

JAILSON SILVA SOUSA

**ANÁLISE FOLIAR PARA AJUSTE DA RECOMENDAÇÃO
DE ADUBAÇÃO DO CAFEIEIRO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2016

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

T

S725a Sousa, Jailson Silva, 1991-
2016 Análise foliar para ajuste da recomendação de adubação do
cafeeiro / Jailson Silva Sousa. – Viçosa, MG, 2016.
x, 53f. : il. ; 29 cm.

Orientador: Júlio César Lima Neves.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Referências bibliográficas: f.43-53.

1. Solos - Análise. 2. Solos - Manejo. 3. Análise foliar. 4.
Plantas - Nutrição. 5. Plantas e solo. 6. *Coffea arabica*. 7. Café.
I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Fitotecnia.
Programa de Pós-graduação em Fitotecnia. II. Título.

CDD 22. ed. 631.4

JAILSON SILVA SOUSA

**ANÁLISE FOLIAR PARA AJUSTE DA RECOMENDAÇÃO
DE ADUBAÇÃO DO CAFEIEIRO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 17 de fevereiro de 2016.



Luiz Antônio dos Santos Dias



Víctor Hugo Álvarez V.



Herminia Emilia Prieto Martinez



Júlio César Lima Neves
(Orientador)

Aos meus queridos pais,

Josimar da Silva Sousa e Rosangela Maria Silva Sousa, pela minha criação, educação e incentivo.

Ao meu irmão,

Adeilson Silva Sousa, pelo convívio e amizade.

Aos demais familiares,

Por fazerem parte da minha vida e formação pessoal.

Aos meus amigos,

Que sempre me apoiaram e acreditaram em mim.

Ofereço e dedico.

**“Somos o que repetidamente fazemos.
A excelência, portanto, não é um feito,
mas um hábito”**

(Aristóteles)

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela vida e pela força para a conclusão de mais uma etapa da vida.

Aos meus pais, Josimar da Silva Sousa e Rosangela Maria Silva Sousa, pelo amor, dedicação e apoio incondicionais.

Ao meu irmão Adeilson Silva Sousa, pela amizade, e por sempre acreditar nas minhas escolhas.

À Universidade Federal de Viçosa, em particular ao Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia pela oportunidade de realização do curso.

Ao Professor Júlio César Lima Neves, pelo exemplo, pelas valiosas sugestões e ensinamentos e por sua excelente orientação e amizade.

À Professora Hermínia Emília Prieto Martinez, por conceder o banco de dados e por tornar possível a realização deste trabalho, e sempre se prontificar a ajudar.

Ao Professor Víctor Hugo Alvarez V., pelos sábios ensinamentos e importante contribuição.

Ao professor Luiz Antônio dos Santos Dias por aceitar participar da minha banca examinadora de defesa e pela contribuição para a finalização deste trabalho.

A todos os professores que contribuíram para o meu crescimento profissional e humano.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa.

Aos colegas de curso, além dos demais que conheci ao longo desses dois anos.

A todos que, de alguma forma, contribuíram direta e indiretamente para realização deste trabalho.

BIOGRAFIA

JAILSON SILVA SOUSA, filho de Josimar da Silva Sousa e Rosangela Maria Silva Sousa, natural de São Miguel do Tocantins, Tocantins, nasceu no dia 08 de Janeiro de 1991.

Em 2008, concluiu o curso de Técnico em Agropecuária pela Escola Agrotécnica Federal de Araguatins, em Araguatins, Tocantins.

Em março de 2009 iniciou o curso de graduação em Agronomia pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), onde graduou-se em fevereiro de 2014.

Em março de 2014 iniciou o Curso de Mestrado em Fitotecnia na Universidade Federal de Viçosa (UFV), submetendo-se à defesa de dissertação em fevereiro de 2016.

SUMÁRIO

RESUMO	vii
ABSTRACT	viii
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 – Uso da análise foliar no cafeeiro	4
1.2 – Método da Linha de Fronteira (LF).....	7
1.3 – Método Diagrama de Quadrantes do Relacionamento Planta-Solo (DQRps)	9
2. MATERIAL E MÉTODOS	12
2.1 - Características do banco de dados	12
2.2 - Análise de dados e relacionamento da produtividade do cafeeiro com os teores de MOS e de macronutrientes no solo pelo método da LF.....	14
2.3 - Relacionamento dos teores de macronutrientes na folha-índice do cafeeiro com os teores de matéria orgânica e macronutrientes no solo pelo método do DQRps.....	16
2.4 - Análise foliar para ajuste da recomendação de adubação do cafeeiro .	17
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	20
3.1 - Relacionamento da produtividade relativa e dos teores de N e S na folha-índice do cafeeiro com os teores de MOS.....	20
3.2 - Relacionamento da produtividade relativa e dos teores de P na folha- índice do cafeeiro com os teores de P no solo.....	25
3.3 - Relacionamento da produtividade relativa e dos teores de K na folha- índice do cafeeiro com os teores de K no solo.....	29
3.4 - Relacionamento da produtividade relativa e dos teores de Ca e Mg na	

folha-índice do cafeeiro com os teores de Ca e Mg no solo.....	33
3.5 – Simulações de uso do sistema de ajuste de recomendação de adubação do cafeeiro com base na análise foliar	37
4. CONCLUSÕES.....	42
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43

RESUMO

SOUSA, Jailson Silva, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2016. **Análise foliar para ajuste da recomendação de adubação do cafeeiro.** Orientador: Júlio César Lima Neves.

A crescente adoção de cultivares de café (*Coffea arabica* L.) mais produtivas e mais exigentes nutricionalmente somada à expansão da cafeicultura para solos de baixa fertilidade, tornam cada vez mais necessárias, pesquisas voltadas para nutrição adequada e equilibrada das plantas, contribuindo para a competitividade da atividade cafeeira. Os objetivos deste trabalho foram: determinar os níveis críticos e ótimos de MOS, P, K, Ca^{2+} e Mg^{2+} no solo a partir do relacionamento com a produtividade relativa do cafeeiro, utilizando o método da linha de fronteira (LF); estimar a faixa de suficiência foliar ótima de N, P, K, Ca, Mg e S a partir dos níveis críticos e ótimos de MOS, P, K, Ca^{2+} e Mg^{2+} no solo, utilizando equações geradas pelo método do Diagrama de Quadrantes do Relacionamento Planta-Solo (DQRps); delinear um sistema de ajuste de doses de macronutrientes para a cultura do cafeeiro com base na análise foliar. Para tanto, foi utilizado um banco de dados contendo informações de análises químicas dos solos, teores foliares de nutrientes e produtividade de café arábica de cinco regiões representativas do cultivo do cafeeiro no estado de Minas Gerais, referentes aos anos agrícolas 96/97, 97/98 e 98/99. Fez-se uma análise de consistência dos dados, e, em seguida, confeccionaram-se gráficos de dispersão relacionando a produtividade relativa de frutos do cafeeiro nos anos de alta produção, com os teores de MOS, P, K, Ca^{2+} e Mg^{2+} nas camadas de 0-20 e 20-50 cm, estabelecendo-se em cada gráfico a LF, e equações foram ajustadas aos pares de pontos selecionando aquela que melhor se ajustou aos dados. Foi utilizado o método do DQRps, em que foram plotados nos eixos y e x do sistema de coordenadas cartesiano, os teores foliares totais de N, P, K, Ca, Mg e S em função dos teores de MOS, P, K, Ca^{2+} e Mg^{2+} na camada de 0-20 cm, e na nuvem de pontos, foram traçadas linhas horizontais perpendiculares ao eixo das ordenadas, utilizando-se como balizador a média dos teores foliares na folha-índice, e para as linhas verticais perpendiculares aos eixo das abscissas, os níveis críticos de MOS e dos

macronutrientes no solo na camada de 0-20 cm, determinados pela LF, obtendo-se quatro quadrantes (I, II, III e IV). Aos pares de pontos (yx) dos quadrantes III e I, foram ajustadas equações de regressões, sendo estimadas por estas, faixas de suficiência foliar dos macronutrientes a partir de níveis críticos e ótimos da MOS e dos macronutrientes no solo. Foi proposta uma sistemática de integração da análise foliar com a análise de solo. Pelo método da LF obteve-se a faixa de boa disponibilidade dos atributos químicos do solo, correspondentes aos níveis críticos e ótimos de MOS, P, K, Ca^{2+} e Mg^{2+} nas camadas de 0-20 e 20-50 cm. O método do DQRps aplicado ao relacionamento entre os teores nutrientes foliares com os teores de nutrientes no solo, permite determinar curvas de resposta foliar, assim como, possibilitou estimar faixas de suficiência foliar ótima dos macronutrientes na folha-índice do cafeeiro: 33,4 – 35,8 g/kg de N; 1,4 – 1,6 g/kg de P; 24,4 – 27,0 g/kg de K; 11,9 – 13,6 g/kg de Ca; 3,8 – 4,5 g/kg de Mg e 1,4 – 1,8 g/kg de S, estando estas, coerentes com as faixas de suficiência foliar da literatura consideradas adequadas para o cafeeiro. A integração entre a análise foliar do café arábica com a disponibilidade de nutrientes no solo, atreladas à produtividade de frutos, permitiu desenvolver uma ferramenta de ajuste da recomendação de doses de macronutrientes para a cultura do cafeeiro.

ABSTRACT

SOUSA, Jailson Silva, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2016.
Leaf analysis for fertilizer recommendation adjustments for coffee trees.
Adviser: Júlio César Lima Neves.

The increasing adoption of more productive and more nutrient demanding coffee (*Coffea arabica* L.) varieties allied with the expansion of coffee production to low fertility soils has made of higher importance the research focused on a proper and balanced plant nutrition, contributing to competitiveness of the coffee production chain activity. The objectives of this study were to determine the critical and optimum levels of SOM, P, K, Ca²⁺ and Mg²⁺ in the soil, establishing relations of these parameters with coffee trees yields, by using the boundary line (BL) method; to estimate the optimal leaf sufficiency range of N, P, K, Ca, Mg and S from the critical and optimum levels of SOM, P, K, Ca²⁺ and Mg²⁺ in the soil, using equations generated by Quadrants Diagram method Relationship plant-Soil (QDRps); to outline a macronutrient dose adjustment system for the coffee crop based on leaf analysis. For this purpose, we used a database of chemical soil analysis, foliar nutrients and yields from five representative regions of coffee cultivation in Minas Gerais State, referring to the agricultural years 96/97, 97/98 and 98/99. The data was subjected to a consistency analysis, and then scatter plots were created relating the relative yield of coffee trees, in years of high production, with SOM, P, K, Ca²⁺ and Mg²⁺ levels in the 0-20 and 20-50 cm soil layers, establishing in each chart the BL, and then equations were adjusted to pairs of points by selecting the one that best fit the data set. We used the QDRps method, where the total foliar N, P, K, Ca, Mg and S due to the SOM, P, K, Ca²⁺ and Mg²⁺ at 0-20 cm were plotted in the y and x axes of the Cartesian coordinate system, while in the point cloud, horizontal lines were drawn perpendicular to the axis of ordinates, using as reference the average of foliar contents of the index sheet, and the vertical lines perpendicular to the horizontal axis, critical levels SOM and macronutrients in the soil at 0-20 cm, determined by the BL, obtaining four quadrants (I, II, III and IV). The pairs of points (yx) of the quadrants I and III, regression equations were adjusted, and then used to

estimate leaf sufficiency ranges of macronutrients solving by the critical and optimum levels of SOM and macronutrients in soil. We proposed a systematic integration of leaf analysis soil analysis. The range of good availability of soil chemical attributes corresponding to the critical and optimum levels of SOM, P, K, Ca²⁺ and Mg²⁺ at 0-20 and 20-50 cm was obtained by the method of BL. The method of QDRps applied to the relationship between foliar nutrient content with nutrient levels in the soil, has allowed us to determine foliar response curves, as well as to estimate great leaf sufficiency ranges of macronutrients in coffee leaf-index: 33.4 - 35.8 g/kg of N; 1.4 - 1.6 g/kg of P; 24.4 - 27.0 g/kg of K; 11.9 - 13.6 g/kg of Ca; 3.8 - 4.5 g/kg of Mg and 1.4 - 1.8 g/kg of S, these being results consistent with the leaf content ranges considered sufficient in the literature. The integration between the leaf analysis of Arabica coffee with the availability of nutrients in the soil, linked to the productivity of fruits, allowed the development of an adjustment tool recommendation macronutrient for the coffee crop.

1. INTRODUÇÃO

O café é uma das *commodities* com maior importância no comércio internacional, sendo o segundo produto mais comercializado do mundo, depois do petróleo (TALBOT, 2004). A cafeicultura é uma atividade de grande importância para o agronegócio brasileiro, já que o Brasil possui destaque como maior produtor e exportador mundial de café, o que gera grandes riquezas e divisas para o país, além de desempenhar papel social. Grande parte da produção brasileira de café, 70 %, é derivada de cultivares de café arábica (*Coffea arabica* L.) (ABIC, 2013; MAPA, 2015).

Em Minas Gerais, a cafeicultura constitui um dos setores mais dinâmicos da agricultura, no que tange ao volume de produção, ao capital movimentado e a massa socioeconômica envolvida nesta atividade, sendo este estado, responsável, em média, por 50 % da produção brasileira (PELEGRINI; SIMÕES, 2011; MAPA, 2015).

Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB) na safra 2015 a produção nacional de café arábica foi de 44,3 Msc de 60 kg do grão beneficiado, com produtividade média de 22,8 sc/ha, sendo Minas Gerais o maior produtor, com produção de 22,3 Msc e produtividade de 23,0 sc/ha (CONAB, 2015). Essa produtividade pode ser considerada baixa tendo em vista o potencial produtivo dessa cultura, que pode atingir mais de 100 sc/ha (MATIELLO et al., 2010), quando os fatores genéticos, climáticos, edáficos e de manejo são adequados.

Dentre os fatores que afetam a produtividade, o manejo inadequado da fertilidade do solo é um dos principais causadores da baixa produtividade no país e no estado de Minas Gerais, o que se deve principalmente, à falta de informações sobre as exigências e o manejo nutricional da cultura (MARTINEZ et al., 2003; GUIMARÃES; REIS, 2010).

O cafeeiro possui elevada exigência nutricional, uma vez que se trata de uma planta perene e de porte arbustivo, sendo o período reprodutivo o de maior requerimento pelas plantas (MALAVOLTA et al., 2002; LAVIOLA, 2004).

Dentre os nutrientes requeridos pelo cafeeiro, N e K são de longe os mais exigidos, tanto na fase de formação, garantindo o crescimento vegetativo

da planta, quanto nas fases de florescimento e enchimento de grãos. Na sequência de ordem de exigência, tem-se o Ca e o Mg. Já o P e o S, são os macronutrientes menos exigidos pelo cafeeiro, tendo o P maior importância na fase de formação do cafezal, fase esta em que o sistema radicular ainda é pouco desenvolvido, o que restringe a absorção desse elemento cujo transporte se dá por difusão (NOVAIS et al., 2007; MARTINEZ; NEVES, 2015).

A exigência de N, P, K, Ca e Mg aumentam intensamente à medida que a planta se desenvolve, sendo de forma marcante aos 2,5 e 3,5 anos de idade, em função do início da produção de grãos, tendo-se a seguinte ordem de exigência, $N > K > Ca > Mg > S > P$ (MORAES; CATANI, 1964; CATANI et al., 1965; CORRÊA et al., 1986).

Já Chaves (1982) em estudo de extração de nutrientes pelos frutos da variedade Catuaí aos cinco anos de idade, desde sua formação até à completa maturação, obteve a seguinte ordem de extração: $K > N > Ca > Mg > P > S > Mn > B > Cu > Zn$.

Os micronutrientes, apesar de serem exigidos em menores quantidades pelas plantas, são tão importantes quanto os macronutrientes para a nutrição equilibrada do cafeeiro. Os mais requeridos pela cultura são B, Cu, Fe, Mn e Zn, sendo essenciais para o crescimento, desenvolvimento e produção do cafeeiro. O B e o Zn são os micronutrientes que mais podem limitar a produção, pelo fato dos solos em que se cultiva o cafeeiro, na grande maioria, serem de elevado grau de intemperismo em que a deficiência destes elementos são marcantes. (MALAVOLTA, 1993).

Segundo Matiello et al. (2010), para cada saca de café produzida, o cafeeiro adulto e produtivo necessita de 6,20 kg de N, 0,26 kg de P, 4,92 kg de K, 2,14 kg de Ca, 1,14 kg de Mg, 0,30 kg de S, 110,0 g de Fe, 10,0 g de Mn e Zn, 8,8 g de Cu e 6,5 g de B, podendo estes valores, em média, serem utilizados para se estimar a necessidade de nutrientes pela planta, uma vez que a demanda de nutrientes varia com a carga pendente de frutos.

A crescente busca por cultivares mais produtivas, a adoção de sistemas de plantios mais adensados, somada à expansão da cafeicultura para regiões de solos ácidos e de baixa fertilidade natural e a necessidade de incremento de produtividade para manter a viabilidade econômica da cultura, tem

proporcionado aumento da dependência de insumos como fertilizantes. Diante disso, tornam-se cada vez mais necessárias, pesquisas voltadas para nutrição adequada das plantas, contribuindo assim para manter a atividade cafeeira mais competitiva, pelo aumento da produtividade (GUIMARÃES; REIS, 2010; AMARAL et al., 2012).

