, 2004, London.

NOVAIS, R.F. Soja. In: RIBEIRO, A.C.; GUIMARÃES, P.T.G. & ALVAREZ V., V.H., eds. Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais, 5ª Aproximação. Viçosa, MG, Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. p..

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

NOVAIS, R.F. A pesquisa em fertilidade do solo (no país) – como a vejo (e a sinto). In: ALVAREZ V., V.H.; FONTES, L.E.F. & FONTES, M.P.F., eds. O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1996. p.397-409.

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. & FURLANI, A.M.C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2.ed. Campinas: Instituto Agronômico, 1996. 285p.(Boletim Técnico, 100).

RIBEIRO, A.C.; GUIMARÃES, P.T.G. & ALVAREZ V., V.H., eds. Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais, 5ª Aproximação. Viçosa, MG, Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999.

SANTOS, F.C.; NEVES, J.C.L.; NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.V.H. & SEDIYAMA C.S. Modelagem da recomendação de corretivos e fertilizantes para a cultura da soja. R. Bras. Ci. Solo. 32:1661-1674, 2008.

SANTOS, F.C.; NOVAIS, R.F.; NEVES, J.C.L.; FOLONI, J.M.; ALBUQUERQUE FILHO, M.R. & KER, J.C. Produtividade e aspectos nutricionais de plantas de soja cultivadas em solos de cerrado com diferentes texturas. R. Bras. Ci. Solo, 32:2015-2025, 2008.

SCHLINDWEIN, J.A. & GIANELLO, C. Calibração de métodos de determinação de fósforo em solos cultivados sob sistema de plantio direto. R. Bras. Ci. Solo, 32:2037-2049, 2008.

SILVA S.R.; BARROS, N.F.; NOVAIS R.F. & PEREIRA P.R.G. Eucalypt growth and nutritional efficiency of potassium under soil compaction. R. Bras. Ci. Solo. 26:1001-1010, 2002.

SOUSA, D.M.G. & LOBATO, E. eds. Cerrado: Correção do solo e adubação. Planaltina, Embrapa Cerrados, 2002. 416p.

SOUSA, D.M.G. & LOBATO, E. Calagem e adubação para culturas anuais e semiperenes. In: SOUSA, D.M.G. & LOBATO E., eds. Cerrado – Correção do Solo e Adubação, 2.ed. Planaltina - DF, EMBRAPA - CPAC, 2004. p.283-316.

SOUSA, D.M.G. DE; LOBATO, E. & REIN, T.A. Recomendação de adubação fosfatada com base na capacidade tampão de fósforo do solo para a região do Cerrado. In: Reunião Brasileira de Fertilidade de Solo e Nutrição de Plantas (27,2006, Bonito, MS). [A busca das raízes. Anais...] – CD-Rom – Resumo expandido

SOUZA, H.A.; CAVALCANTE, A.C.R.; TONUCCI, R.G.; POMPEU, R.C.F.F.; SOUZA, M.C.M.R. & MAIA, C. E. Níveis críticos para atributos do solo pela distribuição normal reduzida em culturas anuais de subsistência. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. 18:425-430, 2014.

TOMÉ Jr., J.B. Manual para interpretação de análise de solo. Guaíba, Agropecuária, 1997. 247p.

WEBB, J.R.; OHLROGGE, J. & BARBER, S.A. The effect of magnesium upon the growth and the phosphorus content of soybean plants. Soil Sci. Soc. Proc., p.458-462. 1954.

VIEIRA, RD. Avaliação do efeito de níveis de alguns nutrientes na composição química e na qualidade de sementes de soja. Viçosa, MG. Universidade Federal de Viçosa. 1985. 156p. (Tese de Doutorado)

VILELA, L.; SOUSA, D. M. G.; SILVA, J.E. Adubação potássica. In: SOUSA, D.M.G. & LOBATO E., eds. Cerrado – Correção do Solo e Adubação, 2.ed. Planaltina - DF, EMBRAPA - CPAC, 2004. p. 169-183.

VILLANI, E.M.A.; NOVAIS, R.F.; BARROS, N.F.; FONTES, L.E.F. & NEVES, J.C.L. Difusão de fósforo em solos com diferentes texturas e níveis de umidade. R. Bras. Ci. Solo, 17:343-347, 1993.

ZANCANARO L.; TESSARO L.C. & HILLESHEIM J. Adubação fosfatada e potássica da soja no Cerrado. *Informações Agronômicas*, n. 98, POTAFOS, junho/2002.

CONCLUSÕES GERAIS

A modelagem dos valores de eficiência nutricional e das demandas de P e K das lavouras de soja pode contribuir para recomendações de adubação fosfatada e potássica mais sustentáveis.

O ciclo de maturação das cultivares de soja influencia na eficiência nutricional e na demanda de P e K para cultura da soja.

A modelagem do requerimento de P e K pode ser utilizada para obter os níveis críticos de P e K no solo para lavouras de soja com condições de eficiência nutricional superior e média.

Os níveis críticos de P e K do solo, calculados a partir do método que determinou a produtividade de máxima eficiência econômica por meio da derivada do lucro em função da produtividade foram aqueles que com maior frequência se relacionaram com os maiores lucros, para condições de lavouras de soja com *cubP,K_Pl* superior e médio da região Central do Brasil.

