UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP

CÂMPUS DE JABOTICABAL

RECOMENDAÇÃO DE NUTRIENTES POR BALANÇO NUTRICIONAL E ÍNDICES DIAGNÓSTICOS FOLIARES PARA A CULTURA DA BETERRABA

Luiz Otávio Duarte Silva

Engenheiro Agrônomo

2019

T
E
S
E

/

S
I
L
V
A

L.
O.
D.

2
0
1
9

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP

CÂMPUS DE JABOTICABAL

RECOMENDAÇÃO DE NUTRIENTES POR BALANÇO NUTRICIONAL E ÍNDICES DIAGNÓSTICOS FOLIARES PARA A CULTURA DA BETERRABA

Luiz Otávio Duarte Silva

Orientador: Prof. Dr. Arthur Bernardes Cecílio Filho

Coorientador: Prof. Dr. Leonardo Angelo de Aquino

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Doutor em Agronomia (Produção Vegetal).

2019

S586r

Silva, Luiz Otávio Duarte
Recomendação de nutrientes por balanço nutricional e índices diagnósticos foliares para a cultura da beterraba / Luiz Otávio Duarte Silva. -- Jaboticabal, 2019
81 p. : tabs.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal
Orientador: Arthur Bernardes Cecílio Filho
Coorientador: Leonardo Angelo de Aquino

1. Plantas Nutrição. 2. Hortaliças. 3. Adubação. 4. Interações nutrientes. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: RECOMENDAÇÃO DE NUTRIENTES POR BALANÇO NUTRICIONAL E ÍNDICES DIAGNÓSTICOS FOLIARES PARA A CULTURA DA BETERRABA

AUTOR: LUIZ OTÁVIO DUARTE SILVA
ORIENTADOR: ARTHUR BERNARDES CECILIO FILHO
COORIENTADOR: LEONARDO A. DE AQUINO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em AGRONOMIA (PRODUÇÃO VEGETAL), pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. LEONARDO ANGELO DE AQUINO
Departamento de Produção Vegetal / Universidade Federal de Viçosa - Campus Rio Paranaíba

Prof. Dr. ALEXSON FILGUEIRAS DUTRA
IMESB / Bebedouro/SP

Pesquisador Dr. ROBERTO BOTELHO FERRAZ BRANCO
APTA - IAC / Ribeirão Preto/SP

Prof. Dr. DANILO RICARDO YAMANE
Universidade de Araraquara-UNIARA / Araraquara/SP

Profa. Dra. MARA CRISTINA PESSOA DA CRUZ
Departamento de Solos e Adubos / FCAV / UNESP - Jaboticabal

Jaboticabal, 02 de dezembro de 2019

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

Luiz Otávio Duarte Silva, nascido no dia 02 de abril de 1991 na cidade de São Gotardo, Estado de Minas Gerais, filho de José Lopes da Silva e Erli Aparecida Duarte Silva. Iniciou sua jornada escolar na Escola Municipal "Quilombo do Ambrósio" na zona rural do município de Ibiá-MG em 1997 e concluiu o ensino médio na Escola Estadual "Coronel Oscar Prados" em São Gotardo-MG no ano de 2008. Ingressou no curso de Agronomia da Universidade Federal de Viçosa – *Campus* de Rio Paranaíba (UFV-CRP) em março de 2009. Desde o segundo período da graduação desenvolveu atividades de pesquisa, com participação no Grupo de Estudos em Manejo do Solo, no Grupo de Pesquisa em Manejo Integrado de Pragas (GPMIP) e no Grupo de Estudos e Pesquisas em Plantas Forrageiras (GEPFOR). Foi bolsista de iniciação científica pela Fapemig, com o projeto "Desenvolvimento de um plano de amostragem para *Liriomyza trifolii* (Burgess) (Diptera: Agromyzidae) na batateira (*Solanum tuberosum*)", e pela Indústria de Rações Patense Ltda, com o projeto "Irrigação de pastagem por aspersão em malha com aplicação de água residuária de indústria". Foi monitor nível I (graduação) e II (pós-graduação) da disciplina AGR 382 – Hidráulica na Agricultura. Realizou estágios técnicos nas regiões de São Gotardo-MG (empresas Cerragri e Comercial Agrícola São Gotardo) e de Lucas do Rio Verde-MT (Fazenda Seis Amigos e BRF Foods em parceria com a empresa GAPPI). Em março de 2014 ingressou no curso de Mestrado em Agronomia (Produção Vegetal) da UFV-CRP. Obteve o título de Mestre em fevereiro de 2016 com a dissertação intitulada "Influência de doses e modos de aplicação de fósforo e determinação da curva de acúmulo de nutrientes na cultura do repolho", sob orientação do Prof. Dr. Leonardo Angelo de Aquino. Em março de 2016 ingressou no curso de doutorado do Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Produção Vegetal), sob orientação do Prof. Dr. Arthur Bernardes Cecílio Filho, submetendo-se à defesa em 2019 com a tese intitulada "Recomendação de nutrientes por balanço nutricional e índices diagnósticos foliares para a cultura da beterraba". Foi professor substituto do curso de Agronomia da UFV-CRP durante o primeiro semestre de 2017. Atualmente é supervisor de Pesquisa & Desenvolvimento da empresa Nativa Agronegócios & Representações LTDA, em Patos de Minas-MG.