O uso de fertilizantes minerais constituem uma parcela considerável dos custos de produção de café, fato que torna cada vez mais intensa a necessidade de monitoramento do estado nutricional das lavouras, mediante análise química das folhas, com vistas a recomendações de adubações mais equilibradas e economicamente mais ajustadas (BATAGLIA et al., 2004), bem como, tradicionalmente, por análises químicas de solo, em que são identificados a existência de limitações edáficas, ligadas à fertilidade, que possam comprometer o desenvolvimento da cultura (BALIGAR; FAGERIA, 1998; GUIMARÃES et al., 2011).

As recomendações de adubação, baseadas unicamente na análise de solo e nas tabelas de adubação, tem sido muito importante para obtenção de ganhos de produtividade na cafeicultura (RAIJ, 2006). Porém, o teor disponível de um determinado nutriente obtido pela análise de solo, muitas das vezes, não representa a quantidade que pode ser absorvida pela planta (CANTARUTTI et al., 2007), e não considera os fatores pertinentes à planta e ao ambiente, que são determinantes da produtividade vegetal (MEURER, 2007).

A avaliação do estado nutricional das plantas pela análise do tecido foliar, por sua vez, permite obter o status nutricional da planta em dado momento, sendo possível verificar ocorrência de deficiências, suficiência ou toxidez de nutrientes (KURIHARA et al., 2005; CANTARUTTI et al., 2007).

Desta forma, o diagnóstico foliar permite uma avaliação mais refinada do estado nutricional da planta e também pode-se identificar fatores que possam estar limitando a produtividade da cultura, além de servir de orientação quanto ao ajuste ou redirecionamento do programa de adubação, visando corrigir desequilíbrios nutricionais no sentido de melhorar a produtividade da cultura (MALAVOLTA et al., 1997; CANTARUTTI et al., 2007; WADT, 2011; AMARAL et al., 2012)

1.1 – Uso da análise foliar no cafeeiro

A avaliação do estado nutricional das plantas geralmente tem se baseado na análise do tecido foliar. Tal prática permite manejar a fertilização da cultura, tomando como base não apenas a análise do solo, mas, manejar o sistema em consonância com o atual estado nutricional da cultura (FONTES, 2006).

A análise de tecidos utilizando teores de nutrientes nas folhas, para avaliar o estado nutricional de plantas, foi proposta inicialmente por Lagatu e Maume (1934), sendo baseada no pressuposto de que, dentro de certos limites, existe uma relação entre o suprimento de nutrientes, seja pelo solo ou pelo adubo, e o teor foliar de nutrientes, e que aumentos ou decréscimos nesses teores se relacionam com produções mais altas ou mais baixas, respectivamente (BATAGLIA; SANTOS, 2001), e pelo fato, também, da própria planta ser o extrator do nutriente do solo.

As folhas recém-maduras são os principais órgãos vegetativos da planta para onde os nutrientes absorvidos pelas raízes são transportados, pois são os locais responsáveis pela produção de carboidratos e pela fotossíntese, e respondem, mais rapidamente, às variações no suprimento de nutrientes, seja pelo solo ou pelos fertilizantes (MEAD, 1984; MALAVOLTA et al., 1997).

A composição mineral dos tecidos vegetais é influenciada por uma série de fatores que interagem entre si, fatores estes, que estão relacionados à própria planta e, ou ao ambiente, tais como, a espécie vegetal, variedade ou porta-enxerto, idade da planta e da folha amostrada, distribuição, volume e eficiência do sistema radicular, produção pendente de frutos, estado fitossanitário da planta, variações climáticas, disponibilidade de água e nutrientes no solo, práticas culturais, manejo do solo e interações entre nutrientes (MILLS; JONES JUNIOR, 1996; MALAVOLTA, 2006).

Malavolta (2006) cita que os primeiros relatos de uso da análise foliar na cultura do cafeeiro são de Hehner (1874), tendo-se no Brasil, iniciado o seu uso a partir de estudos realizados no Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), em 1954, o que demonstrou ser uma importante ferramenta na diagnose nutricional do cafeeiro (HIROCE, 1982).

Quanto aos critérios de amostragem de folhas na cultura do cafeeiro, Malavolta et al. (1997) e Martinez et al. (1999), recomendam coletar o 3º ou 4º par de folhas, a partir da extremidade de ramos produtivos, à meia-altura do cafeeiro, no período que antecede a fase de expansão rápida dos frutos, na época de 'chumbinho', fase em que as alterações nos teores foliares de macronutrientes são mínimas já que a demanda metabólica pelos frutos ainda é baixa (LAVIOLA, 2004), e esta, geralmente coincide, no Brasil, com os meses de novembro, dezembro ou janeiro.

Após a amostragem, processamento e realização das análises químicas das folhas, obtêm-se os resultados, que podem ser interpretados por diversos métodos que, tradicionalmente, são utilizados para diagnosticar o estado nutricional das plantas, tais como: o método do nível crítico; as faixas críticas ou de suficiência (MALAVOLTA; CRUZ, 1971; ESCANO et al., 1981), os quais possuem valores definidos na literatura; Índices Balanceados de Kenworthy – IBK (KENWORTHY, 1961); o Sistema Integrado de Diagnóstico e Recomendação – DRIS (BEAUFILS, 1973); Diagnóstico de Composição Nutricional – CND (PARENT; DAFIR, 1992) e Chance Matemática – ChM (WADT, 1996).

No manejo adequado da nutrição de uma lavoura cafeeira é indispensável a adoção de um sistema de diagnóstico nutricional das plantas, via análise foliar, e por se tratar de uma cultura de ciclo perene, tem-se a possibilidade de redirecionamento do programa de adubação adotado, (MENDES et al., 1995; GUIMARÃES et al., 2011)

Entretanto, os diversos métodos diagnósticos constantes na literatura, não nos fornecem diretamente, informações acerca de quantidades de doses de nutrientes que devem ser fornecidas às plantas (WADT, 2011).

Por outro lado, uma revisão feita nos principais manuais de recomendação de adubação e calagem utilizados no país, como o Boletim 100 para o estado de São Paulo (RAIJ et al., 1997), 5ª Aproximação para o estado de Minas Gerais (RIBEIRO et al., 1999), e o Manual de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina (TEDESCO et al., 2004), evidenciou-se que apenas para nitrogênio, no Boletim 100 e na 5ª Aproximação, são utilizados os resultados de análise foliar como critério de recomendação de doses de N para as culturas do milho, café e citros.

Para o café, por exemplo, uma cultura com alta exigência quanto ao N, as doses desse nutriente são ajustadas em função da produtividade esperada ou almejada e pelo teor foliar de N, integrando, portanto, o estado nutricional da planta, que em última análise, reflete a disponibilidade do nutriente no solo, com a produção pendente de frutos de café (CANTARELLA, 2007) (Quadro 1).

Quadro 1. Doses de nitrogênio recomendadas para cultura do café em função da produtividade esperada e do teor foliar de N

Produtividade esperada	Teor foliar de N (g/kg)		
	< 25	26-30	31-35
sc/ha	Doses de N (kg/ha)		
< 20	200	140	80
20-30	250	175	110
30-40	300	220	140
40-50	350	260	170
50-60	400	300	200
> 60	450	340	230

Fonte: Extraído de Guimarães et al. (1999)

No ajuste de recomendação de adubação para macronutrientes como P, K, Ca, Mg, S, e micronutrientes, poderia ser utilizada esta mesma abordagem utilizada para o N, já que nos estudos de calibração de métodos de análises, com condições controladas em que se varia apenas o nutriente em estudo e os demais são controlados e mantidos constantes, define-se a resposta da planta à adição do nutriente no solo (ALVAREZ V., 1996; KURIHARA et al., 2005; WADT, 2011).

Na etapa de calibração são conduzidos experimentos em condições de campo nos quais há atuação de todos os fatores determinantes da produtividade, principalmente aqueles que atuam sobre a fertilidade do solo e nutrição da planta (CANTARUTTI et al., 2007).

Dessa maneira, é possível determinar para cada faixa de aplicação do nutriente no solo, qual seria seu provável teor no tecido vegetal, tomado como referência (WADT; ALVAREZ V., 2005; WADT, 2011).

Todavia, em lavouras comerciais, existem vários fatores interferindo simultaneamente na taxa de acúmulo de nutrientes e na produção de massa de

matéria seca, fatores que não podem ser controlados (FAGERIA et al., 1991; CORRÊA et al., 2007), o que torna inviável o ajuste nas doses de nutrientes que por ventura serão aplicados, a partir do estado nutricional das plantas (WADT, 2011).

Não obstante, métodos como o da Linha de Fronteira que aliada a uma nova abordagem de análise da relação planta-solo, o método do Diagrama de Quadrantes do Relacionamento Planta-Solo (DQRps), são ferramentas úteis para contornar esse problema, visando assim, aprimorar o uso da análise foliar para ajuste da recomendação de adubação para a cultura do cafeeiro.

1.2 - Método da Linha de Fronteira (LF)

Quando se trabalha com um banco de dados obtidos em condições não controladas, pode-se fazer uso da abordagem da Linha de Fronteira (LF), método este, proposto inicialmente por Webb (1972). Por esse método, considera-se que a linha que define o melhor desempenho na população encontra-se na borda de qualquer corpo de dados, por isso comumente chamado de “Boundary Line”, e ocorre sempre que existe uma relação de causa-efeito entre duas variáveis.

Esta linha representa o efeito limitante da variável analisada, considerada como independente (x) sobre a variável considerada como dependente (y) e, dessa forma, pode-se assumir que todos os valores abaixo desta região de fronteira resultam da influência de outras variáveis ou da combinação destas que por ventura estejam limitando a variável dependente.

Para a definição da linha de fronteira de um conjunto de dados, constroem-se gráficos bidimensionais das variáveis em estudo ($y = f(x)$), em que estes são apresentados como uma matriz de pontos, e são selecionados os pontos y_x da margem superior da nuvem de dados, sendo estes, denominados de linha de contorno ou de fronteira (WEBB, 1972).

Esta linha, descreve o rendimento mais elevado da gama de valores observados. Os demais pontos da matriz abaixo da linha de fronteira são explicados por outros fatores ou a interação destes, modificando a relação de y em função de x (Figura 1).

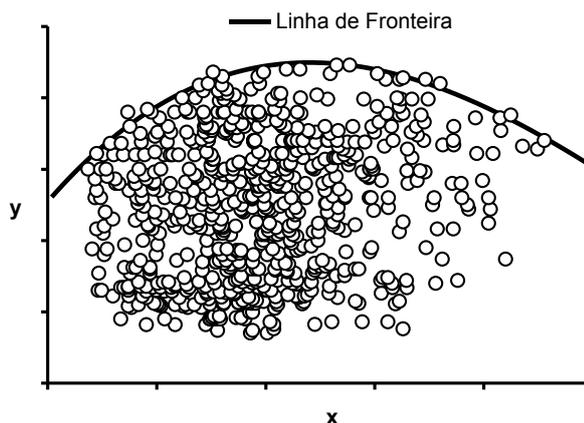


Figura 1. Representação da linha de fronteira da relação entre duas variáveis, y em função de x.

Esta abordagem foi originalmente utilizada para determinar os teores críticos e o balanço de nutrientes em modelos de diagnóstico de plantas (MØLLER NIELSEN; FRIJS-NIELSEN, 1976; WALWORTH et al., 1986). Já Evanylo (1987) utilizou o método da LF para estabelecer os níveis críticos de nutrientes do solo para a produção da cultura da soja nos Estados Unidos.

Fernandes (2010) e Borges (2012) obtiveram faixas de suficiência de teores foliares de nutrientes para a cultura do eucalipto, utilizando para isso, o método da LF, que permitiu isolar os efeitos de fatores não nutricionais, dando um maior significado biológico às faixas que melhor refletiram com a produtividade. Oliveira (2010), relata que relacionando a produtividade de eucalipto com o índice “S”, um indicador da qualidade física e estrutural do solo, pelo uso da LF, determinou-se faixas de valores de índice “S” associadas a classes de qualidade física do solo para a cultura do eucalipto.

Recentemente a LF têm sido amplamente utilizada em estudos para entender e identificar os fatores de redução de produtividade em diversas regiões e estimar o potencial de melhoria do rendimento das culturas (FERMONT et al, 2009; WAIREGI et al, 2010).

Wang et al. (2015) utilizando o método da análise de LF para avaliar a importância relativa de fatores de produção, de forma individual, e a contribuição destes na redução da produção de café arábica (*Coffea arabica* L.) e robusta (*Coffea canephora* Pierre ex Froehn) em regiões produtoras da África, verificaram que dentre os fatores de produção, a fertilidade do solo foi a

limitação preponderante em quase todas regiões, sendo sugerido a implementação de uma gestão integrada para melhoria das condições químicas dos solos de forma a se elevar a produtividade do cafeeiro nessas regiões.

O uso da LF possui a vantagem de se trabalhar com uma base de dados oriunda de condições de campo, podendo-se obter normas específicas de um determinado fator para uma região específica; a possibilidade de identificar uma única variável limitante da produtividade. No entanto, a LF possui a desvantagem de difícil elaboração de uma linha de fronteira de um corpo de dados que explique o fenômeno em estudo, já que existem poucos softwares disponíveis que auxiliem na sua determinação, o que tem levado, muitas das vezes, às mesmas serem desenhadas à mão, tornando a abordagem arbitrária, o que tem dificultado a sua aceitabilidade científica (SCHMIDT et al., 2000).

Outra desvantagem é que as LF não fornecem informações da ação conjunta do fator em estudo com os demais; e a dependência da localização da linha de fronteira de relativamente poucos pontos de dados pode limitar o estudo (SHATAR; McBRATNEY, 2004).

1.3 – Método Diagrama de Quadrantes do Relacionamento Planta-Solo (DQRps)

O Diagrama de Quadrantes do Relacionamento Planta-Solo (DQRps) trata-se de um método que tem como propósito separar conjuntos de pontos (yx) a partir de uma nuvem de dados, plotados em um sistema de coordenadas cartesiano, variável dependente (eixo das ordenadas, y) em função da variável independente (eixo das abscissas, x).

Na figura 2 é apresentado um esquema geral do princípio do método do DQRps, que consiste na elaboração de um diagrama de quatro quadrantes (I, II, III e IV) sobre a nuvem de pontos do relacionamento entre duas variáveis, y em função de x.

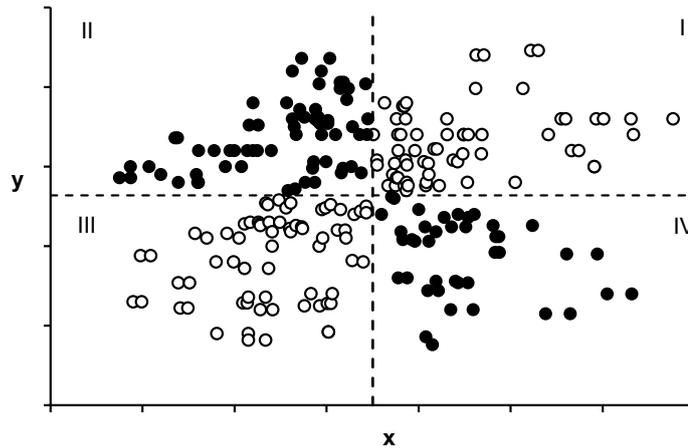


Figura 2. Representação esquemática do Diagrama de Quadrantes do Relacionamento Planta-Solo (DQRps), y em função de x.

Para o estudo das inter-relações entre os teores foliares de nutrientes em uma planta em função dos teores disponíveis no solo, a obtenção da linha tracejada horizontal perpendicular ao eixo das ordenadas (y), é utilizada a média aritmética ($\bar{y} = \sum Y_i/n$) dos teores foliares de nutrientes na folha diagnóstica da planta.

Para a obtenção da linha tracejada vertical, como critério de separação dos quadrantes, pode ser utilizado o nível crítico de nutrientes no solo, que corresponde à concentração do nutriente disponível necessária para atingir a produção de máxima eficiência econômica (ALVAREZ V., 1996), presentes nas tabelas de recomendação de adubação ou determinado por outras formas, como por exemplo, utilizando a abordagem da linha de fronteira.

A fundamentação teórica para este tipo de estudo, parte do pressuposto de que as lavouras presentes no quadrante II do diagrama (Figura 2) estão sob o efeito de concentração do nutriente nos tecidos da planta em função, por exemplo, de uma baixa produtividade, enquanto as lavouras presentes no quadrante IV, o inverso, baixos teores de nutrientes no tecido foliar, ou seja, um efeito de diluição atrelado a altas produtividades.

Para as lavouras presentes no quadrante III, os teores foliares de nutrientes respondem bem aos níveis crescentes dos nutrientes no solo, com resposta consequente na produtividade. Da mesma forma, as lavouras presentes no quadrante I, que ainda apresentam uma resposta do teor foliar

com aumento do nutriente no solo, porém, com tendência a um “plateau”, representam a região correspondente ao consumo de luxo dos nutrientes.

Dessa forma, os quadrantes III e I representam o relacionamento planta-solo do teor do nutriente de forma análoga a lei de Mitscherlich conhecida também pela lei dos incrementos decrescentes no que se refere aos acréscimos não proporcionais da produtividade, em função de doses crescentes de um nutriente no solo (TISDALE; NELSON, 1975; RAIJ, 1981; ALVAREZ V., 1985).

A partir destes grupos de pontos (yx) dos quadrantes III e I, é possível, realizar um ajuste matemático e obter curvas de resposta foliar de nutrientes em função da disponibilidade de nutrientes no solo.