ANEXO

1. Preços de fertilizantes e do grão de soja

Os preços e as concentrações de P_2O_5 e K_2O respectivos ao superfosfato triplo (ST) e ao cloreto de potássio (KCl) foram obtidos com base no mercado das principais regiões produtoras de soja dos Estados de Mato Grosso, Mato Grosso do Sul e Goiás (Tabela 1). Essa consulta foi realizada nos meses de junho a agosto de 2014. O preço médio da saca de soja foi obtido por meio da CONAB (2015) para cidade de Rondonópolis-MT, entre os dias 5 a 9 de Janeiro de 2015 (Tabela 1). Como referência monetária, o valor médio do dólar americano entre junho e agosto de 2014 e 5 a 9 de janeiro de 2015 eram de R\$ 2,24 e R\$ 2,68, respectivamente (Invesing, 2015).

Tabela 1. Preços médios do superfosfato triplo (ST), cloreto de potássio (KCl) e da soja, bem como as concentração média (%) de P_2O_5 e K_2O , presentes nos respectivos fertilizantes

Preço médio		Concentração média		Preço médio		
ST	KCl	P_2O_5	K_2O	P_2O_5	K_2O	Soja
-----R\$ t ⁻¹ -----		----- % -----		-----R\$ kg ⁻¹ -----		
1337,25	1221,45	43,00	58,80	3,11	2,08	0,95

2. Recomendação de adubação fosfatada e potássica para a cultura da soja na Região Central do Brasil

Com os modelos utilizados nesse trabalho é possível obter as doses de requerimento de P e K de máxima eficiência econômica na planta (drP, K_{Pl}) para condições de lavouras de soja com $cubP, K_{Pl}$ superior e médio. Para o cálculo dessas doses de requerimento não foi considerado o suprimento de P e K do solo para a planta. Entretanto, ao ser considerado a fertilidade atual de P e K do solo podem ser calculadas as doses de recomendação de P e K necessárias para atingir a $pMEE$ para condições de lavouras de soja com $cubP, K_{Pl}$ superior e médio (Equações 1 e 2). Deve-se ressaltar que as doses de recomendação de P e K não são as únicas variáveis necessárias para que a $pMEE$ seja alcançada. É necessário que todas as outras variáveis produtivas (condições pluviométricas, fitossanitárias e outras condições) sejam supridas em níveis adequados para que seja obtida a $pMEE$.

$$dP_MEE = (ncP_Sl - tP_Sl)/[(trP_Ex)/pER/10] \quad \text{Eq.1}$$

$$dK_MEE = (ncK_Sl - tK_Sl)/[(trK_Ex)/pER/10] \quad \text{Eq.2}$$

Em que: dP_MEE : dose de P de máxima eficiência econômica (kg ha^{-1}); ncP_Sl : estimativa de nível crítico de P M1 no solo (mg dm^{-3}); trP_Ex : taxa de recuperação de P pelo extrator (%); pER : profundidade efetiva de raiz (20 cm); dK_MEE : dose de K de máxima eficiência econômica (kg ha^{-1}); ncK_Sl : estimativa de nível crítico de K no solo (mg dm^{-3}); trK_Ex : taxa de recuperação de K pelo extrator (%)

Na tabela 1 podem ser observadas as taxas de recuperação de P para os extratores Mehlich-1 e resina do solo obtidas por Santos et al. (2008).

Tabela 1. Equações de regressão utilizadas para estimar a taxa de recuperação, pelo extrator, do nutriente⁽¹⁾ aplicado via fertilizante ($trEx$)⁽²⁾, em função do P-rem⁽³⁾

Extratores	Equações	R ²
P Mehlich-1	$trP_Ex = 0,0672821 + 0,0121615***P\text{-rem}$	0,681
P Resina	$trP_Ex = 0,419***P\text{-rem}^{0,128099}$	0,694

⁽¹⁾em mg dm^{-3} ; ⁽²⁾em $\text{mg dm}^{-3}/\text{mg dm}^{-3}$; ⁽³⁾em mg L^{-1} ; **, ***: Significativo a 1 % e 0,1 %, respectivamente.

Enquanto o modelo utilizado, por Santos et al. (2008), para estimar a concentração de K recuperado pelo extrator Mehlich-1 encontra-se na equação 3.

$$Krec = 4,0 + 0,767758**KapI \quad \text{Eq. 3}$$

Em que: $Krec$: teor de K recuperado no solo após aplicação de K (mg dm^{-3}); $KapI$: K aplicado no solo (mg dm^{-3}); ** significativo a 1 %.

A partir da equação 3 apresentada por Santos et al. (2008) foi obtida a taxa de recuperação de K extraído por Mehlich-1 nos solo (Equação 4).

$$trK_Ex = 0,767758 \quad \text{Eq. 4}$$

Em que: trK_Ex : taxa de recuperação de K no solo ($\text{mg dm}^{-3}/\text{mg dm}^{-3}$)

Para exemplificar o cálculo das doses de recomendação de P (P_2O_5) e K (K_2O), foi considerado que os níveis críticos de P e K do solo estimados pelo método de determinação da $pMEE$ 1, para lavouras de $cubP,K_Pl$ superior e médio, deveriam ser atingidos. Para isso foi considerado que essas doses seriam calculadas para um solo argiloso (P-rem: $16,2 \text{ mg L}^{-1}$), em que os teores de P e K extraídos por Melich-1 desse solo corresponderam a 5 e 20 mg dm^{-3} . Ao utilizar as equações 1 e 2 (em anexo) foi observado que as doses de P e K referentes as lavouras de $cubP,K_Pl$ superior corresponderam a 211 e 143 kg ha^{-1} , respectivamente. Enquanto, para as lavouras de $cubP,K_Pl$ médio as doses de P e K corresponderam a 275 e 275 kg ha^{-1} , respectivamente.