“Esperei com paciência no Senhor e Ele se inclinou para mim e ouviu o meu clamor. Bem-aventurado o homem que põe no Senhor a sua confiança.”

Salmo 40

Aos meus pais, José Lopes da Silva e Erli Aparecida Duarte Silva, pelo exemplo e por tudo que fazem por mim.

Ao meu irmão Luiz Carlos Duarte Silva, Engenheiro de Produção por formação e Engenheiro Agrônomo por vocação.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo dom da vida e por me dar forças, discernimento e paciência nos momentos de angústia, depressão e descontentamento. À Nossa Senhora, por me conceder paz e apoio quando precisei.

Aos meus pais, José Lopes da Silva e Erli Aparecida Duarte Silva, pelo amor, carinho, confiança, exemplo e apoio. Mesmo sem terem concluído sequer o ensino fundamental, sempre reconheceram a importância da educação e deram o suporte que podiam para que eu e meu irmão pudéssemos ter um diploma de ensino superior.

Ao meu irmão, Luiz Carlos Duarte Silva, por ser um companheiro de todas as horas, ajudando-me inclusive nas coletas no campo e nos processos laboratoriais. Pessoa que muito admiro por seu caráter e sua determinação.

À UNESP/FCAV e ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Produção Vegetal) pela oportunidade de realizar este curso. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Arthur Bernardes Cecílio Filho, pela orientação, confiança, auxílio, paciência e amizade. Agradeço ainda por ter permitido a realização do trabalho na Região de São Gotardo-MG.

Ao meu coorientador, Prof. Leonardo Angelo de Aquino, pela orientação, amizade e importantes conselhos profissionais em momentos decisivos.

Aos membros da banca de defesa, pela disponibilidade de participação.

Aos docentes do Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Produção Vegetal) da FCAV/UNESP e a todos os mestres que contribuíram em meu crescimento pessoal, profissional e científico.

À Universidade Federal de Viçosa – *Campus* de Rio Paranaíba, pela disponibilização da estrutura e transporte necessários para a realização dessa tese. Agradeço em especial os técnicos de laboratório Jader e Vinícius, e aos motoristas Célio, Paulo e Valdir pelo auxílio.

Ao engenheiro agrônomo Igor Pereira Martins, pela amizade e auxílio nas coletas de campo.

Ao engenheiro agrônomo Ademir Borges, amigo de longa data que auxiliou no contato com algumas empresas parceiras.

Às empresas parceiras que permitiram as coletas em suas lavouras: Agropecuária São Gotardo (AGROPESG), Comercial Agrícola São Gotardo, Cultivares Agronegócios, Fazenda São José, Grupo 4F (Fazenda Queixadas), Grupo Minas, Instituto de Pesquisa Agrícola do Cerrado (IPACER), Sekita Agronegócios e Shimada Agronegócios.

Aos amigos de Jaboticabal da pousada universitária e do condomínio “Santa Felicidade”.

Ao João de Deus Godinho Júnior, doutorando e amigo desde a época de UFV-CRP, pelo auxílio em Jaboticabal.

À Nativa Agronegócios e Representações Ltda, em especial ao gerente comercial geral Vítor Queiroz, pela oportunidade concedida, confiança em mim depositada e ensinamentos.

Ao meu amigo Ilídio Caixeta e às amigas Giselle Ribeiro, Amanda Franciellen e a Prof[a]. Dra. Gabriella Carneiro, por serem presença constante em minha vida.

A todos(as) que, direta ou indiretamente, tiveram a boa vontade em contribuir para a realização desse trabalho. Muito obrigado!

SUMÁRIO

RESUMO ..... **x**
ABSTRACT ..... **xi**
LISTA DE TABELAS ..... **xii**
LISTA DE FIGURAS ..... Erro! Indicador não definido.