Dessa maneira, tendo em vista as diferentes aplicabilidades dos métodos de análise numérica descritos acima (LF e DQRps), e dispondo-se de um banco de dados, torna-se possível o estudo das inter-relações entre a produtividade de frutos de café arábica com a análise química foliar do cafeeiro e com a disponibilidade de nutrientes no solo, com vistas a poder contribuir para o aprimoramento no ajuste das recomendações de nutrientes de forma que a cultura expresse o seu máximo potencial produtivo.

Constituem objetivos deste trabalho: obter curvas do relacionamento entre a produtividade relativa de frutos de café arábica e teores de disponíveis de nutrientes no solo, utilizando a abordagem da linha de fronteira; com base no Diagrama de Quadrantes do Relacionamento Planta-Solo, gerar curvas de resposta foliar de macronutrientes em função dos teores disponíveis no solo e estimar faixas de suficiência foliar de macronutrientes na folha-índice do cafeeiro; delinear um sistema de ajuste de doses de macronutrientes para a cultura do café arábica no estado de Minas Gerais, que integre o uso da análise foliar com a análise química do solo.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Características do banco de dados

Para realização do trabalho foi utilizado um banco de dados contendo informações sobre análises físicas e químicas dos solos e de teores foliares de nutrientes em lavouras cafeeiras das regiões do Cerrado (Patrocínio), Sul de Minas (Guaxupé e São Sebastião do Paraíso) e Zona da Mata (Manhuaçu e Viçosa), regiões estas, consideradas representativas no cultivo do cafeeiro no estado de Minas Gerais.

A localização das lavouras bem como os procedimentos de amostragem de solo e de folha e respectivos preparo e análises laboratoriais, apresentados nos parágrafos a seguir, constam em Menezes (2001) e Alves (2012).

Foram selecionadas lavouras em cada região, definindo-se as unidades amostrais (UA), e amostradas 44 lavouras em Patrocínio, 30 em Guaxupé, 17 em São Sebastião do Paraíso, 36 em Manhuaçu e 41 lavouras em Viçosa, totalizando 168 unidades amostrais (UA) nas cinco regiões referidas, entre os anos de 1996 e 1999, compreendendo três anos agrícolas, 96/97, 97/98 e 98/99.

Na definição das unidades amostrais (UA), em cada propriedade, selecionaram-se talhões homogêneos quanto à forma de cultivo; sem a utilização de irrigação (sistema de sequeiro); à população de plantas por hectare (3 000 a 5 000 pl/ha); cultivar (Catuaí); à idade da lavoura (plantas de 5 a 9 anos); textura do solo; às práticas de adubação, correção do solo; ao controle de pragas e doenças; declividade do terreno e com registro da produtividade nas últimas duas ou três safras.

O tamanho de cada UA variou de 0,5 a 1,0 ha; e estas foram devidamente demarcadas com o auxílio de estacas, sendo elaborado um croqui para localização das mesmas, e o produtor comprometeu-se de colher, separadamente a UA e anotar sua produtividade nas duas safras seguintes. Cabe ressaltar que, para cada UA foi preenchido um questionário de informações sobre histórico e produtividade.

As amostras de solos foram retiradas sob a copa das plantas (“saia do café”), local onde geralmente se fazem as adubações, e coletadas, quando as

plantas se encontravam nas fases fenológicas entre o florescimento e chumbinho, com pelo menos um mês de intervalo após eventuais adubações ou pulverizações. Para a retirada das amostras contou-se com o auxílio das cooperativas como COOXUPÉ e COOPARAÍSO, da empresa Heringer Fertilizantes e órgãos de pesquisa e extensão rural como EPAMIG e EMATER-MG.

Foram coletadas amostras nas camadas 0-5, 5-20 e 20-50 cm, sendo cada amostra composta de 20 amostras simples, coletadas em 20 pontos diferentes da UA. Após a homogeneização das amostras simples, uma porção de aproximadamente 0,5 dm³ do material, devidamente identificado e acondicionado em saco plástico, foi enviado ao laboratório de análises de rotina do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa, em que foram determinados, conforme métodos rotineiros, textura do solo, pH-H₂O, matéria orgânica do solo (MOS), P, K, Ca²⁺, Mg²⁺, Al³⁺, H + Al, Cu²⁺, Zn²⁺, Mn²⁺ e Fe³⁺.

As amostragens foliares foram realizadas quando os frutos estavam na fase de chumbinho, fase compreendida entre o florescimento e a primeira fase de expansão rápida dos frutos, especificamente nos meses de novembro a meados de janeiro, retirando-se folhas recém-maduras, com pecíolos, do 3° ou 4° pares de folhas, a partir do ápice do ramo, à meia altura das plantas, e em todas as faces de exposição cardinal. Em cada UA, foram escolhidas 20 plantas ao acaso, e em cada planta retiraram-se quatro folhas, totalizando 40 pares de folhas por talhão homogêneo.

As coletas das amostras foliares foram realizadas no período entre 6 e 10 h da manhã, sendo estas lavadas com água corrente e enxaguadas com água filtrada, acondicionadas em sacos de papel e enviadas ao laboratório de Nutrição Mineral de Plantas da Universidade Federal de Viçosa. As amostragens foram realizadas 20 a 30 d após eventuais adubações, com as devidas anotações de identificação, localidade, época de amostragem, adubação que havia sido realizada e os nutrientes a serem analisados.

As amostras de folhas, enviadas ao laboratório, foram submetidas à secagem em estufa de circulação forçada de ar, a 70-75 °C, até peso constante, e após a secagem, o material foi submetido à moagem, em moinho

tipo Wiley com malha de 20 mesh (0,85 mm), mineralizações e análises, conforme métodos rotineiros, obtendo-se os teores de N, P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Zn e Mn.

2.2 - Análise de dados e relacionamento da produtividade do cafeeiro com os teores de MOS e de macronutrientes no solo pelo método da LF

De posse da base de dados, fez-se a separação das lavouras quanto à produtividade observada, em cada UA, devido à bienalidade de produção da cultura do cafeeiro, sendo consideradas para este estudo, apenas aquelas referentes aos anos agrícolas que apresentaram maior produtividade, partindo-se do princípio de que plantas mais produtivas estão sob condições ótimas de produção e nutrição. Em seguida, fez-se uma análise de consistência dos dados das análises químicas do solo e das folhas das plantas, assim como da produtividade, que apresentou distribuição normal ($p = 0,0643$), e produtividades variando de 17,0 a 102,7 sc/ha, com média de 48,4 sc/ha. (Figura 3).

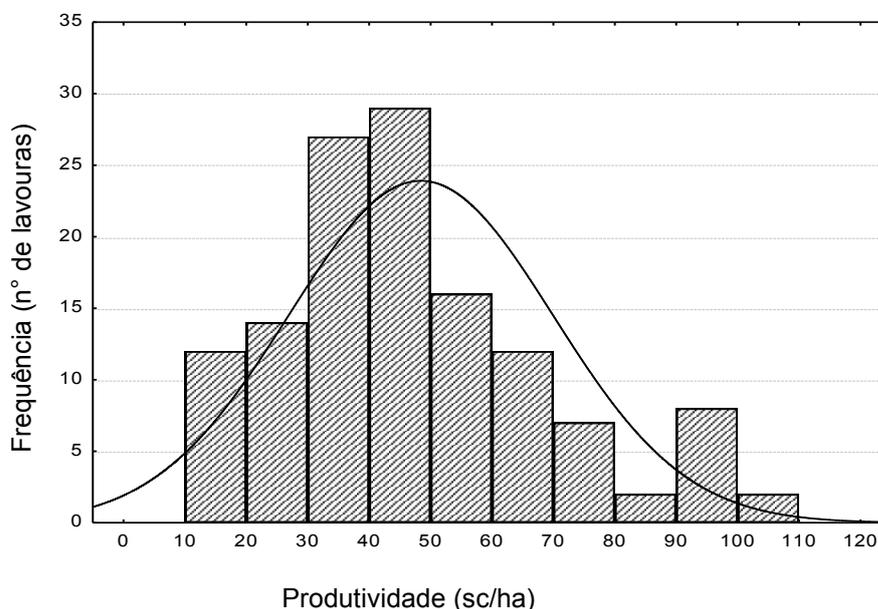


Figura 3. Distribuição de frequência de produtividade (sc/ha) das lavouras de café arábica nos anos de alta produção. $X \sim N(48,414; 21,526)$.

Após isso, realizaram-se os seguintes procedimentos: com os valores obtidos dos teores dos nutrientes na análise química do solo, na camada 0-5 e 5-20 cm, foi calculada uma média ponderada dos nutrientes nestas duas profundidades, obtendo-se um único valor de teores para a profundidade de 0-20 cm.

Em seguida, confeccionaram-se gráficos de dispersão relacionando a produtividade relativa de frutos, nos anos de alta produção, PRF (em %, em que produtividade relativa = produtividade de cada lavoura/ produtividade da lavoura mais produtiva x 100), no eixo vertical (y), com os teores de MOS, P, K Ca e Mg nas profundidades de 0-20 e de 20-50 cm, eixo das abscissas (x).

Foi utilizada a abordagem da linha de fronteira, que fornece uma relação ótima entre a PRF e os teores de MOS e dos macronutrientes no solo. Para isso, utilizou-se o software Boundary Fit, em desenvolvimento na Universidade Federal de Viçosa (UFV), para seleção dos pares yx , definidores da população superior quanto a PRF (y) para cada x (teor no solo) da nuvem de pontos.

Na sequência, para a definição da linha de fronteira superior (LFS) do relacionamento, a qual expressa o efeito isolado de cada nutriente no solo sobre a PRF, foram ajustadas equações aos pares de dados, sendo selecionada a equação de melhor ajuste. Na seleção do melhor modelo foram utilizadas as estatísticas: Coeficiente de determinação (R^2) e Erro padrão da estimativa (EPE), sendo também calculado o Quadrado médio do resíduo (QMR).

Uma vez obtidas as respectivas equações, foram calculados os níveis críticos e ótimos de MOS, P, K, Ca e Mg no solo, correspondentes a 90 % e 100 % da PRF estimada, respectivamente. Para determinação dos níveis ótimos calculou-se a primeira derivada das equações da LFS igualando-se a mesma a 0 ($dy/dx=0$), em seguida estimou-se à máxima PRF (100 %) a partir dos níveis ótimos. Quanto aos níveis críticos, multiplicando-se a máxima PRF por 0,90, e substituindo tais valores nas equações da LFS, obtiveram-se os teores correspondentes a 90 % da máxima PRF.

2.3 - Relacionamento dos teores de macronutrientes na folha-índice do cafeeiro com os teores de matéria orgânica e macronutrientes no solo pelo método do DQRps

Os teores foliares de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S) na folha diagnóstica do cafeeiro, nos anos de alta produção, e seus respectivos teores disponíveis de nutrientes no solo na camada de 0-20 cm, foram plotados nos eixos y e x, respectivamente, do sistema de coordenadas cartesiano; para os teores foliares de N e S o relacionamento foi feito em função do teor de matéria orgânica do solo (MOS).

Em seguida, foi utilizado o método do diagrama de quadrantes do relacionamento planta-solo (DQRps), em que na nuvem de pontos do relacionamento entre o teor foliar de macronutrientes em função dos teores de matéria orgânica e macronutrientes no solo, foram traçadas linhas tracejadas horizontais e verticais perpendiculares aos eixos das ordenadas e das abscissas, respectivamente, de forma a separar a população de pontos em quatro quadrantes (I, II, III e IV).

O balizador utilizado para traçar a linha tracejada horizontal, perpendicular ao eixo das ordenadas (y), foi a média dos teores foliares na folha-índice das lavouras de café arábica. Já para a linha vertical, perpendicular ao eixo das abscissas (x), foram utilizados os níveis críticos de MOS e de macronutrientes na camada de 0-20 cm, determinados pelo método da linha fronteira, conforme explicado no item 2.2.

Para a determinação da curva de resposta foliar em função dos teores de matéria orgânica e macronutrientes no solo, foram considerados apenas os quadrantes III e I, partindo-se do pressuposto de que estes são os quadrantes positivos, ou seja, aqueles em que há resposta positiva do teor foliar de nutrientes, e conseqüentemente da produtividade.

Aos pares de pontos (yx) das populações de lavouras presentes nos quadrantes III e I, foram ajustas equações de regressões de forma a obter aquela que melhor expresse a curva de resposta foliar de nutrientes, e para seleção do melhor modelo foram utilizadas as estatísticas Coeficiente de determinação (R^2) e Erro padrão da estimativa (EPE).

Para determinar as faixas de suficiência foliar dos macronutrientes, os níveis críticos e ótimos da MOS e dos macronutrientes no solo na camada de 0-20 cm, obtidos pela LF, foram substituídos nas equações do DQRps, de modo a estimar as faixas suficientes na folha-índice do cafeeiro. Essas faixas foram confrontadas com aquelas constantes na literatura consideradas ideais para o cafeeiro (MILLS; JONES JUNIOR, 1996; MALAVOLTA et al., 1997; MATIELLO, 1997; GUIMARÃES et al., 1999; MARTINEZ et al., 2003).

2.4 - Análise foliar para ajuste da recomendação de adubação do cafeeiro

Visando a adoção do uso da análise foliar como uma ferramenta capaz de aprimorar a recomendação de doses de nutrientes para a cultura do cafeeiro, integrando assim o estado nutricional das plantas com a capacidade de suprimento de nutrientes pelo solo, foi feita, a título de exemplo, para N, P e K, uma simulação de recomendação de adubação com base no resultado de uma análise de solo e foliar, utilizando a seguinte abordagem:

$$drNu_i = \left[\frac{(ncNu_i-Ex - tdNu_i-Ex)}{trNu_i-Ex} \right] \times 2, \text{ em que:} \quad \text{Eq. 1}$$

drNu_i = Dose recomendada do nutriente (kg/ha);

ncNu_i-Ex = Nível crítico do nutriente no solo (mg/dm³);

tdNu_i-Ex = Teor disponível do nutriente na análise de solo (mg/dm³);

trNu_i-Ex = Taxa de recuperação do nutriente pelo extrator utilizado na análise de solo (mg/dm³/ mg/dm³);

2 = Fator de conversão (mg/dm³) para (kg/ha, considerando a camada de 0-20 cm de profundidade do solo).

Os níveis críticos para K e P no solo por Mehlich-1 (*ncK-M1*; *ncP-M1*, respectivamente), na profundidade de 0-20 cm, foram determinados conforme descrito no item 2.2, pela equação da LFS que relaciona a PRF com os teores disponíveis de P e K no solo; os teores disponíveis de P e K, extraídos por Mehlich-1 (*tdP-M1*; *tdK-M1*) utilizados, foram estimados a partir de teores

foliares de P e K, conforme as simulações; as taxas de recuperação de P e K por Mehlich-1 (*trP*-M1; *trK*-M1), foram calculadas utilizando-se as equações do quadro 2, segundo o resultado do Prem apresentado pela análise de solo (STHRINGER, 2013).

Quadro 2. Equações de regressão para estimar a taxa de recuperação, pelo extrator, dos macronutrientes aplicados via fertilizante (TRext)⁽¹⁾, em função do P-rem⁽²⁾ e do teor de argila⁽³⁾

Nutriente	Extrator	Equação	R ²
P	Mehlich-1	TRext = 0,0672821 + 0,0121615** P-rem	0,681
	Resina	TRext = 0,419*** P-rem ^{0,128099}	0,694
K	Mehlich-1	TRext = 0,6555 + 0,0068** P-rem ∇ 1 ≤ P-rem ≤ 30	0,744
	Mehlich-3	TRext = 0,9863 - 0,00364*** Arg	0,763
	Resina	TRext = 0,6619+0,014355* P-rem - 0,000293° P-rem ² ∇ 1 ≤ P-rem ≤ 30	0,754
Ca	KCl 1 mol/L	TRext = 0,7661	-
Mg	KCl 1 mol/L	TRext = 0,7989	-

(1) em mg/dm³ / mg/dm³; (2) em %; (3) em mg/L. °, *, ** e *** Significativo a 10, 5, 1 e 0,1 %, respectivamente.

Fonte: Extraído de Stahringer (2013).

Para a MOS, estimou-se o teor no solo a partir de um teor foliar de N, e com base no modelo desenvolvido por Stanford e Smith (1972), adaptado para condições de solos tropicais por Stahringer (2013) com base no trabalho de Gonçalves et al. (2001):

$$N_{\text{Mineralizável}} = [2\ 000\ 000 \times Ds \times ((\text{MOS}/100/1,724)/10) \times 0,04] \times [1 - e^{-0,031 \times t}] = \text{Eq. 2}$$

$N_{\text{Mineralizável}}$ = N mineralizável da MOS (kg/ha/ano);

2 000 000 dm³ = volume de solo contido em um hectare para uma profundidade de 0-20 cm;

DS = densidade do solo (kg/dm³);

MOS = teor de MOS (dag/kg)

100 = permite calcular quantidade em kg de MOS por kg de solo;

1,724 = valor utilizado para estimar o C orgânico do solo a partir da MOS, considerando 58 dag/kg de C orgânico na MOS;

10 = valor utilizado para estimar o N orgânico, considerando uma relação C/N de 10 na MOS, relação obtida por Kiehl (1979) para os mesmos solos utilizados por Gonçalves et al. (2001);

0,04 = N potencialmente mineralizável da MOS, estimado por Gonçalves et al. (2001) para 16 solos de ecossistemas florestais naturais e implantados do Estado de São Paulo;

e = base do logaritmo neperiano;

0,031 = constante de mineralização de N média para 16 solos de ecossistemas florestais naturais e implantados do estado de São Paulo estimada por Gonçalves et al. (2001), a partir da equação de Stanford & Smith (1972);

t = tempo em semanas que a cultura absorve N. Para a cultura do café, foram considerados dois meses para enfolhamento e quatro meses para formação dos frutos (t = 24 semanas) como períodos de maior demanda de N (PREZOTTI, 2001).

Para o cálculo da estimativa do N proveniente da mineralização da MOS ($N_{\text{Mineralizável}}$), pela equação 2, foram considerados os seguintes dados hipotéticos: o teor de MOS, em dag/kg foi estimado a partir de um teor foliar de N; $D_s = 1,3 \text{ kg/dm}^3$ e t = 24 semanas.

As recomendações de adubação obtidas foram comparadas às recomendações geradas por meio do sistema "FERTI-UFV Café Arábica" (PREZOTTI, 2001), a partir de dados de análise de solo, idade e população de plantas e produtividade esperada. Estas informações foram inseridas no sistema, e confrontadas também, com as recomendações propostas no Manual de recomendações para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais – 5ª aproximação (GUIMARÃES et al., 1999), baseando-se na análise de solo e na produtividade esperada.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 - Relacionamento da produtividade relativa e dos teores de N e S na folha-índice do cafeeiro com os teores de MOS

Na Figura 4 são apresentadas as equações de regressão da linha de fronteira superior (LFS) que relacionam a produtividade relativa de frutos de café arábica (PRF) com os teores de MOS nas profundidades de 0-20 e de 20-50 cm. O modelo que melhor se ajustou ao conjunto de pontos da LFS foi curvilíneo, de natureza quadrática, tendendo a máximo, apresentando um bom ajuste com elevados coeficientes de determinação (R^2).

Derivando-se as equações da LFS da Figura 4 e igualando-se a primeira derivada a 0 ($dy/dx=0$), obtiveram-se os teores de MOS que levam à máxima PRF estimada, correspondendo aos teores ótimos de MOS, que são 52,45 e 45,71 g/kg para as profundidades de 0-20 e de 20-50 cm, respectivamente.

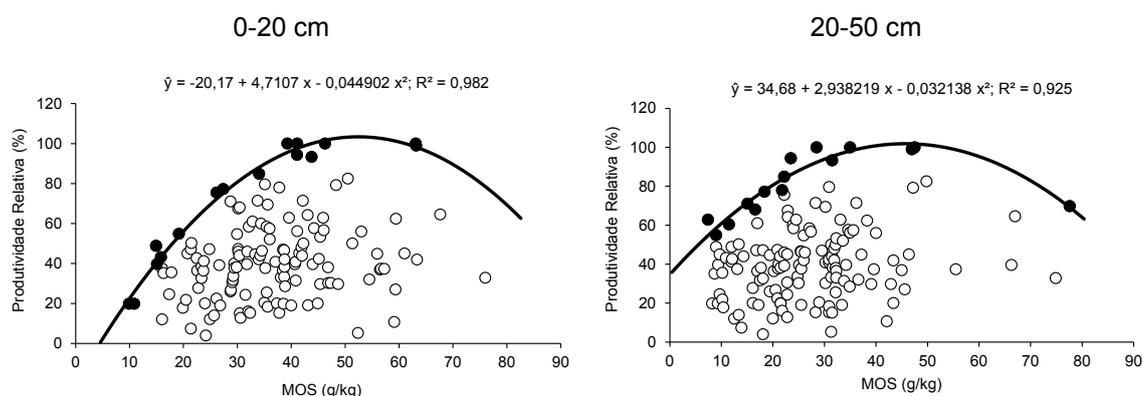


Figura 4. Produtividade relativa de café arábica no estado de Minas Gerais em função do teor de MOS nas profundidades de 0-20 e de 20-50 cm. Os modelos acima são válidos para nas seguintes faixas, de 0-20 cm $\forall 9,93 \leq x \leq 63,18$ g/kg de MOS; 20-50 cm $\forall 7,4 \leq x \leq 77,60$ g/kg de MOS.

A partir desses teores ótimos de MOS, que substituídos nas equações da LFS (Figura 4), têm-se a produtividade máxima estimada, que multiplicada por 0,90, ou seja, 90 % da máxima PRF, obteve-se os níveis críticos de MOS de 37,27 e 27,90 g/kg, nas profundidades de 0-20 e de 20-50 cm, respectivamente. Estes resultados estão de acordo com as faixas de

disponibilidade de MOS para o cafeeiro em Minas Gerais, determinadas por Alves (2012), pelo método da Chance Matemática Relativa (ChMR).

Esses mesmos teores também corroboram com os considerados adequados pela Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais - CFSEMG (ALVAREZ V. et al., 1999), de 40,1 a 70,0 g/kg de MOS.

Guimarães e Lopes (1986) e Matiello (1991), consideram teores acima de 50,0 g/kg de MOS como ideais para o cultivo do cafeeiro, estando o teor ótimo de MOS na camada de 0-20 cm, determinado neste trabalho pelo método da LF, de acordo com os critérios destes autores.

Sabe-se que, cerca de 95 % do N do solo está associado à MOS, e os compostos orgânicos representam um importante reservatório de formas de N potencialmente disponíveis para as culturas (STEVENSON, 1994; D'ANDRÉA et al., 2004; SILVA; MENDONÇA, 2007). Além disso, a MOS possui grande participação na troca catiônica, contribuindo com 20 a 90 % da CTC das camadas superficiais de solos minerais, principalmente em solos tropicais, dado o avançado grau de intemperismo, tais quais os deste estudo.

A MOS, portanto, por contribuir com a melhoria das condições físico-químicas do solo em superfície e em subsuperfície, atua nos processos de ciclagem biogeoquímica do nitrogênio (N), fósforo (P) e do enxofre (S) e de outros nutrientes (PAVAN; CHAVES, 1996), além de melhorar, também, respostas às aplicações de doses de N no solo, via fertilizantes nitrogenados.

Na Figura 5 é apresentado o relacionamento entre os teores totais de N foliar em função dos teores de MOS na camada de 0-20 cm, utilizando o método do DQRps, em que para a obtenção das linhas tracejadas, horizontais e verticais, perpendiculares aos eixos das ordenadas e das abscissas, respectivamente, foi utilizada a média dos teores foliares da folha-índice, 33,1 g/kg de N, como balizador para a linha horizontal e o nível crítico de MOS da camada de 0-20 cm, 37,27 g/kg, determinado pela LF (Figura 4) como critério de separação das lavouras pela linha vertical.

Pelo DQRps, para obtenção da curva de resposta foliar do cafeeiro em função dos teores de MOS, foram desconsiderados os conjuntos de pontos (yx), teor foliar de N e teor de MOS, para os quadrantes II e IV, com base na premissa de que as lavouras presentes no quadrante II estariam com os teores

foliares de N concentrados em seus tecidos em função de baixo crescimento e produção, e as presentes no quadrante IV, de modo inverso, apresentariam baixos teores foliares N atrelados a alto crescimento e produção. Tal comportamento de fato foi verificado. A população de lavouras do quadrante II apresentou PRF média de 39,7 % com um teor foliar médio na folha-índice de 36,6 g/kg de N, e a do quadrante IV, PRF média de 46,3 % e teor foliar de 29,7 g/kg de N.

Nas lavouras presentes no quadrante III, o teor foliar médio de N foi de 29,3 g/kg e PRF média de 35,6 %, e no quadrante I, o teor foliar médio foi de 36,7 g/kg N e a PRF média de 51,6 %. Nestes quadrantes, os incrementos nos teores de MOS levaram a aumentos nos teores foliares de N, beneficiando-se, a produtividade, desta relação.

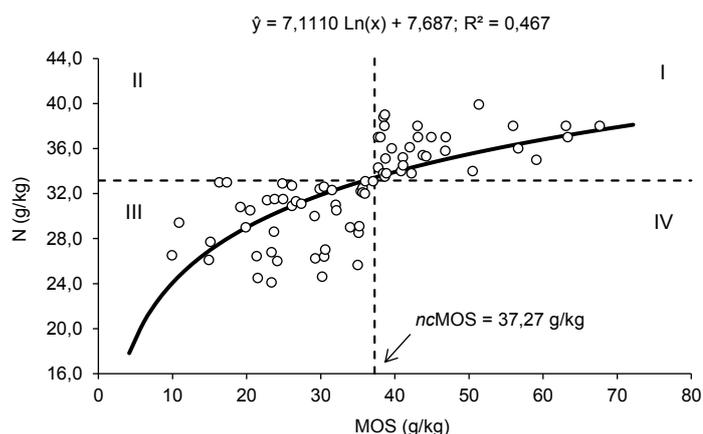


Figura 5. Equação do relacionamento entre os teores totais de N (g/kg) na folha-índice do cafeeiro em função dos teores de matéria orgânica do solo (MOS) (g/kg) na camada de 0-20 cm, obtida pelo critério do DQRps. O modelo acima é válido para uma faixa de teor de MOS de $\forall 9,93 \leq x \leq 67,65 \text{ g/kg}$.

No ajuste da equação de regressão do conjunto de pontos, teor foliar de N e teor de MOS (yx), das populações de lavouras presentes nos quadrantes III e I, o modelo que melhor se ajustou foi o logarítmico, em que aumentos crescentes dos teores de MOS, levam também a aumentos crescentes do N foliar na folha diagnóstico (Figura 5).

Cabe ressaltar que, os teores foliares de N na folha diagnóstico do café arábica e os teores de MOS não possuem uma relação tão direta, já que durante os processos de decomposição dos resíduos orgânicos, há liberação

de C, N e outros componentes simples, dos quais parte retorna à atmosfera na forma de gás, parte é imobilizada pelos microrganismos decompositores, parte permanece na forma prontamente disponível para as plantas e o restante é perdido por lixiviação ou direcionado à produção de substâncias húmicas (STEVENSON, 1985), ou seja, há uma perda durante o processo de disponibilização do N presente na MOS.

Assumindo-se que apenas o fator MOS estaria limitando de forma isolada a nutrição do cafeeiro quanto ao N foliar, pode-se inferir que aumentos dos teores de MOS, além de ser, possivelmente uma fonte de N para a absorção pelas plantas após a sua mineralização, resultam em aumentos do que seria o fator quantidade (Q) do solo, funcionando como um reservatório de nutrientes no solo.

Estimando-se a faixa de suficiência foliar ótima para N a partir do nível crítico e ótimo de MOS, 37,27 e 52,45 g/kg, respectivamente, pela equação ajustada pelo método do DQRps (Figura 5), tem-se a seguinte faixa, 33,4 – 35,8 g/kg de N, estando, portanto, coerente com as faixas de suficiência foliar de N adequadas para o cafeeiro, 23,0 – 30,0 g/kg (MILLS; JONES JUNIOR, 1996); 29,0 – 32,0 g/kg (MALAVOLTA et al., 1997; GUIMARÃES et al., 1999); 30,0 – 35,0 g/kg (MATIELLO, 1997); 25,2 – 32,8 g/kg de N (MARTINEZ et al., 2003).

Na Figura 6 é apresentado o relacionamento entre os teores totais de S na folha-índice do cafeeiro em função dos teores de MOS na camada de 0-20 cm, utilizando também o método do DQRps. Para obtenção das linhas tracejadas, horizontais e verticais, perpendiculares aos eixos das ordenadas e das abscissas, respectivamente, utilizou-se o mesmo procedimento que para N, sendo a média dos teores foliares de S, 1,39 g/kg de S, para a linha tracejada horizontal, e o nível crítico de MOS da camada de 0-20 cm, 37,27 g/kg, para a linha tracejada vertical.

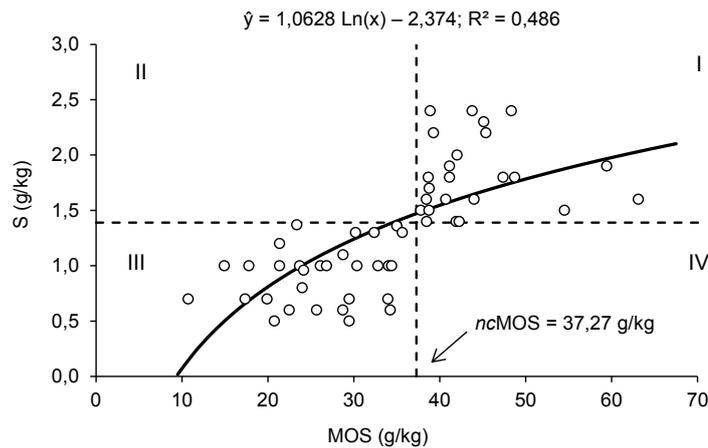


Figura 6. Equação do relacionamento entre os teores totais de S (g/kg) na folha-índice do cafeeiro em função dos teores de matéria orgânica do solo (MOS) (g/kg) na camada de 0-20 cm, obtida pelo critério do DQRps. O modelo acima é válido para uma faixa de teor de MOS de $\forall 10,73 \leq x \leq 63,10$ g/kg.

O modelo que melhor se ajustou aos dados dos quadrantes III e I, foi o logarítmico, similar ao ajustado para o N foliar, em que aumentos crescentes dos teores de MOS, levam também a aumentos crescentes dos teores de S foliar.

O S ocorre no solo em formas orgânicas e inorgânicas, sendo encontrado na maioria dos solos, predominantemente, na forma orgânica, correspondendo a mais de 90 % do S total (ALEXANDER, 1977). A capacidade do solo em suprir a demanda da planta pelo nutriente está estreitamente relacionada ao teor de MOS e sua mineralização ou decomposição, liberando assim, formas inorgânicas de sulfato (SO_4^{2-}) para a solução do solo, que poderão ser absorvidas pelas plantas (TISDALE et al., 1985; TIECHER et al., 2012).

Assim, da mesma forma que discutido para o N, a MOS pode atuar diretamente sobre a fertilidade do solo, disponibilizando nutrientes como N, P e S, após sua mineralização, além de proporcionar melhorias nos atributos físicos e biológicos do solo.

Cabe indagar se o efeito semelhante da MOS sobre os teores foliares de N e S pode estar ligado às relações N/S da matéria orgânica do solo que estão geralmente na faixa de 6 a 8:1, e são menos variáveis do que a relação C/S (TISDALE et al., 1985).

Além disso, a adição conjunta de N e S proporciona, de modo geral, maior produção das culturas, em virtude do efeito positivo da interação N x S, já que a maior disponibilidade de N contribui para elevar o teor de S na parte aérea das plantas (FERREIRA, 1986; TAMASSIA et al., 1999; ALVAREZ V., et al., 2007).

Pelo DQRPS, as lavouras presentes no quadrante II, apresentaram PRF média de 40,9 % com um teor foliar médio na folha-índice de 1,8 g/kg de S, e as do quadrante IV, PRF média de 47,1 % e teor foliar médio de 0,9 g/kg de S. De forma análoga ao N, estes resultados atendem ao pressuposto do método do DQRps, em que as lavouras presentes no quadrante II do diagrama (Figura 6) estão sob o efeito de concentração do nutriente nos tecidos, enquanto as lavouras presentes no quadrante IV, sob efeito de diluição do nutriente.

Por outro lado, as lavouras dos quadrantes III e I, apresentaram PRF média de 39,6 e 51,2 % e teores foliares médios de 0,9 e 1,8 g/kg de S, respectivamente, ou seja, o teor de S na folha-índice aumenta em função dos incrementos da MOS, até atingir um “plateau”, sendo a produtividade beneficiada dessa relação.

Ao estimar-se, a faixa de suficiência foliar ótima para S, a partir do nível crítico e ótimo de MOS, 37,27 e 52,45 g/kg, respectivamente, pela equação ajustada pelo método do DQRps (Figura 6), tem-se a seguinte faixa, 1,4 – 1,8 g/kg de S, estando, portanto coerente com as faixas de suficiência foliar de S adequadas para o cafeeiro, 1,0 – 2,0 g/kg (MILLS; JONES JUNIOR, 1996); 1,5 – 2,0 g/kg (MALAVOLTA et al., 1997; MATIELLO, 1997; GUIMARÃES et al., 1999); 1,3 – 2,5 de S (MARTINEZ et al., 2003).

3.2 - Relacionamento da produtividade relativa e dos teores de P na folha-índice do cafeeiro com os teores de P no solo

Visando obter a faixa de disponibilidade boa de P no solo para o cafeeiro em produção, correspondente ao nível crítico e ótimo de P, na Figura 7 são apresentados os relacionamentos entre a produtividade relativa de frutos (PRF) de café arábica em função do teor de fósforo relativo (PR) nas profundidades

de 0-20 e 20-50 cm.

Para o cálculo do PR, que é o teor de P em relação ao seu nível crítico, utilizou-se o nível crítico de 9,0 mg/dm³ de P, constante na tabela de recomendação de adubação para o cafeeiro em produção para o estado de Minas Gerais (GUIMARÃES et al., 1999), considerando para isto, um solo com 46 % de argila (média dos teores de argila dos solos utilizados neste estudo).

Optou-se pelo cálculo do PR, como uma forma de tentar eliminar o efeito da capacidade tampão do solo. Esse cálculo levou em consideração o teor de fósforo no solo (tP) e o seu nível crítico (NíCrí de P) e foi realizado utilizando a seguinte fórmula: $PR = 100 \times tP / NíCrí \text{ de P}$.