CAPÍTULO 1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS **1**
1 Introdução 1
2 Revisão de literatura 2
2.1 Importância econômica e nutracêutica da beterraba 2
2.2 Nutrição da cultura da beterraba 3
2.3 Recomendação de nutrientes 4
2.4 Avaliação do estado nutricional 6
3 Referências 8

CAPÍTULO 2 - MODELAGEM DA DEMANDA DE NUTRIENTES PELA CULTURA DA BETERRABA DE MESA **13**
1 Introdução 14
2 Material e métodos 15
3 Resultados e discussão 17
4 Conclusões 23
5 Referências 24

CAPÍTULO 3 - MODELAGEM DA RECOMENDAÇÃO DE NUTRIENTES PARA A CULTURA DA BETERRABA DE MESA **27**
1 Introdução 28
2 Material e métodos 29
2.1 Desenvolvimento do sistema 29
2.1.1 Subsistema Requerimento – REQ 30
2.1.1.1 Determinação de atributos para modelagem da demanda nutricional 30

2.1.1.2 Modelagem do requerimento nutricional 32
2.1.2 Subsistema suprimento - SUP.....33
2.1.2.1 Suprimento pelo solo.....34
2.1.2.2 Suprimento pelos resíduos culturais.....36
2.1.2.3 Suprimento pela correção do solo.....37
2.2 Recomendação de fertilizantes 38
2.3 Aplicação do sistema.....39
3 Resultados e discussão 40
4 Conclusões.....45
5 Referências 45

CAPÍTULO 4 - ÍNDICES DE DIAGNOSE NUTRICIONAL PARA A CULTURA DA BETERRABA DE MESA.....49
1 Introdução 50
2 Material e métodos.....51
3 Resultados e discussão 55
4 Conclusões.....63
5 Referências 64

RECOMENDAÇÃO DE NUTRIENTES POR BALANÇO NUTRICIONAL E ÍNDICES DIAGNÓSTICOS FOLIARES PARA A CULTURA DA BETERRABA

RESUMO - O sistema de balanço nutricional tem se mostrado mais adequado que as tabelas de recomendação de fertilizantes por considerar maior número de variável na recomendação de corretivos e fertilizantes. O desenvolvimento de um modelo de balanço nutricional requer informações relativas à demanda de nutrientes pela cultura e a produtividade. Além do sistema de balanço nutricional, outra ferramenta para otimizar o manejo das adubações é a diagnose nutricional por meio da análise foliar. Entretanto, para beterraba de mesa, são escassas as informações que permitam a adequada avaliação do estado nutricional. Objetivou-se gerar modelos que melhor relacionem a demanda nutricional da cultura da beterraba com a produtividade de raízes, desenvolver modelos de recomendação de nutrientes para a cultura com base no princípio do balanço nutricional e determinar valores de referência para interpretação de análises foliares da beterraba. Em mais de 40 talhões comerciais de beterraba localizados no Alto Paranaíba-MG, quantificaram-se a produtividade de raízes e de folhas e os teores de matéria seca e de nutrientes nas raízes e na parte aérea. Foram gerados modelos que melhor relacionaram a demanda de cada nutriente pela cultura da beterraba com a produtividade de raízes. Esses modelos contribuíram para a proposição de um sistema de recomendação de nutrientes para a cultura da beterraba com base no princípio do balanço nutricional. Valores de referência foliares (faixas ótimas) foram gerados pelos métodos da Faixa de Suficiência (FS), Sistema Integrado de Diagnose e Recomendação (DRIS) e Diagnose da Composição Nutricional (CND) na fase de início de intumescimento da raiz e na colheita. O modelo linear foi o mais adequado para expressar a relação entre a produtividade e os acúmulos de nutrientes, exceto para o acúmulo total (raiz + parte aérea) de Mn e Zn, que ajustaram-se ao modelo de incrementos decrescentes. A modelagem permite a recomendação eficiente de nutrientes para a cultura da beterraba. Os valores de referência (faixas ótimas) gerados pelos métodos da FS, DRIS e CND, no geral, foram concordantes para o diagnóstico da limitação nutricional. Os teores de nutrientes na folha referência gerados para a cultura na região do Alto Paranaíba-MG diferem dos existentes na literatura. Os nutrientes mais limitantes para o cultivo da beterraba nessa região foram o K e o S. A limitação de K, Ca, Mg, S, Cu e Zn pode ser diagnosticada precocemente na fase de início de intumescimento da raiz.