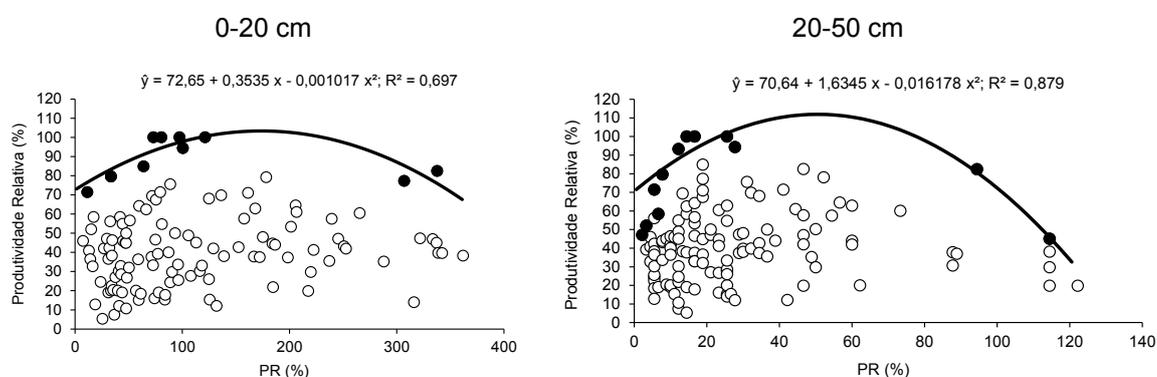


Figura 7. Produtividade relativa de café arábica no estado de Minas Gerais em função do teor de fósforo relativo (PR) no solo nas profundidades de 0-20 e de 20-50 cm. Os modelos acima são válidos para nas seguintes faixas, de 0-20 cm $\forall 11,39 \leq x \leq 337,78$ % de PR; 20-50 cm $\forall 2,22 \leq x \leq 114,44$ % de PR.

A partir dessas equações (Figura 7), é possível estimar os teores de PR que proporcionam 90 e 100 % da máxima PRF estimada, correspondentes aos níveis críticos e ótimos de P no solo, utilizando o mesmo procedimento que para a MOS (item 3.1). Na profundidade de 0-20 cm, o PR que proporcionou a máxima PRF estimada foi 173,79 %, equivalente a 15,64 mg/dm³ de P no solo, e para 90 % da máxima PRF, o PR de 82,59 %, correspondente a 7,43 mg/dm³ de P.

Essa diferença de valores de nível crítico de P no solo, ou seja, de 9,0 mg/dm³ de P segundo a CFSEMG (GUIMARÃES et al., 1999) para 7,43 mg/dm³ de P, pela LF, pode ser atribuída as diferentes populações de solos e

lavouras consideradas, aos diferentes procedimentos de cálculo e à utilização da técnica da linha de fronteira como feito neste trabalho. Porém o teor de 7,43 mg/dm³ de P, pode estar mais próximo das reais condições de cultivo de um cafeeiro em plena produção, já que trabalhos da literatura evidenciam a tendência da planta exigir menos P, à medida que se desenvolve (PREZOTTI, 2001; VALADARES et al., 2014).

Os níveis críticos de P no solo e nas plantas perenes diminuem com a idade das plantas, por estas apresentarem mecanismo de acúmulo de formas de reserva de P mais evoluído, além de associações micorrízicas, aumentando assim, a eficiência de aquisição deste nutriente (NOVAIS et al., 1982; NOVAIS; MELLO, 2007).

Possivelmente esta é uma das razões das baixas respostas do cafeeiro em produção à adubação fosfatada, sendo necessário estabelecer os níveis críticos de P para cada um dos estádios de crescimento das plantas, com vistas ao manejo racional da adubação desta cultura, suprimindo sua demanda ao longo do ciclo de cultivo (SANTOS et al., 2002; GUIMARÃES et al., 2011).

Na profundidade de 20-50 cm, o nível crítico e ótimo de P no solo estimados pela equação da LFS foi de 24,19 e 50,51 %, correspondentes a 2,17 e 4,54 mg/dm³ de P. Esse resultado reflete a baixa mobilidade de P no solo, já que os fertilizantes fosfatados são aplicados de forma superficial, sem incorporação (REIS et al., 2011; DIAS et al., 2015). Além disso, pode estar associado aos resíduos orgânicos que são depositados frequentemente nas lavouras cafeeiras, seja ela via manejo da adubação orgânica e pela ciclagem biogeoquímica do nutriente relacionada, à queda de folhas e inclusive à derrça quando das colheitas.

Na Figura 8 é apresentado o relacionamento entre teores totais de P na folha-índice do cafeeiro com os teores de fósforo relativo (PR) no solo, na camada de 0-20 cm, utilizando o método do DQRps. Para a obtenção das linhas tracejadas, horizontais e verticais, perpendiculares aos eixos das ordenadas e das abscissas, respectivamente, foi utilizado a média dos teores foliares da folha-índice, 1,6 g/kg de P, como balizador para a linha horizontal e o nível crítico de PR da camada de 0-20 cm, 82,59 %, determinado pela LF (Figura 7) como critério de separação das lavouras pela linha vertical.

O modelo exponencial foi o que melhor se ajustou aos dados dos quadrantes III e I (Figura 8). Observa-se que houve aumento dos teores de P foliar com tendência a estabilizar-se em torno de 1,7 g/kg, a partir de 427,62 % (38,48 mg/dm³ de P). Considerando uma camada de 0-20 cm, este valor corresponderia a 76,96 kg/ha de P (177 kg/ha de P₂O₅). Resultados semelhantes foram encontrados por Gallo et al. (1999), que constataram que a aplicação de doses crescentes de P, proporcionaram aumento linear nos teores foliares do nutriente na folha diagnóstico do cafeeiro até a dose máxima de 90 kg/ha de P₂O₅.

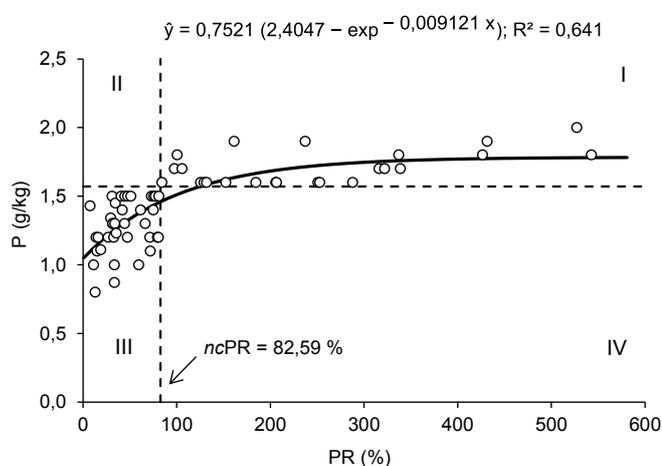


Figura 8. Equação do relacionamento entre os teores totais de P (g/kg) na folha-índice do cafeeiro em função dos teores disponíveis de fósforo relativo (PR) (%) na camada de 0-20 cm, obtida pelo critério do DQRps. O modelo acima é válido para uma faixa de teor de PR de $\forall 7,50 \leq x \leq 542,78$ %.

Reis et al. (2011) e Dias et al. (2015) verificaram aumento na concentração de P na folha diagnóstico do cafeeiro à medida que se elevou a dose de P no solo, atingindo-se em ambos os estudos uma estabilização do teor foliar de P em torno de 1,9 g/kg, para uma dose de 270 e 300 kg/ha de P₂O₅, nos respectivos trabalhos.

Ao investigar a produtividade das lavouras do quadrante II, as mesmas apresentaram PRF média de 31,9 % com um teor foliar médio na folha-índice de 2,12 g/kg de P, e as do quadrante IV, PRF média de 43,3 % e teor foliar de 1,3 g/kg de P. Já as lavouras dos quadrantes III e I, apresentaram PRF média de 49,6 e 48,0 % e teores foliares médios de 1,2 e 1,9 g/kg de P, respectivamente. Estes resultados atendem ao pressuposto de que as lavouras

presentes no quadrante II do diagrama estão sob o efeito de concentração do nutriente nos tecidos, enquanto que as lavouras presentes no quadrante IV, sob efeito de diluição do nutriente (Figura 8).

Por outro lado, as lavouras dos quadrantes III e I, apresentam um comportamento análogo ao da lei de Mitscherlich que complementa o modelo linear de Liebig, que em nível insuficiente do nutriente no solo, com o aumento progressivo do fornecimento deste, a produtividade aumenta rapidamente no início seguindo-se aumentos cada vez menores até atingir um "plateau", quando não há mais resposta a novas adições (RAIJ, 1981; PIMENTEL GOMES, 1985).

Na sequência, ao estimar-se a faixa de suficiência foliar ótima para P pela equação ajustada na Figura 8, a partir do nível crítico e ótimo de PR no solo, para profundidade de 0-20 cm, 82,59 – 173,79 % (Figura 7), obteve-se a faixa de 1,4 – 1,6 g/kg de P na folha diagnóstico do cafeeiro. Esse resultado está coerente com aqueles comumente relatados na literatura para a cultura do cafeeiro, que é de 1,2 – 2,0 g/kg (MILLS; JONES JUNIOR, 1996); 1,6 – 1,9 g/kg (MALAVOLTA et al., 1997); 1,2 – 1,6 g/kg (GUIMARÃES et al., 1999); 1,2 – 2,0 g/kg (MATIELLO, 1997); 1,1 – 1,9 de P (MARTINEZ et al., 2003).

Este resultado demonstra a importância do uso da prática de análise foliar, como instrumento da avaliação do estado nutricional na cultura do café arábica, para se avaliar a nutrição quanto ao fósforo, pois a mesma reflete a disponibilidade do nutriente no solo, servindo, portanto, para auxiliar no ajuste de um programa de adubação fosfatada.

3.3 - Relacionamento da produtividade relativa e dos teores de K na folha-índice do cafeeiro com os teores de K no solo

Com os dados da PRF e os teores de K disponível no solo, relacionaram-se os mesmos, selecionando-se, os pontos da LFS com os quais foram justadas equações de regressão, obtendo-se o modelo quadrático, como o de melhor ajuste dos dados (Figura 9).

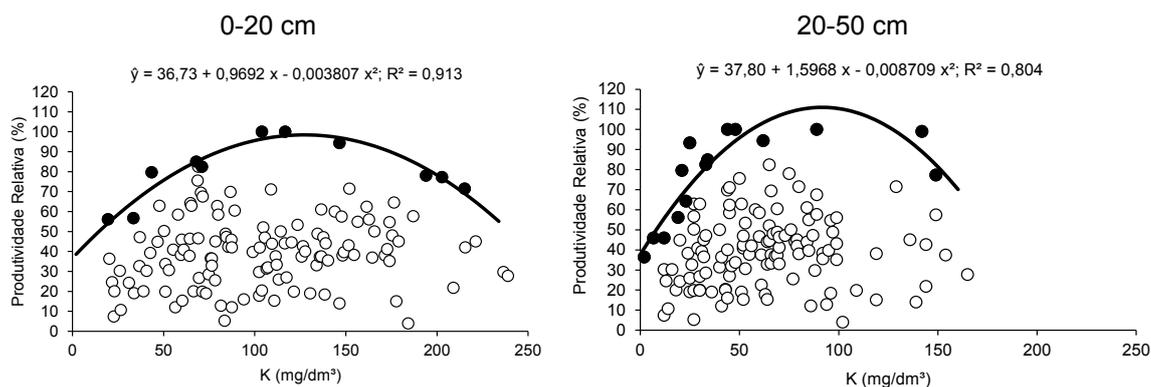


Figura 9. Produtividade relativa de café arábica no estado de Minas Gerais em função dos teores disponíveis de K no solo (mg/dm^3) nas profundidades de 0-20 e de 20-50 cm. Os modelos acima são válidos para nas seguintes faixas, de 0-20 cm $\forall 19,50 \leq x \leq 215,25 \text{ mg}/\text{dm}^3$ de K; 20-50 cm $\forall 2,00 \leq x \leq 149,00 \text{ mg}/\text{dm}^3$ de K.

Pelas equações ajustadas, obteve-se a faixa de disponibilidade dos teores de K no solo que proporcionaram a PRF de máxima eficiência econômica (90 % da PRF) e a máxima PRF estimada de café arábica (100 % da PRF), que para a camada de 0-20 foi a seguinte, 76,40 a 127,19 mg/dm^3 de K, correspondentes ao nível crítico e ao nível ótimo de K no solo. Esses teores estão dentro da faixa considerada ideal para o cafeeiro, que é de 60 a 120 mg/dm^3 de K, segundo a CFSEMG (GUIMARÃES et al., 1999).

Esses resultados, estão próximos dos obtidos por Silva et al. (2001), em que os autores obtiveram para a produção média de quatro safras da cultivar Catuaí Vermelho, aos seis anos de idade, uma faixa de 83,9 a 152,6 mg/dm^3 de K, teores correspondentes a 90 e 100 % produção máxima.

A faixa determinada neste estudo, está abaixo da faixa proposta por Malavolta (1986) para a cultura do cafeeiro, que é de 117 a 156 mg/dm^3 de K e também da faixa considerada ideal por Guimarães (1986), 112 a 150 mg/dm^3 de K para safras de alta produção do cafeeiro. Tal resultado, pode estar relacionado com o encontrado por Martinez et al. (2004), ao constatarem que em solos com baixa CTC, como os deste estudo, a produtividade do cafeeiro é determinada predominantemente pela adubação, sendo menos dependente da reserva de nutrientes no solo.

Na profundidade de 20-50 cm, a faixa de boa disponibilidade para o K no solo é de 55,97 a 91,67 mg/dm^3 de K (Figura 9).

Na Figura 10 é apresentado o relacionamento entre teores de K na folha-índice do cafeeiro com os teores de K disponíveis na camada de 0-20 cm, segundo a abordagem do DQRps.

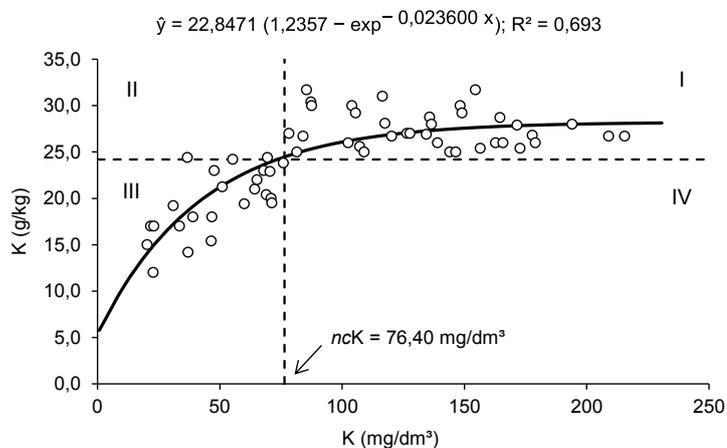


Figura 10. Equação do relacionamento entre os teores de K (g/kg) na folha-índice do cafeeiro em função dos teores disponíveis de K (mg/dm³) na camada de 0-20 cm, obtida pelo critério do DQRps. O modelo acima é válido para uma faixa de teor de K de $\forall 20,25 \leq x \leq 215,50$ mg/dm³ de K.

Para obtenção da linha tracejada horizontal foi utilizada a média dos teores de K da folha-índice, 24,2 g/kg de K, e o nível crítico de K na camada de 0-20 cm, 76,40 mg/dm³, determinado pela LF (Figura 9), como critério de separação das lavouras pela linha tracejada vertical.

Da mesma forma que para o P, o modelo exponencial foi o que melhor se ajustou aos dados dos quadrantes III e I. Observa-se que houve aumento dos teores de K foliar com tendência a estabilizar-se em torno de 28,1 g/kg a partir de 195,00 mg/dm³ de K, que considerando uma camada de 0-20 cm, corresponde a 390,00 kg/ha de K (468,00 kg/ha de K₂O).

O K é o cátion mais abundante no vegetal sendo absorvido em grandes quantidades pelas raízes (MEURER, 2006), com uma tendência de ser absorvido acima da atual necessidade da planta e o excedente, armazenado no vacúolo celular (RODRÍGUEZ-NAVARRO; RUBIO, 2006). No cafeeiro, após o N, é o elemento mais exigido, sendo esta exigência aumentada em função da idade e da produtividade, já que há uma grande demanda e acúmulo de K nos frutos (MATIELLO et al., 2010; MARTINEZ; NEVES, 2015).

Silva et al. (2001), ao avaliarem a produtividade e a resposta na nutrição foliar da cultivar Catuaí Vermelho, aos seis anos de idade, em função da aplicação de doses de três fontes de K, obtiveram respostas positivas e significativas com o teor foliar de K, sendo a produtividade beneficiada em função dessa relação.

Ao investigar a produtividade das lavouras do quadrante II, as mesmas apresentaram PRF média de 36,3 % com um teor foliar na folha-índice de 28,5 g/kg de K, e as do quadrante IV, PRF média de 41,0 % e teor foliar de 20,3 g/kg de K. De forma análoga ao N e P, estes resultados atendem ao pressuposto do método do DQRps, em que as lavouras presentes no quadrante II do diagrama estão sob o efeito de concentração do nutriente nos tecidos, enquanto que as lavouras presentes no quadrante IV, sob efeito de diluição do nutriente (Figura 10).

As lavouras dos quadrantes III e I, apresentaram PRF média de 48,0 e 46,3 % e teores foliares de 19,1 e 20,3 g/kg de K, respectivamente. Observa-se que o teor de K na folha-índice aumenta em função dos incrementos deste macronutriente no solo, até atingir um “plateau”, tendo a produtividade comportamento semelhante (Figura 10).

Com base nos teores de K, nível crítico e ótimo, na profundidade de 0-20 cm (Figura 9), ao estimar-se a faixa de suficiência foliar ótima de K na folha-índice do cafeeiro, obteve-se a seguinte faixa, 24,4 – 27,0 g/kg de K na folha, estando, portanto, dentro das faixas comumente relatadas na literatura para a cultura do cafeeiro que é de 20,0 – 25,0 g/kg (MILLS; JONES JUNIOR, 1996); 22,0 – 25,0 g/kg (MALAVOLTA et al., 1997); 18,0 – 22,0 g/kg (GUIMARÃES et al., 1999); 18,0 – 25,0 g/kg (MATIELLO, 1997); 18,0 – 33,1 g/kg de K (MARTINEZ et al., 2003).

Este resultado demonstra a importância de uso da prática da análise foliar, como instrumento da avaliação do estado nutricional na cultura do café arábica, pois a mesma reflete a disponibilidade dos nutrientes no solo, atendendo aos princípios que regem o seu uso.

3.4 - Relacionamento da produtividade relativa e dos teores de Ca e Mg na folha-índice do cafeeiro com os teores de Ca e Mg no solo

No sentido de obter as faixas de boa disponibilidade para Ca e Mg para o cafeeiro, procedeu-se o relacionamento dos dados da PRF em função dos teores de Ca e de Mg no solo nas profundidades de 0-20 e 20-50 cm, obtendo-se os pontos da LFS aos quais foram ajustadas equações de regressão, sendo os modelos quadráticos e racionais, aqueles que melhor se ajustaram aos dados (Figuras 11 e 12).

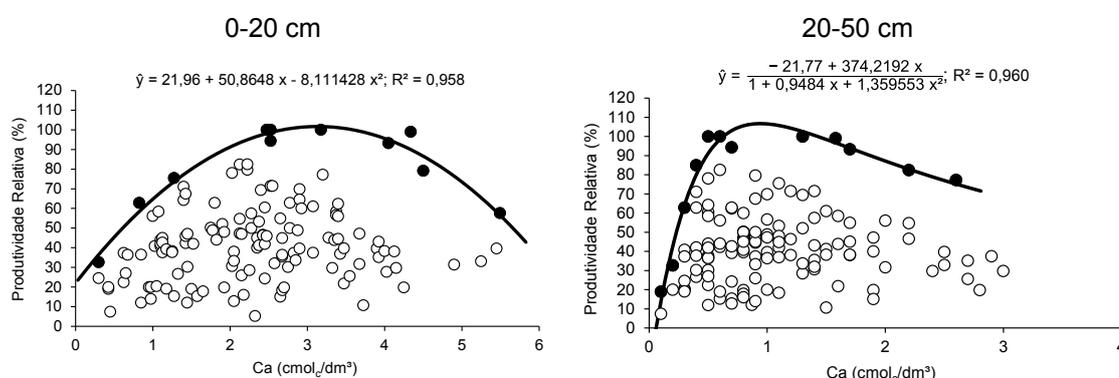


Figura 11. Produtividade relativa de café arábica no estado de Minas Gerais em função dos teores de Ca trocáveis no solo ($\text{cmol}_c/\text{dm}^3$) nas profundidades de 0-20 e de 20-50 cm. Os modelos acima são válidos para nas seguintes faixas, de 0-20 cm $\forall 0,30 \leq x \leq 5,50 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$ de Ca; 20-50 cm $\forall 0,10 \leq x \leq 2,60 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$ de Ca.

Pelas equações ajustadas, obtiveram-se as faixas de disponibilidade dos teores de Ca no solo que proporcionaram a PRF de máxima eficiência econômica (90 % da PRF) e a máxima PRF estimada de café arábica (100 % da PRF), que foram as seguintes: 2,01 a 3,13 $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$ de Ca, para a profundidade de 0-20 cm, correspondentes ao nível crítico e ao nível ótimo de Ca no solo. Já para o Mg, nessa mesma profundidade, o nível crítico e ótimo, foram: 0,65 a 1,04 $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$ de Mg. Na camada de 20-50, as faixas de Ca e Mg foram: 0,56 a 0,94 $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$ de Ca e 0,20 a 0,50 $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$ de Mg.

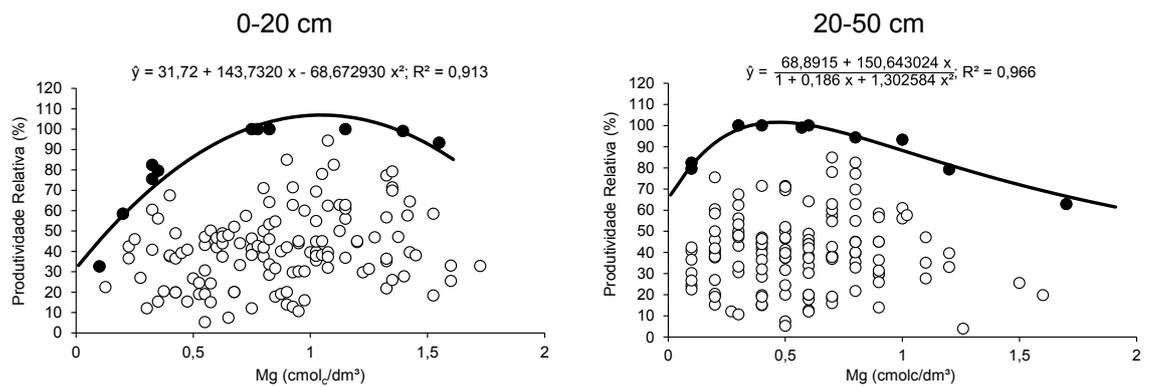


Figura 12. Produtividade relativa de café arábica no estado de Minas Gerais em função dos teores de Mg trocáveis no solo ($\text{cmol}_c/\text{dm}^3$) nas profundidades de 0-20 e de 20-50 cm. Os modelos acima são válidos para nas seguintes faixas, de 0-20 cm $\forall 0,10 \leq x \leq 1,55 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$ de Mg; 20-50 cm $\forall 0,10 \leq x \leq 1,70 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$ de Mg.

Esses resultados, estão próximos dos obtidos por Matiello et al. (2009), ao concluírem que teores de Ca e Mg no solo de 2,0 e 0,6 $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$, respectivamente, foram suficientes para obtenção das maiores produtividades, que foi em torno de 65,6 sc/ha.

Da mesma forma, estes teores estão próximos dos encontrados por Alves (2012), pelo método da Chance Matemática Relativa (ChMR) para a cultura do cafeeiro, em que os níveis críticos (Ca + Mg) obtidos foram de 2,8 $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$ e níveis ótimos (Ca + Mg) de 3,7 $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$.

Além disso, os teores de Ca em subsuperfície estão acima do teor de 0,4 $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$, que é um dos critérios utilizados para recomendação de aplicação de gesso de forma a fornecer Ca para a planta e neutralizar efeitos de Al em camadas mais profundas do solo, além de carrear bases para a subsuperfície (RAIJ et al., 1996; GUIMARÃES et al., 1999; MARTINEZ; NEVES, 2015).

Nas figuras 13 e 14 são apresentados os relacionamentos entre teores de totais de Ca e Mg (g/kg) na folha-índice do cafeeiro com os teores de Ca e Mg ($\text{cmol}_c/\text{dm}^3$) trocáveis no solo, na camada de 0-20 cm, utilizando a abordagem do DQRps.

Para a obtenção das linhas tracejadas horizontais, perpendiculares aos eixos das ordenadas, foram utilizadas as médias dos teores foliares da folha-índice do cafeeiro, 11,9 g/kg e 3,9 g/kg de Ca e Mg, respectivamente, e para as linhas tracejadas verticais, foram utilizados os níveis críticos de Ca e Mg na

camada de 0-20 cm, 2,01 e 0,65 cmol_c/dm³, respectivamente, determinados pela LF (Figura 11 e 12).

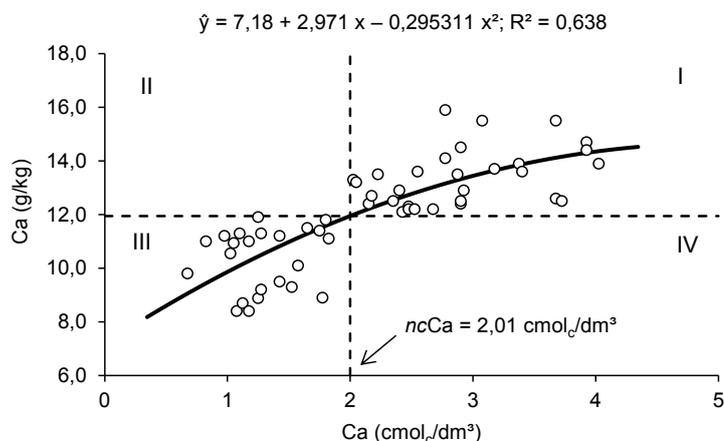


Figura 13. Equação do relacionamento entre os teores totais de Ca (g/kg) na folha-índice do cafeeiro em função dos teores trocáveis de Ca (cmol_c/dm³) na camada de 0-20 cm, obtida pelo critério do DQRps. O modelo acima é válido para uma faixa de teor de Ca de $\forall 0,68 \leq x \leq 4,03$ cmol_c/dm³ de Ca.

Para estes nutrientes, os modelos matemáticos que melhor se ajustaram aos pontos dos quadrantes III e I, foram o quadrático para o Ca, e para o Mg, o modelo potencial. Ambos os modelos ajustados demonstram que, incrementos nos teores de Ca e Mg no solo, levam a aumentos destes na folha-índice do cafeeiro.

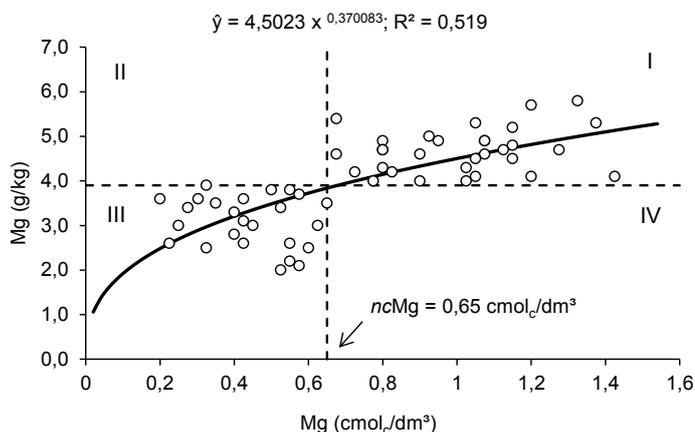


Figura 14. Equação do relacionamento entre os teores totais de Mg (g/kg) na folha-índice do cafeeiro em função dos teores trocáveis de Mg (cmol_c/dm³) na camada de 0-20 cm, obtida pelo critério do DQRps. O modelo acima é válido para uma faixa de teor de Ca de $\forall 0,33 \leq x \leq 1,43$ cmol_c/dm³ de Ca.

Silveira (1995) e Marques et al. (1999), avaliando os efeitos de combinações de doses de gesso e de calcário na nutrição mineral do cafeeiro

(*Coffea arabica* L.), cultivar Catuaí, com aplicações no plantio e no quinto ano de condução dos estudos, obtiveram incrementos nos teores de Ca trocável no solo com o aumento das doses de calcário e gesso, e a aplicação de calcário aumentou de forma consistente, os teores foliares de Ca e Mg, o que não foi observado com aplicação de gesso.

Com relação à produtividade relativa e aos teores foliares médios de Ca e Mg das lavouras presentes nos quadrantes II pelo DQRps (Figuras 13 e 14), as PRF médias são de 38,1 e 39,4 % e os teores foliares médios de 14,3 e 5,2 g/kg de Ca e Mg, respectivamente. Já as lavouras dos quadrantes IV, apresentaram PRF médias de 44,2 e 48,9 % e teores foliares médios de 10,3 e 3,2 g/kg de Ca e Mg, respectivamente. Esse resultado demonstra que as lavouras estão sob efeito de concentração (Quadrante II) e diluição (Quadrante IV) dos nutrientes na folha.

Quanto às lavouras dos quadrantes III, as PRF médias foram de 39,7 e 36,4 % e os teores foliares médios de 10,2 e 3,0 g/kg de Ca e Mg, respectivamente, e no quadrante I, as PRF médias foram de 52,3 e 45,8 %, com teores de 13,8 e 5,1 g/kg de Ca e Mg, respectivamente (Figuras 13 e 14). Nesse caso, os teores de Ca e Mg na folha-índice aumentam em função dos incrementos destes macronutrientes no solo, sendo a produtividade beneficiada dessa relação.

Além disso, como a taxa de absorção e os padrões de alocação dos nutrientes minerais nas plantas de cafeeiro variam de acordo com a carga pendente de frutos (LAVIOLA et al., 2007), maiores produtividades levaram à exigência de mais Ca e Mg nessa época de chumbinho. Segundo Matiello et al. (2005), a quantidade de nutrientes exigida na fase de chumbinho é baixa, aumentando significativamente a partir da passagem dos frutos para o estágio verde-aquoso, granação, até a maturação.

As faixas de suficiência foliar ótimas para Ca e Mg foram estimadas a partir dos níveis críticos e ótimos de Ca e de Mg no solo nas profundidades de 0-20 cm, obtidas pela LFS (Figuras 11 e 12). Para Ca, obteve-se a seguinte faixa, 11,9 – 13,6 g/kg de Ca na folha, estando, portanto, coerente com as faixas de suficiência comumente relatadas na literatura para cultura do cafeeiro, que é de 10,0 – 25,0 g/kg (MILLS; JONES JUNIOR, 1996); 13,0 –

15,0 g/kg (MALAVOLTA et al., 1997); 10,0 – 13,0 g/kg (GUIMARÃES et al., 1999); 10,0 – 15,0 g/kg (MATIELLO, 1997); 8,7 – 14,1 g/kg de Ca (MARTINEZ et al., 2003).

Quanto ao Mg, a faixa de suficiência foliar ótima estimada foi de 3,8 – 4,5 g/kg de Mg, estando também, coerente com as faixas de suficiência relatadas na literatura para o cafeeiro, que é de 2,5 – 4,0 g/kg (MILLS; JONES JUNIOR, 1996); 4,0 – 4,5 g/kg (MALAVOLTA et al., 1997); 3,1 – 4,5 g/kg (GUIMARÃES et al., 1999); 3,5 – 5,0 g/kg (MATIELLO, 1997); 2,6 – 5,2 g/kg de Ca (MARTINEZ et al., 2003).

3.5 – Simulações de uso do sistema de ajuste de recomendação de adubação do cafeeiro com base na análise foliar

Para a simulação de uso desta ferramenta de manejo, primeiramente foram geradas recomendações de adubação para N, P e K por meio do sistema Ferticalc-Café Arábica (PREZOTTI, 2001) e pelo Manual de recomendações para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais (CFSEMG – 5ª Aproximação, GUIMARÃES et al., 1999). Para isso, utilizou-se o resultado de uma análise de solo, com amostragem feita após a esparramação do cisco, de uma lavoura de café Arábica (var. Catuaí), com cinco anos de idade e população de 3 000 pl/ha, situada em Manhuaçu, MG, e com produtividade esperada de 100 sc/ha (Quadro 3).

Quadro 3. Resultados de análises química do solo

Prof.	pH _(H2O)	P	K	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H+Al	t	T	MO	P _{rem}
cm		-- mg/dm ³ --		----- cmol _c /dm ³ -----						g/kg	mg/L
0-20	4,20	2,0	30	1,0	0,5	1,0	7,0	3,0	9,0	10,0	20,0

As doses de N, P e K, obtidas pelo Ferticalc-Café arábica foram 353,56 kg/ha de N; 105,77 kg/ha de P₂O₅ e 381,40 kg/ha de K₂O, e pela 5ª Aproximação, 450,00 kg/ha de N; 80,00 kg/ha de P₂O₅ e 450,00 kg/ha de K₂O. As doses N e K foram parceladas em três aplicações: 117,85 kg/ha de N e 127,13 kg/ha de K₂O (Ferticalc-Café arábica); 150,0 kg/ha de N e 150,0 kg/ha

de K₂O (5^a Aproximação), sendo as aplicações planejadas para o período chuvoso (outubro a março). O P foi fornecido em dose única, na primeira aplicação.

Trinta dias após o segundo parcelamento dos fertilizantes (N e K), foram realizadas amostragens foliares quando os frutos estavam na fase de chumbinho, especificamente em dezembro, conforme proposto por Malavolta et al. (1997), obtendo-se assim os resultados da análise foliar (Quadro 4).

Quadro 4. Resultados de análise foliar

Nutrientes										
N	P	K	Ca	Mg	S	Cu	Fe	Zn	Mn	B
----- g/kg -----					----- mg/kg -----					
24,6	1,3	17,0	12,2	4,2	1,3	32,8	179,0	16,3	185,1	45,0

Tomando o valor obtido pela análise foliar para N de 24,6 g/kg, e a partir da equação apresentada do relacionamento de N foliar em função dos teores de MOS, pelo DQRps (Figura 5), foi estimado o teor correspondente de MOS no solo, para camada de 0-20 cm, obtendo-se 10,78 g/kg de MOS, o que demonstra que não houve variação do teor apresentado inicialmente pela análise de solo, que pode ser explicado pelo fornecimento de N mineral para as plantas (Quadro 3).