Palavras-chave: *Beta vulgaris* L. var. *vulgaris*, CND, demanda nutricional, DRIS, modelagem nutricional, nutrição de hortaliças

NUTRIENT RECOMMENDATION BY NUTRITIONAL BALANCE AND FOLIAGE DIAGNOSTIC INDEXES FOR BEET CROP

ABSTRACT - The nutritional balance system has been shown to be more adequate than the fertilizer recommendation tables. For its efficiency, the construction of the system needs information related to nutrient demand by the crop and yield. Besides the nutritional balance system, another tool that can contribute to optimize fertilizer management is nutritional diagnosis through foliar analysis. However, in table beet there is little information to allow an adequate assessment of nutritional status. The objective was to generate models that better relate the demand of each nutrient for beet crop and the dry matter harvest index with the root yield, to develop nutrient recommendation models for beet crop based on the principle of nutritional balance and to determine reference values for interpretation of beet foliar analysis. In more than 40 commercial beet plots located in the Alto Paranaíba-MG microregion, root and leaf yield and dry matter and nutrient contents in roots and shoots were quantified. Models were generated that better correlated the demand of each nutrient for beet crop with root yield. These models contributed to the proposition of a nutrient recommendation system for beet crop based on the principle of nutritional balance. Foliar reference values (optimal ranges) were generated by the Sufficiency Range (FS), Diagnosis And Recommendation Integrated System (DRIS), and Compositional Nutrient Diagnosis (CND) methods at the onset of root swelling and harvest. The linear model was the most appropriate to express the relationship between yield and nutrient accumulation, except for the total accumulation (root + shoot) of Mn and Zn, which fit the model of decreasing increments. Modeling allows efficient nutrient recommendation for sugar beet crop. The reference values (optimal ranges) generated by the FS, DRIS and CND methods, in general, were in agreement for the diagnosis of nutritional limitation. The nutrient levels in the reference leaf generated for the crop in the Alto Paranaíba-MG region differ from those in the literature. The most limiting nutrients for beet cultivation in this region were K and S. Limitation of K, Ca, Mg, S, Cu and Zn can be diagnosed early in the onset of root swelling.
Keywords: *Beta vulgaris* L. var. *vulgaris*, CND, nutritional demand, DRIS, nutritional modeling, vegetable nutrition

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2 13

Tabela 1. Temperatura mínima, temperatura máxima e precipitação durante o período experimental. 16

Tabela 2. Produtividade, matéria seca total, índice de colheita e acúmulo nas raízes e total de N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn e Zn da cultura da beterraba. 18

Tabela 3. Índice de exportação médio de N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn e Zn da cultura da beterraba. 20

CAPÍTULO 3 27

Tabela 1. Modelos para estimativa da exportação de nutrientes (EXP) em função da produtividade (Prod). 33

Tabela 2. Média e erro padrão do índice de exportação de nutrientes obtidos para a cultura da beterraba. 33

Tabela 3. Eficiência de recuperação do nutriente do solo pelo extrator (mg dm^{-3}/mg dm^{-3}) em função, ou não, do fósforo remanescente (P-rem). 34

Tabela 4. Porcentagem acumulada de raízes por camadas para estabelecimento da profundidade efetiva do sistema radicular da cultura da beterraba. 36

Tabela 5. Constante de decomposição (k_0) de matéria seca (MS) e de macronutrientes das principais culturas antecessoras ao cultivo. 37

Tabela 6. Atributos químicos do solo empregado nas simulações de recomendação de nutrientes na modelagem. 40

Tabela 7. Extração e exportação de macro e micronutrientes geradas pela modelagem de recomendação em função da produtividade almejada. 41

Tabela 8. Recomendações de N, P_2O_5 e K_2O geradas pela modelagem da recomendação e pela literatura para diferentes produtividades almejadas. 42

CAPÍTULO 4 49

Tabela 1. Modelo matemático, amplitude dos índices e coeficiente de determinação (R^2) das regressões ajustadas para descrever os teores foliares da parte aérea de beterraba em função do índice DRIS para a população de referência[1] na fase de início do intumescimento da raiz tuberosa e no momento da colheita. 56

Tabela 2. Modelo matemático, amplitude dos índices e coeficiente de determinação (R^2) das regressões ajustadas para descrever os teores foliares da parte aérea de beterraba em função do índice CND para a população de referência[1] na fase de início do intumescimento da raiz tuberosa e no momento da colheita. 57

Tabela 3. Faixa ótima para a concentração dos nutrientes na parte área da cultura da beterraba na fase de início do intumescimento da raiz tuberosa gerada pelos métodos da faixa de suficiência (FS), DRIS e CND em comparação com a literatura existente. 58

Tabela 4. Faixa ótima para a concentração dos nutrientes na parte área da cultura da beterraba no momento da colheita gerada pelos métodos da faixa de suficiência (FS), DRIS e CND em comparação com a literatura existente. 59

Tabela 5. Ordem de limitação nutricional gerada pelos métodos da faixa de suficiência, DRIS e CND em duas fases para a cultura da beterraba. 63

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 2 13

Figura 1. Relação entre a produtividade e o índice de colheita da cultura da beterraba. *** significativo ao nível de 0,001. 19

Figura 2. Relação entre a produtividade e o acúmulo nas raízes e total de N (a), P (b), K (c), Ca (d), Mg (e) e S (f). *** significativo ao nível de 0,001. 21

Figura 3. Relação entre a produtividade e o acúmulo nas raízes e total de B (a), Cu (b), Fe (c), Mn (d) e Zn (e). ** e *** significativos aos níveis de 0,01 e 0,001, respectivamente. 22

CAPÍTULO 3 27

Figura 1. Análise de sensibilidade da modelagem para recomendação de N, P_2O_5 e K_2O em função de atributos da análise química do solo e produtividade almejada. 43

Figura 2. Recomendação de N, P_2O_5 e K_2O geradas pela modelagem para a produtividade almejada de 50 Mg ha^{-1} e pelas publicações oficiais em função de atributos da análise química do solo. 44

Figura 3. Análise de sensibilidade da modelagem para recomendação de N, P_2O_5 e K_2O em função da quantidade de resíduos de milheto presentes na área de cultivo e produtividade almejada. 45

CAPÍTULO 1 – Considerações gerais

1 Introdução

A beterraba (*Beta vulgaris* L. var. *vulgaris*) é uma cultura economicamente importante no mundo, especialmente nos países que a utilizam para a extração de açúcar. No Brasil seu cultivo tem se expandido nos últimos anos, como na região do Alto Paranaíba-MG, onde o cultivo é realizado por médios e grandes produtores que utilizam modernas tecnologias desde a semeadura até o armazenamento do produto final. Essa expansão visa atender especialmente o mercado “in natura” de mesa.

Nessas regiões de expansão da cultura, as produtividades obtidas atualmente são maiores que as encontradas na literatura. Dado que a demanda nutricional relaciona-se positivamente com a produtividade de uma cultura, as doses de fertilizantes recomendadas nos boletins oficiais podem estar desatualizadas para a maioria dos nutrientes. Além disso, nesses boletins as recomendações baseiam-se unicamente na disponibilidade de nutrientes no solo. Desse modo, os sistemas de balanço nutricional têm ganhado notoriedade, sobretudo por gerarem recomendações considerando vários fatores, como as elevadas produtividades obtidas atualmente. Salienta-se que para a proposição de um sistema de balanço nutricional, o principal entrave é a obtenção de atributos que permitam modelar adequadamente a demanda da cultura, os quais devem ser obtidos preferencialmente em regiões de elevada produtividade e que abranjam a maior variabilidade possível.

A obtenção de elevadas produtividades é dependente do ajuste criterioso do programa de adubação da cultura. Dessa forma, uma das ferramentas que pode ser utilizada é a avaliação do estado nutricional através da diagnose foliar. Para isso, podem ser utilizados os métodos univariado, bivariado e multivariado, como a faixa de suficiência (FS), o Sistema Integrado de Diagnose e Recomendação (DRIS) e a Diagnose da Composição Nutricional (CND), respectivamente.

Assim, objetivou-se propor um sistema de recomendação de nutrientes para a cultura com base no princípio do balanço nutricional e determinar valores de referência para interpretação de análises foliares da beterraba.

2 Revisão de literatura

2.1 Importância econômica e nutracêutica da beterraba

A beterraba apresenta três principais biótipos de importância econômica: beterraba açucareira, em que as raízes possuem altos teores de sacarose e, consequentemente, utilizadas para a extração de açúcar; beterraba forrageira, em que as raízes e folhas são empregadas na alimentação animal; e a beterraba hortícola ou de mesa, em que as raízes e também as folhas podem ser utilizadas na alimentação humana (Tivelli et al., 2011).

No Brasil é cultivada exclusivamente a beterraba de mesa, a qual é tradicionalmente uma cultura importante num grande número de pequenas propriedades dos cinturões verdes que apresentam grande diversidade de cultivo de hortaliças (Corrêa et al., 2014). No entanto, por ser resistente ao transporte, na última década houve expansão para novas fronteiras agrícolas mais distantes dos centros consumidores, como nas regiões de São Gotardo-MG e Irecê-BA, onde o custo de produção é menor e o clima mais estável (Cardoso, 2008). Nessas regiões, o cultivo é realizado por médios e grandes produtores que utilizam alto nível tecnológico, com o maior emprego de insumos e híbridos modernos, por exemplo.