Não obstante, a planta sempre estará utilizando o N proveniente da mineralização da MOS, o que torna possível considerar esta fonte de N. Para isso, foi calculado o N disponibilizado (N_{Mineralizável}) pela MOS (Eq. 2), obtendo-se o seguinte resultado:

$$N_{\text{Mineralizável}} = [2000000 \times 1,3 \times ((1,078/100/1,724)/10) \times 0,04] \times [1 - e^{-0,031 \times 24}] =$$

$$N_{\text{Mineralizável}} = 33,87 \text{ kg/ha de N}$$

Porém, vale ressaltar que, ao considerar esta fonte de N para os cálculos dos ajustes da recomendação de adubação nitrogenada, estar-se-á esgotando as reservas de N orgânico do solo, o que vai de confronto com os

critérios de sustentabilidade do sistema agrícola.

Desta maneira, ao invés de serem considerados para os cálculos os teores de MOS, como uma via de suprimento de N, o teor de $N_{\text{Mineralizável}}$ será somado à dose de N mineral do fertilizante que vem sendo aplicado na lavoura, de forma a manter ou aumentar os teores de matéria orgânica no solo, o que pode também, ter reflexos nas safras seguintes, reduzindo a bienalidade de produção do cafeeiro (VALADARES et al., 2013).

Além disso, o teor foliar de N (24,6 g/kg) desta lavoura, considerada no exemplo, está abaixo da faixa de suficiência ótima de N estimada neste trabalho, para a cultura do cafeeiro, de 33,4 – 35,8 g/kg de N.

Com isso, será mantido o fornecimento da terceira aplicação da dose de 150,0 kg/ha de N, porém serão adicionados mais 33,87 kg/ha de N a esta dose, perfazendo-se uma dose total de 183,87 kg/ha de N, de forma a suprir a demanda dos frutos, bem como dos órgãos vegetativos, atingindo-se a produtividade esperada sem comprometer os teores de matéria orgânica no solo.

Tendo em vista que, o P foi fornecido em dose única, e pela análise foliar o teor de P está abaixo da faixa considerada ideal neste trabalho, de 1,4 – 1,6 g/kg de P, indicando que somente parte do nutriente aplicado, pode ter sido recuperado pelo sistema radicular da planta, desta forma será calculada uma dose complementar desse nutriente para ser fornecido às plantas, com vistas a se atingir a produtividade esperada, e pensando também na safra seguinte, para diminuir o efeito da bienalidade.

Ao estimar-se o teor de PR (fósforo relativo) no solo a partir do resultado da análise foliar, 1,3 g/kg de P, utilizando-se a equação do relacionamento entre teor foliar x PR no solo (Figura 8), obteve-se $PR = 42,52 \%$, que equivale a $3,82 \text{ mg/dm}^3$ de P ($tP = (42,52 \times 9,0)/100 = 3,82 \text{ mg/dm}^3$ P), que está abaixo do teor necessário para se atingir 90 % da máxima produtividade pelo método da linha de fronteira na profundidade de 0-20 cm obtida neste trabalho, que é de 82,59 %, valor que corresponde a $7,43 \text{ mg/dm}^3$ de P (Figura 7).

Para o cálculo da dose a ser recomendada para esta lavoura de café na camada de 0-20 cm, foi utilizada a abordagem conforme a equação 1, em que o $ncP\text{-M1}$ é de $7,43 \text{ mg/dm}^3$ de P, o teor disponível de P ($tdP\text{-M1}$) estimado no

solo de 3,82 mg/dm³ de P e a taxa de recuperação pelo extrator Mehlich-1 (*trP-M1*) foi calculada para um Prem de 20,0 mg/dm³/ mg/dm³, conforme equação apresentada no quadro 2, obtendo-se *trP-M1* = 0,310 mg/dm³/ mg/dm³.

$$drP = [(7,43 - 3,82)/0,310] \times 2 = 23,29 \text{ kg/ha de P} = 53,33 \text{ kg/ha de P}_2\text{O}_5$$

Portanto, serão fornecidos na terceira aplicação 53,33 kg/ha de P₂O₅, antecedendo os picos de acúmulo de nutrientes pelos frutos (LAVIOLA et al., 2008), de forma a suprir as demandas dos frutos, bem como, dos órgãos vegetativos da planta.

Utilizando-se o mesmo procedimento descrito para o P, estimou-se o teor disponível de K no solo, a partir do teor de K na folha-índice de 17,0 g/kg K, já que este teor foliar se encontra abaixo da faixa de suficiência ótima obtida neste trabalho, de 24,4 – 27,0 g/kg de K na folha-índice, e obteve-se 34,0 mg/dm³ de K, valor este, que está abaixo daquele que seria o necessário para se atingir 90 % da máxima produtividade pelo método da linha de fronteira na profundidade de 0-20 cm obtida neste trabalho, que é de 76,40 mg/dm³ de K (Figura 9).

Para o cálculo da dose a ser recomendada na camada de 0-20 cm, foi utilizada a Eq. 1, em que o *ncK-M1* é de 76,40 mg/dm³ de K, o teor disponível no solo (*tdK-M1*) estimado foi de 34,0 mg/dm³ de K e a taxa de recuperação pelo extrator Mehlich-1 foi calculada segundo equação apresentada no quadro 2, para um Prem de 20,0 mg/dm³/ mg/dm³, obtendo-se *trK-M1* = 0,791 mg/dm³/ mg/dm³.

$$drK = [(76,40 - 30,00)/0,791] \times 2 = 117,32 \text{ kg/ha de K} = 140,78 \text{ kg/ha de K}_2\text{O}$$

Verifica-se que a dose de K₂O a ser recomendada na terceira aplicação, em cobertura, conforme proposta por este trabalho, pelo uso da análise foliar, está acima da anteriormente planejada pelo Ferticalc-Café arábica, 21,35 kg/ha de K₂O acima, e com dose abaixo da recomendada pela 5ª Aproximação, 9,21 kg/ha de K₂O. Desta forma, será mantida a aplicação de 150,00 kg/ha de K₂O, de forma a suprir a demanda da planta quanto o K, já que o teor de K foliar está

abaixo da faixa de suficiência ideal.

Com isso, serão fornecidas as seguintes doses na terceira aplicação dos fertilizantes: 183,87; 23,28 e 125,00 kg/ha de N, P e K, equivalentes a 183,87; 53,33 e 150 kg/ha de N, P₂O₅ e K₂O, respectivamente.

O modelo proposto pelo uso da análise foliar do cafeeiro mostrou-se adequado como uma ferramenta de suporte adicional para o aprimoramento do ajuste de doses para N, P e K, visando assim uma nutrição adequada para obtenção de elevadas produtividades, bem como uma prática de uso de grande utilidade para o manejo nutricional da planta pensando-se nas safras posteriores, de forma a reduzir os efeitos da bienalidade da cultura.

Não obstante, são necessárias pesquisas adicionais para testar a técnica em mais espécies e outras condições de cultivo, bem como para avaliar o efeito dos fatores ambientais sobre os resultados do modelo, tornando assim o processo reprodutível.

CONCLUSÕES

O método da Linha de Fronteira permitiu obter as faixas de boa disponibilidade dos teores de MOS, P, K, Ca^{2+} e Mg^{2+} no solo, correspondentes aos níveis críticos e ótimos, na camada de 0-20 cm: 37,27 – 52,45 g/kg de MOS; 7,43 – 15,64 mg/dm³ de P; 76,40 – 127,19 mg/dm³ de K; 2,01 – 3,13 cmol_d/dm³ de Ca^{2+} e 0,65 – 1,04 cmol_d/dm³ de Mg^{2+} , e na camada de 20-50: 27,90 – 45,71 g/kg de MOS; 2,17 – 4,54 mg/dm³ de P; 55,97 – 91,67 mg/dm³ de K; 0,56 – 0,94 cmol_d/dm³ de Ca^{2+} e 0,20 – 0,50 cmol_d/dm³ de Mg^{2+} .

O método do Diagrama de Quadrantes do Relacionamento Planta-Solo aplicado ao estudo de inter-relação entre os teores totais de nutrientes, N, P, K, Ca, Mg e S na folha diagnóstico do cafeeiro, com os teores de matéria orgânica, P, K, Ca^{2+} e Mg^{2+} no solo, permitiu determinar curvas de resposta foliar destes macronutrientes.

Faixas de suficiência foliar ótima de macronutrientes foram estimadas a partir das equações ajustadas do relacionamento entre os teores totais de nutrientes, N, P, K, Ca, Mg e S, na folha diagnóstico do cafeeiro, com os teores de matéria orgânica, P, K, Ca^{2+} e Mg^{2+} no solo: 33,4 – 35,8 g/kg de N; 1,4 – 1,6 g/kg de P; 24,4 – 27,0 g/kg de K; 11,9 – 13,6 g/kg de Ca; 3,8 – 4,5 g/kg de Mg e 1,4 – 1,8 g/kg de S.

A integração entre a análise foliar do cafeeiro com a disponibilidade de nutrientes no solo, atreladas à produtividade de frutos, permitiu desenvolver uma ferramenta de ajuste da recomendação de doses de macronutrientes para a cultura do café arábica.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALEXANDER, M. Introduction to soil microbiology. New York: John Wiley & Sons, 1977. 467 p.
- ALVAREZ V., V. H. Avaliação da fertilidade do solo (Superfícies de resposta - Modelos aproximativos para expressar a relação fator-resposta). Viçosa, Imprensa Universitária, UFV, 1985. 75 p.
- 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, MG, SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO, 1996. p.615-646.
- ALVAREZ V., V. H.; NOVAIS, R. F.; BARROS, N. F.; CANTARUTTI, R. B.; LOPES, A. S. Interpretação dos resultados das análises de solos. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V., V. H. (Ed.). 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. 289-302.
- ALVAREZ V., V. H.; ROSCOE, R.; KURIHARA, C. H.; PEREIRA, N. F. Enxofre. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Eds.) Fertilidade do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 595-644.
- ALVES, L. C. Faixas de suficiência e níveis ótimos de atributos da fertilidade do solo para cultura do café em Minas Gerais. 2012, 70 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 2012.
- AMARAL, J. F. T.; PREZOTTI, L. C.; TOMAZ, M. A.; RODRIGUES, W. N.; MARTINS, L. D.; JESUS JUNIOR, W. C. Fertilização do cafeeiro visando o desenvolvimento sustentável. In: TOMAZ, M. A.; AMARAL, J. F. T.; JESUS JUNIOR, W. C.; FONSECA, A. F. A.; FERRÃO, R. G.; MARTINS, L. D.; RODRIGUES, W. N. (Org.). Inovação, difusão e integração: bases para a sustentabilidade da cafeicultura. 1ª ed. Alegre, ES: CAUFES, 2012. p.89-106.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO CAFÉ. Indicadores da indústria de café no Brasil. Disponível em: <http://www.abic.com.br/estatisticas.html>. Acesso em: 10 janeiro de 2016.
- BALIGAR, V. C.; FAGERIA, N. K. Plant nutrient efficiency: towards the second paradigm. In: SIQUEIRA, J. O.; MOREIRA, F. M. S.; LOPES, A. S.; GUILHERME, V.; FAQUIN, A. E.; NETO, F.; CARVALHO, J. G. (Eds). Inter-

relação fertilidade, biologia do solo e nutrição de plantas. Lavras, MG, UFLA/DPS, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1998. p.183-204.

BATAGLIA, O. C.; SANTOS, W. R. Estado nutricional de plantas perenes: avaliação e monitoramento. INSTITUTO AGRONÔMICO DE CAMPINAS, Campinas, São Paulo, 2001. 6 p. (Informações Agronômicas N° 96).

BATAGLIA, O. C.; QUAGGIO, J. A.; SANTOS, W. R.; ABREU, M. F. Diagnose nutricional do cafeeiro pelo DRIS variando-se a constante de sensibilidade dos nutrientes de acordo com a intensidade e frequência de respostas na produção. *Bragantia*, v. 63, n.2, p. 253-263, 2004.

BEAUFILS, E. R. Diagnosis and recommendation integrated system (DRIS): A general scheme for experimentation and calibration based on principles develop from research in plant nutrition. Pietermaritzburg, University of Natal, South Africa, 1973. 132p. (*Soil Science Bulletin*, I)

BORGES, J. S. Modulador edáfico para uso em modelo ecofisiológico e produtividade potencial de povoamentos de eucalipto. 2012. 81 p. Tese de Doutorado (Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.

CANTARELLA, H. Nitrogênio. In: NOVAIS, R. F., ALVAREZ V., V. H., BARROS, N. F., FONTES, R. L. F., CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L., eds. *Fertilidade do Solo*. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.375-470.

CANTARUTTI, R. B.; BARROS, N. F.; MARTINEZ, H. E. P.; NOVAIS, R. F. Avaliação da fertilidade do solo e recomendação de fertilizantes. In: NOVAIS, R. F., ALVAREZ V., V. H., BARROS, N. F., FONTES, R. L. F., CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L., eds. *Fertilidade do Solo*. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 769-872.

CATANI, R. A.; PELEGRINO, D.; BERGAMIN FILHO, H.; DA GLORIA, N. A.; GRANER, C. A. F. A absorção de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e enxofre pelo cafeeiro (*Coffea arabica* var. Mundo Novo (B.Rodr.) Choussy) aos dez anos de idade. *Anais da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"*, Piracicaba, São Paulo. v.22, p.81-89, 1965.

CHAVES, J. C. D. Concentração de nutrientes nos frutos e folhas e exportação de nutrientes pela colheita durante um ciclo produtivo do cafeeiro (*Coffea arabica* L. cv. Catuaí). 1982. 131p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1982.

CONAB: COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da safra brasileira de café. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/>> Acesso em: janeiro de 2015.

- CORRÊA, J. B.; GARCIA, W. R.; COSTA, P. C. Extração de nutrientes pelos cafeeiros 'Mundo Novo' e 'Catuaí'. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA CAFEIRA, 13. São Lourenço, 1986. Resumos. Rio de Janeiro, Instituto Brasileiro do Café, p.35-41, 1986.
- CORRÊA, J. B.; REIS, T. H. P.; POZZA, A. A. A.; GUIMARÃES, P. T. G.; CARVALHO, J. G. Índice de saturação por bases na nutrição e na produtividade de cafeeiros 'Catuaí vermelho' (*Coffea arabica* L.). *Coffee Science*, v. 2, n. 2, p.159-167, 2007.
- D'ANDRÉA, A. F.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; GUILHERME, L. R. G. Estoques de carbono e nitrogênio e formas de nitrogênio mineral em um solo submetido a diferentes sistemas de manejo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.39, n.2, p.179-186, 2004.
- DIAS, K. G.; FURTINI NETO, A. E.; GUIMARÃES, P. T. G.; REIS, T. H. P.; OLIVEIRA, C. H. C. Coffee yield and phosphate nutrition provided to plants by various phosphorus sources and levels. *Ciência e Agrotecnologia*, v.39, n.2, p.110-120, 2015.
- ESCANO, C. R.; JONES, C. A.; UEHARA, G. Nutrient diagnosis in corn grown on Hydric Dystrandeps: I. Optimum tissue nutrient concentrations. *Soil Science Society America Journal*, Madison, v.45, p.1135-1143, 1981.
- EVANYLO, G. K.; SUMNER, M. E. Utilization of the boundary line approach in the development of soil nutrient norms for soybean production. *Commun in Soil Sci Plant Anal*. v. 18, p. 1379–1401. 1987.
- FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C.; JONES, C. A. Diagnostic techniques for nutritional disorders. In: FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C.; JONES, C. A. Growth and mineral nutrition of field crops. New York, Marcell Dekker, 1991. p. 77-124.
- FERMONT, A. M., VAN ASTEN, P. J. A., TITTONELL, P., VAN WIJK, M. T., GILLER, K. E. Closing the cassava yield gap: An analysis from smallholder farms in East Africa. *Field Crops Research*. v.112, p. 24–36, 2009.
- FERNANDES, L. V. Normas e determinação de faixas de suficiência para diagnose foliar com base no crescimento relativo de eucalipto. 2010. 81 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.
- FERREIRA, F. A. S. A interação nitrato, fosfato e sulfato na absorção de fosfato e de sulfato no crescimento de eucalipto e no seu metabolismo de nitrato e sulfato. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 1986. 95p. (Tese de Mestrado)
- FONTES, P. C. R. Diagnóstico do estado nutricional das plantas. Viçosa: UFV, 2006. 122 p.