Em 2016, a área cultivada estendeu-se por 10.938 ha, com produção total de 218.765 t e produtividade média de 20 Mg ha^{-1} (CNA, 2017). Os principais estados produtores são Paraná (20,0% da produção), São Paulo (17,0%), Minas Gerais (15,5%), Rio Grande do Sul (15,0%) e Bahia (8,0%) (IBGE, 2009). Nas fazendas foram movimentados em 2016 US$ 54,82 milhões e nas ceasas US$ 48,51 milhões (CNA, 2017).

A beterraba é um dos dez produtos hortícolas mais poderosos quanto à capacidade antioxidante e seu efeito curativo está relacionado principalmente às várias vitaminas (C, vitaminas do complexo B, ácido fólico e betacaroteno) e ao alto conteúdo de nutrientes (ferro, cobre, magnésio e cálcio) (Székely et al., 2014). A beterraba possui em sua composição pigmentos vermelhos (betacianinas) e amarelos (betaxantinas) conhecidos coletivamente como betalaínas, que

representam uma classe de pigmentos antioxidantes naturais altamente biodisponíveis (Tesoriere et al., 2013).

Dentre as betacianinas, destaca-se a betanina, que é um captador de radicais livres e um indutor do mecanismo de defesa antioxidante em células cultivadas (Esatbeyoglu et al., 2014). Estudos recentes têm apontado o papel preventivo de extratos de beterraba contra o câncer e sua atividade citotóxica sobre as células cancerosas, em especial a betanina (Kapadia et al., 2011; Das et al., 2013; Kapadia et al., 2013; Zhang et al., 2013; Nowacki et al., 2015; Das et al., 2016). Além desses benefícios descritos, em trabalho de revisão bibliográfica, Clifford et al. (2015) salientam que a suplementação com beterraba reduz a pressão sanguínea, ameniza inflamações, preserva a função endotelial e restaura a hemodinâmica cerebrovascular.

2.2 Nutrição da cultura da beterraba

A beterraba, tal como outras hortaliças, é uma cultura nutricionalmente exigente devido ao seu rápido desenvolvimento, intensa produção de matéria seca e elevada extração e exportação (Cardoso et al., 2017). Embora represente mais de 20% do custo de produção da cultura (Tivelli et al., 2011; Trani et al., 2013), as informações sobre adubação são escassas para o cultivo da beterraba em solos do Brasil (Filgueira, 2008). No Brasil, a maioria dos estudos com a extração de nutrientes foi realizada com a cultivar Early Wonder, não havendo pesquisas sobre a demanda nutricional dos híbridos modernos, os quais têm aumentado sua área de cultivo a cada ano (Cardoso et al., 2017).

As tabelas de recomendação de fertilização são a principal ferramenta utilizada no manejo nutricional de culturas agrícolas. Embora tenham trazido grande contribuição na melhoria das recomendações, as tabelas apresentam limitações (Tomé Júnior, 2004). Dentre essas, podem ser citadas a aplicabilidade regional baseada em fronteiras políticas e não em condições edafoclimáticas; doses de N recomendadas não consideram fatores como teor de matéria orgânica do solo e culturas antecessoras; não há indicações para modificações nas doses recomendadas conforme as taxas de aproveitamento dos fertilizantes utilizados; as

recomendações que não variam de forma contínua com a produtividade esperada ou com o teor de nutrientes no solo; não permitem adaptações advindas de novos conhecimentos ou da experiência do técnico com a cultura (Santos et al., 2008; Deus et al., 2015; Dezordi et al., 2015).

As recomendações das tabelas de publicações oficiais, como as de Casali (1999) e de Trani et al. (2014), estão aquém das praticadas pelos agricultores em cultivos tecnificados. As maiores doses aplicadas nesse caso estão em consonância com trabalhos mais recentes que apontam que a beterraba tem alta extração de nutrientes (Cardoso et al., 2017) e responde a N, P, K e S nas condições brasileiras (Aquino et al., 2006; Avalhães et al., 2009; Oliveira et al., 2016, Oliveira et al, 2017; Silva et al., 2019). A falta de informações oficiais mais exatas e atualizadas favorece, consequentemente, a aplicação altas doses de nutrientes. Isso porque a relação entre o valor de venda do produto comercial (raízes tuberosas, no caso da beterraba) e o preço do fertilizante é mais favorável a esse último. Dessa forma, pode ocorrer em baixa eficiência de recuperação dos nutrientes e excesso dos mesmos no solo, tornando-os propensos a perdas. Logo, tais fatos suscitam a necessidade de adequação das recomendações dos boletins oficiais.

2.3 Recomendação de nutrientes

As recomendações contidas em tabelas de publicações oficiais para a cultura da beterraba, como as de Casali (1999) e Trani et al. (2014), levam em conta apenas a disponibilidade dos nutrientes no solo, desconsiderando-se a produtividade esperada. Isso pode subestimar a recomendação por não contemplar outras variáveis que alteram a recomendação de nutrientes. As produtividades estimadas por Casali (1999) (40 Mg ha^{-1}) e Trani et al. (2014) (30 a 50 Mg ha^{-1}) são baixas, uma vez que com a introdução de novas técnicas de manejo e novos híbridos, as produtividades obtidas são maiores que as apresentadas nos boletins oficiais.

A demanda nutricional relaciona-se positivamente com a produtividade de uma cultura. Com isso, as adubações devem ser planejadas de forma criteriosa, sobretudo para altas produtividades, pois deve-se atender conjuntamente a demanda da cultura e a manutenção ou incremento da fertilidade do solo. Para isso,

devem ser utilizadas ferramentas de recomendação mais abrangentes, que contemplem a influência de vários fatores, como a produtividade almejada e o teor e a capacidade tampão de nutrientes no solo (Silva et al., 2009). Dessa forma, a utilização de modelos de balanço nutricional se destaca por ser uma ferramenta estratégica de recomendação de fertilizantes e corretivos (Oliveira et al., 2019).

Os sistemas de balanço nutricional são compostos por modelos matemáticos que possibilitam estimar o requerimento de nutrientes pela cultura em função da produtividade almejada e do suprimento de nutrientes pelo solo. Para o suprimento pelo solo são considerados os resultados da análise química (nutrientes disponíveis), os resíduos culturais presentes e os nutrientes advindos da correção do solo (calagem + gessagem). Logo, a recomendação de adubação através desses modelos compreende a diferença entre a demanda da cultura e o suprimento de nutrientes pelo solo.

Embora seja eficiente, o sistema de balanço nutricional ainda não pode ser empregado na cultura da beterraba devido à falta de informações relacionadas à demanda nutricional dessa espécie para altas produtividades. A obtenção de informações como teor de matéria seca, o coeficiente de utilização biológica (CUB), o índice de exportação de nutrientes e a eficiência de recuperação dos nutrientes aplicados no solo representam o ponto crítico para a proposição de um sistema de balanço nutricional (Dezordi et al., 2015). Essas informações devem ser obtidas em áreas comerciais de alta produtividade por abrangerem maior variabilidade amostral e, dessa forma, permitirem modelar adequadamente a demanda de nutrientes pela cultura (Cunha et al., 2015).

Com relação ao suprimento de nutrientes pelo solo, as informações necessárias podem ser obtidas em trabalhos disponíveis na literatura. Destacam-se os trabalhos com eficiência de recuperação dos extratores utilizados nas análises de solo (Morais, 1999; Souza, 2000; Mello, 2001) e com o acúmulo e a dinâmica de mineralização e liberação de nutrientes pelos resíduos culturais (Padovan et al., 2006; Gama-Rodrigues et al., 2007; Marcelo et al., 2012a,b).

Assim, no sistema de balanço nutricional são considerados mais fatores que as tabelas de recomendação. Além disso, o próprio usuário pode aperfeiçoar a

recomendação de acordo com sua experiência técnica com a cultura e/ou com novas informações obtidas na literatura.

2.4 Avaliação do estado nutricional

A análise de solo é uma ferramenta tradicionalmente utilizada na agricultura. Entretanto, além de se conhecer a fertilidade do solo, é de suma importância a avaliação do estado nutricional por meio da análise foliar, a qual possibilita identificar desequilíbrios nutricionais (Marschner, 1995). Nos últimos anos esta avaliação tem sido mais utilizada e discutida, a fim de permitir intervenções mais precisas em sistemas de produção vegetal (Urano et al., 2006). Assim, estudos sobre a avaliação do estado nutricional têm sido desenvolvidos para complementar a análise de solo, o que permite nortear o manejo de adubação de uma forma mais equilibrada e racional (Camacho et al., 2012).