- GALLO, P. B.; RAIJ, B. V.; QUAGGIO, J. A.; PEREIRA, L. C. E. Resposta de cafezais adensados à adubação NPK. *Bragantia*, v.58, n.2, p. 341-351, 1999.
- GONÇALVES, J. L. M.; MENDES, K. C. F. S.; SASAKI, C. M. Mineralização de nitrogênio em ecossistemas florestais naturais e implantados do estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 25, n.3, p.601-616, 2001.
- GUIMARÃES, P. T. G.; LOPES, A. S. Solos para o cafeeiro: Características, propriedades e manejo. In: RENA, A. B.; MALAVOLTA, E.; ROCHA, M.; YAMADA, T. (Ed). *Cultura do cafeeiro: Fatores que afetam a produtividade*. Piracicaba, POTAFOS, 1986. p.115-156.
- GUIMARÃES, P. T. G. Respostas do cafeeiro (*Coffea arabica* L. cv. Catuaí) à adubação mineral e orgânica em solos de baixa fertilidade do Sul de Minas Gerais. 1986. 140 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1986.
- GUIMARÃES, P. T. G.; GARCIA, A. W. R.; ALVAREZ V., V. H.; PREZOTTI, L. C.; VIANA, A. S.; MIGUEL, A. E.; MALAVOLTA, E.; CORRÊA, J. B.; LOPES, A. S.; NOGUEIRA, F. D.; MONTEIRO, A. V. C. Cafeeiro. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V., V. H. (Ed.). *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. 289-302.
- GUIMARÃES, P. T. G.; REIS, T. H. P. Nutrição e Adubação do Cafeeiro. In: REIS, P. R.; CUNHA, R. L. (Org). *Café Arábica do Plantio a Colheita*. Lavras: EPAMIG, 2010. p. 343-414
- GUIMARÃES, P. T. G.; NOGUEIRA, F. D.; MALTA, M. R.; DIAS, K. G. L.; REIS, T. H. P. Nutrição do cafeeiro e sua relação com a qualidade do café. *Informe Agropecuário*. Produção de café: opção pela qualidade, Belo Horizonte, v. 32, n. 261, p. 39-51, 2011.
- HIROCE, R. Diagnose foliar em cafeeiro. In: MALAVOLTA, E.; YAMADA, T.; GUIDOLIN, J. A. (Ed.). *Nutrição e adubação do cafeeiro*. POTAFOS, 1982. p.117-137.
- KENWORTHY, A. L. Interpreting the balance of nutrient element in leaves of fruit trees. In: W. Reuther. *Plant analysis and fertilizer problems*. (Ed.) Publication 8. Washington, American Institute of Biological Science, 1961. p.28-43.

- KURIHARA, C. H.; MAEDA, S.; ALVAREZ V., V. H. Interpretação de resultados de análise foliar. Embrapa Agropecuária Oeste; Colombo; Embrapa Florestas, Dourados, Mato Grosso do Sul, 2005. 42 p. (Documentos, 74).
- LAGATU, H. ; MAUME, L. Le diagnostic foliare de la pomme de terre. Annales de l'Ecole Nationale d'Agriculture, v.22, p.50-158, 1934.
- LAVIOLA, B. G. Dinâmica de macronutrientes em folhas, flores e frutos de cafeeiro arábico em três níveis de adubação. 2004. 111 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2004.
- LAVIOLA, B. G.; MARTINEZ, H. E. P.; SOUZA, R. B.; ALVAREZ V., V. H. Dinâmica de cálcio e magnésio em folhas e frutos de coffea arabica. Revista Brasileira de Ciência do solo, v.31, n.1, p.319-329, 2007.
- LAVIOLA, B. G.; MARTINEZ, H. E. P.; SALOMÃO, L. C. C.; CRUZ, C. D.; MENDONÇA, S. M.; ROSADO, L. Acúmulo em frutos e variação na concentração foliar de NPK em cafeeiro cultivado em quatro altitudes. Bioscience Journal, v.24, n.1, p.19-31, 2008.
- MALAVOLTA, E.; CRUZ, V. F. A meaning for foliar diagnosis. In: SAMISH, R. M. (Ed.). Recent advances in plant nutrition. New York: Gordon & Breach Science, v.1, 1971. p.1-13.
- MALAVOLTA, E. Nutrição, adubação e calagem para o cafeeiro. In: RENA, A. B.; MALAVOLTA, E.; ROCHA, M.; YAMADA, T. (Ed.). Cultura do cafeeiro: fatores que afetam a produtividade. Piracicaba: POTAFOS, 1986. p.136-274.
- MALAVOLTA, E. Nutrição mineral e adubação do cafeeiro: colheitas econômicas máximas. São Paulo, Editora Agronômica Ceres, 1993. 210 p.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. de. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. 2ª ed. Piracicaba: POTAFOS, 1997. 319 p.
- MALAVOLTA, E.; FAVARIN, J. L.; MALAVOLTA, M.; CABRAL, C. P.; HEINRICHS, R.; SILVEIRA, J. S. M. Repartição de nutrientes nos ramos, folhas e flores do cafeeiro. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.37, n.7, p.1017-1022, 2002.
- MALAVOLTA, E. Manual de nutrição mineral de plantas. São Paulo, Editora Agronômica Ceres, 2006. 638 p.
- MAPA: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/vegetal/estatisticas>>. Acesso em: janeiro de 2016.

- MARQUES, E. S.; FAQUIN, V.; GUIMARÃES, P. T. G. Teores foliares de nutrientes no cafeeiro (*Coffea arabica* L.) em resposta a calcário e gesso. *Ciência e Agrotecnologia*, v.23, n.1, p.140-151, 1999.
- MARTINEZ, H. E. P.; CARVALHO, J. G. de; SOUZA, R. B. de. Diagnose foliar. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARAES, P. T. G.; ALVAREZ V., V. H. (Ed.) *Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais - 5ª Aproximação*. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais/CFSEMG, 1999. p.143- 168
- MARTINEZ, H. E. P.; MENEZES, J. F. S.; SOUZA, R. B.; ALVAREZ V., V. H.; GUIMARÃES, P. T. G. Faixas críticas de concentrações de nutrientes e avaliação do estado nutricional de cafeeiros em quatro regiões de Minas Gerais. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.38, n.6, p.703-713, 2003.
- MARTINEZ, H. E. P.; SOUZA, R. B.; ALVAREZ V., V. H.; MENEZES, J. F. S.; NEVES, Y. P.; OLIVEIRA, J. A.; ALVARENGA, A. P.; GUIMARÃES, P. T. G. Nutrição mineral, fertilidade do solo e produtividade do cafeeiro nas regiões de Patrocínio, Manhuaçu, Viçosa, São Sebastião do Paraíso e Guaxupé. 2ª ed. Belo Horizonte: EPAMIG, 2004. 60 p. (Boletim técnico, 72).
- MARTINEZ, H. E. P.; NEVES, J. C. L. Nutrição Mineral, Calagem, Gessagem e Adubação. In: SAKIYAMA, N. S.; MARTINEZ, H. E. P.; TOMAZ, M. A.; BORÉM, A. (Eds.). *Café Arábica do Plantio a Colheita*, Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2015. p.64-103.
- MATIELLO, J. B. *O Café: do cultivo ao consumo*. São Paulo: Globo, 1991. 320 p.
- MATIELLO, J. B. *Gosto do meu cafezal*. Rio de Janeiro: Globo, 1997. 139 p.
- MATIELLO, J. B.; SANTIAGO, R.; GARCIA, A. W. R.; ALMEIDA, S. R.; FERNANDES, D. R. *Cultura de café no Brasil: Novo manual de recomendações*. Rio de Janeiro, MAPA /PROCAFÉ, 2005. 438 p.
- MATIELLO, J. B.; MENDONÇA, S. M.; ROSA, G. N. G. P.; LEITE FILHO, S.; Observações sobre o suprimento de potássio em lavouras cafeeiras em desequilíbrio na Zona da Mata de Minas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEIIRAS, 34. Araxá, 2008. Resumos...Caxambu, MG: Embrapa Café, 2009. p.2176-3429
- MATIELLO, J. B.; SANTINATO, R.; GARCIA, A. W. R.; ALMEIDA, S. R.; FERNANDES, D. R. *Cultura de café no Brasil: Manual de recomendações*. Rio de Janeiro: MAPA/PROCAFÉ, 2010. 387 p.
- MEAD, D. J. Diagnosis of nutrient deficiencies in plantations. In: BOWEN, G. D.; NAMBIAR, E. K. (Ed.). *Nutrition of plantation forests*. London: Academic Press, 1984. p.259-291.

- MENDES, A. N. G.; ABRAHÃO, E. J.; CAMBRAIA, J. F.; GUIMARÃES, R. J. Recomendações técnicas para a cultura do cafeeiro no Sul de Minas. Lavras: UFLA, 1995. 77 p.
- MENEZES, J. F. S. Avaliação do estado nutricional de cafeeiros de Minas Gerais. 2001. 198 p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 2001.
- MEURER, E. J. Potássio. In: FERNANDES, M. S. (Ed.). Nutrição mineral de Plantas. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. p.281-298,
- MEURER, E. J. Fatores que influenciam o crescimento e desenvolvimento das plantas. In: NOVAIS, R. F., ALVAREZ V., V. H., BARROS, N. F., FONTES, R. L. F., CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L., eds. Fertilidade do Solo. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 65-90.
- MILLS, H. A.; JONES JUNIOR, J. B. Plant analysis handbook II: A Practical Sampling, Preparation, Analysis, and Interpretation Guide. 2ª ed. Athens (GA): Micro-Macro Publishing, 1996. 422 p.
- MØLLER NIELSEN, J.; FRIJS-NIELSEN, B. Evaluation and control of the nutritional status of cereals, II: Pure effect of a nutrient. Plant and Soil, v.45, p. 339–351, 1976.
- MORAES, F. R. P., CATANI, R. A. A absorção de elementos minerais pelo fruto do cafeeiro durante sua formação. *Bragantia*, v. 23, n.26, p.331-336, 1964.
- NOVAIS, R. F.; BARROS, N. F.; NEVES, J. C. L.; COUTO, C. Níveis críticos de fósforo no solo para o eucalipto. *Revista Árvore*, v.6, n.1, p.29-37, 1982.
- NOVAIS, R. F.; MELLO, J. W. V. Relação solo-planta. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Eds.) Fertilidade do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.133-204.
- OLIVEIRA, A. P. Índice “S” e suas relações com características físicas de solos e com a produtividade de eucalipto. 2010. 64 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 2010.
- PARENT, L. E.; DAFIR, M. A theoretical concept of compositional nutrient diagnosis. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, v.117, n.2, p.239-242, 1992.
- PAVAN, M. A.; CHAVES, J. C. D. Influência da densidade de plantio de cafeeiros sobre a fertilidade do solo. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE CAFÉ ADENSADO, 1994, Londrina. Anais... Londrina: IAPAR, 1996. p.87-106.

- PELEGRINI, D. F.; SIMÕES, J. C. Desempenho e problemas da cafeicultura no estado de Minas Gerais: 1934 a 2009. *Campo território: revista de geografia agrária*, v.6, n.12, p.183-199, 2011.
- PIMENTEL GOMES, F. Curso de estatística experimental. 11a ed. Piracicaba, Livraria Nobel, S.A., 1985. 466 p.
- PREZOTTI, L. C. Sistema para recomendação de corretivos e de fertilizantes para a cultura do café arábica. 2001. 93 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição Mineral de Plantas). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2001.
- RAIJ, B. Van. Avaliação da fertilidade do solo. Piracicaba, Instituto de Potassa & Fosfato, Instituto Internacional da Potassa, 1981. 142 p.
- RAIJ, B. van.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. Eds. Recomendação de Adubação e Calagem para o Estado de São Paulo. 2ª ed. Campinas, Instituto Agrônomo; Fundação IAC, 285p., 1996. (Boletim Técnico 100)
- RAIJ, B. van.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. 2ª ed. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 1997. 300 p. (Boletim 100).
- RAIJ, B. Van. A fertilização do cafeeiro no Brasil e o desenvolvimento sustentável. In: ZAMBOLIM, L. (Org.). Boas práticas agrícolas na produção de café. Viçosa: UFV-DFP, 2006. p.61-82.
- REIS, T. H. P.; GUIMARÃES, P. T. G.; FURTINI NETO, A. E.; GUERRA, A. F.; CURI, N. Soil phosphorus dynamics and availability and irrigated coffee yield. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.35, n.2, p.503-512, 2011.
- RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V., V. H. (Ed.). 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. 359 p.
- RODRÍGUEZ-NAVARRO, A., RUBIO, F. High-affinity potassium and sodium transport systems in plants. *Journal of Experimental Botany*. v.57, n.5, p.1149–1160, 2006.
- SANTOS, H. Q.; FONSECA, D. M.; CANTARUTTI, R. B.; ALVAREZ V., V. H.; NASCIMENTO JÚNIOR, D. Níveis críticos de fósforo no solo e na planta para gramíneas forrageiras tropicais, em diferentes idades. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.26, n.1, p.173-182, 2002.

- SCHMIDT, U., THONI, H. KAUPENJOHANN, M. Using a boundary line approach to analyze N₂O flux data from agricultural soils. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, v.57, n.2, p.119-129, 2000.
- SHATAR, T. M.; MC BRATNEY, A. B. Boundary-line analysis of field-scale yield response to soil properties. *The Journal of Agricultural Science*, v.142, n.5, p.553-560, 2004.
- SILVA, E. B.; NOGUEIRA, F. D.; GUIMARÃES, P. T. G.; FURTINI NETO, A. E. Adubação potássica do cafeeiro: produção, faixas Críticas de nutrientes no solo e nas folhas. *Ciência e Agrotecnologia*, v.25, n.4, p.801-811, 2001.
- SILVA, I. R.; MENDONÇA, E. S. Matéria Orgânica do Solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Eds.) *Fertilidade do solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.275-374.
- SILVEIRA, D. A. Efeitos da calagem e da gessagem nas características químicas do solo, no desenvolvimento do sistema radicular e na produção do cafeeiro (*Coffea arabica* L.). 1995. 94 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas). Universidade Federal de Lavras. Lavras, MG, 1995.
- STAHNINGER, N. I. Sistema de recomendação de corretivos e fertilizantes para a cultura da laranjeira com base no balanço nutricional (FERTICALC - Laranja). 2013. 120 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013.
- STANFORD, G. S.; SMITH, S. J. Nitrogen mineralization potentials of soils. *Soil Science Society of America Proceedings*, v.36, p.465-472, 1972.
- STEVENSON, F. J.; COLE, M. A. *Cycles of soil: carbon, nitrogen, phosphorus, sulphur, micronutrients*. New York: John Wiley, 1985. 380 p.
- STEVENSON, F.J. *Humus chemistry: Genesis, composition, reactions*. 2.ed. New York, John Wiley & Sons, 1994. 496 p.
- TALBOT, J. M. *Grounds for agreement. The political economy of the coffee commodity chain*. Lanham, MD: Rowman and Littlefield Publishers, INC. 2004. 237 p.
- TAMASSIA, L. F. M.; MONTEIRO, F. A.; MANARIN, C. A.; GUIMARÃES, G. P. F. P. B.; PREMAZZI, L. M. Interação entre doses de nitrogênio e de enxofre para o estabelecimento e perfilhamento do capim Tanzânia. In: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ZOOTECNIA, 36., Porto Alegre, 1999. Anais. Porto Alegre, Sociedade Brasileira de Zootecnia, 1999. CD ROM

- TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; ANGHINONI, I.; BISSANI, C. A.; CAMARGO, F. A. O.; WIETHÖLTER, S. Manual de adubação e de calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. Porto Alegre, RS: Comissão de Química e Fertilidade do Solo – RS/SC, 2004. 400 p.
- TIECHER, T. SANTOS, D. R.; RASCHE, J. W. A.; BRUNETTO, G.; MALLMANN, F. J. K.; PICCIN, R. Resposta de culturas e disponibilidade de enxofre em solos com diferentes teores de argila e matéria orgânica submetidos à adubação sulfatada. *Bragantia*, v. 71, n. 4, p.518-527, 2012.
- TISDALE, S. L.; NELSON, W. L. Soil fertility and fertilizer. 3^a ed. New York, Collier Mc Millan International editions, 1975. 694 p.
- TISDALE, S. L., NELSON, W. L., BEATON, J.D. Soil fertility and fertilizers. New York, Macmillan Publishing Company, 1985, 754 p.
- VALADARES, S. V. NEVES, J. C. L.; ROSA, G. N. P.; MARTINEZ, H. E. P.; ALVAREZ V., V. H.; LIMA, P. C. Produtividade e bionalidade da produção de cafezais adensados, sob diferentes doses de N e K. *Pesquisa Agropecuária* v.48, n.3, p.296-303, 2013.
- VALADARES, S. V.; NEVES, J. C. L.; ROSA, G. N. G. P.; NOVAIS, R. F.; MARTINEZ, H. E. P.; ALVAREZ, V. V. H. Yield gains of coffee plants from phosphorus fertilization may not be generalized for high density planting. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 38, n.3, p.905-911, 2014.
- WADT, P.G.S. Os métodos da chance matemática e do sistema integrado de diagnose e recomendação (DRIS) na avaliação nutricional de plantas de eucalipto. 1996. 123 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1996.
- WADT, P. G. S.; ALVAREZ V., V. H. Monitoramento nutricional. In: WADT, P. G. S. (Ed.). Manejo do solo e recomendação de adubação para o Estado do Acre. Rio Branco: Embrapa Acre, p. 227-244, 2005.
- WADT, P. G. S. Diagnose Foliar e Recomendação de Adubação para Lavouras Comerciais. Rio Branco, Acre: Embrapa Acre, 2011. 69 p. (Documento Técnico, 120).
- WAIREGI, L. W. I., VAN ASTEN, P. J. A., TENYWA, M. M., BEKUNDA, M. A. Abiotic constraints override biotic constraints in East African highland banana systems. *Field Crops Research*, v.117, n.1, p.146–153, 2010.
- WALWORTH, J. L.; LETZSCH, W. S.; SUMNER, M. E. Use of boundary lines in establishing diagnostic norms. *Soil Science Society of American Journal*. v.50, n.1, p.123-128, 1986.

WANG, N.; JASSOGNE, L.; VAN ASTEN, P. J. A.; MUKASA, D.; WANYAMA, I.; KAGEZI, G.; GILLER, K. E. Evaluating coffee yield gaps and important biotic, abiotic, and management factors limiting coffee production in Uganda. *European Journal of Agronomy on Science Direct*, v.63, p.1–11, 2015.

WEBB, R. A. Use of boundary line in the analysis of biological data. *Journal of Horticultural Science*, v.47, n.3, p.309-319. 1972.