Para a avaliação do estado nutricional das plantas é preciso estabelecer valores de referência para os nutrientes (Rozane et al., 2016). Posteriormente, realiza-se a comparação entre uma amostra e um padrão de comparação (Malavolta et al., 2006). O principal órgão utilizado para isso é a folha, o que se deve à suposta relação entre teores foliares, absorção de nutrientes e produtividade (Fageria et al., 2009), além de ser o órgão em que ocorre a maioria das reações bioquímicas. Entretanto, a disponibilidade de padrões nutricionais foliares para o diagnóstico nutricional é uma das principais limitações do método (Meneses, 2017).

Para a interpretação dos resultados da análise do tecido vegetal podem ser utilizados métodos como a faixa de suficiência (FS) (univariado), o Sistema Integrado de Diagnóstico e Recomendação (DRIS) (bivariado) e o Diagnóstico da Composição Nutricional (CND) (multivariado).

A FS tem como vantagem a facilidade de interpretação do estado nutricional da cultura, sendo o principal método utilizado para tal fim (Wadt et al., 2013). Entretanto, por ser um método univariado, não são consideradas as interações entre os nutrientes ou com o próprio ambiente na definição dos valores padrões. A FS é dependente de experimentos de calibração, que necessitam ser executados em diversos anos e locais para representar com precisão as condições tecnológicas das

culturas (Rozane et al., 2016). Essa é a principal desvantagem do método, pois ensaios de calibração são onerosos, têm média a longa duração e precisam ser realizados de acordo com a introdução de novos materiais genéticos, novas técnicas de cultivo ou variação nas condições do ambiente (Meneses, 2017). No entanto, a FS para a beterraba disponível na literatura é a de Trani e Raij (1997), a qual pode ser considerada antiga e com produtividade inferior à atualmente obtida no sistema de cultivo atual.

O método DRIS, desenvolvido por Beaufils (1973), pressupõe que as relações binárias (entre dois nutrientes) fornecem boa indicação do equilíbrio nutricional, identificando nutrientes limitantes por falta e excesso (Santos e Rozane, 2017). Dessa forma, o método visa melhorar o diagnóstico nutricional, por considerar as relações entre os nutrientes, o que não era considerado nos métodos univariados como a FS. Esse método permite a obtenção direta de padrões nutricionais a partir do monitoramento dos teores foliares de lavouras comerciais. Logo, a não exigência de experimentação reduz significativamente o custo e o tempo necessários para a obtenção desses padrões e torna o DRIS uma alternativa promissora, sobretudo na ausência de informações nutricionais (Dias et al., 2013).

O CND (Parent e Dafir, 1992) considera todas as possíveis interações nutricionais que ocorrem simultaneamente entre os nutrientes sob diagnóstico. Conforme estudos em análise de dados composicionais feitos por Aitchison (1986), todo nutriente é ajustado a outro nutriente usando a média geométrica. Assim como o DRIS, o CND permite a obtenção dos padrões nutricionais a partir de lavouras comerciais, os quais podem ser constantemente atualizados a cada novo monitoramento nutricional (WADT et al., 2013). Além disso, ambos os métodos permitem ordenar a limitação dos nutrientes na planta (Serra et al., 2010). Vários trabalhos foram desenvolvidos para comparar o DRIS e o CND (Urano et al., 2006; Serra et al., 2010; Camacho et al., 2012; Barlóg, 2014; Cunha et al., 2016; Dezordi et a., 2016), nos quais os resultados foram semelhantes entre os métodos, outrora um método se sobressaiu em relação ao outro.

3 Referências

Aitchison J (1986) **The statistical analysis of compositional data**. London: Chapman e Hall, 416 p.

Aquino LA, Puiatti M, Pereira PRG, Pereira FHF, Ladeira IR, Castro MRS (2006) Produtividade, qualidade e estado nutricional da beterraba de mesa em função de doses de nitrogênio. **Horticultura Brasileira** 24:199-203.

Avalhães CC, Prado RM, Gondim ARO, Alves AU, Correia MAR (2009) Rendimento e crescimento da beterraba em função da adubação com fósforo. **Scientia Agraria** 10:75-80.

Barłóg P (2014) Diagnosis of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) nutrient imbalance by DRIS and CND-clr methods at two stages during early growth. **Journal of plant Nutrition** 39:1-16.

Beaufils ER (1973) **Diagnosis and recommendation integrated system (DRIS)**. Pietermaritzburg: University of Natal, 132 p. (Soil Science Bulletin, 1)

Camacho MA, Silveira MV, Camargo RA, Natale W (2012) Faixas normais de nutrientes pelos métodos ChM, DRIS, CND e nível crítico pelo método de distribuição normal reduzida para laranjeira-pera. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 36:193-200.

Cardoso AII, Magro FO, Oliveira Júnior MX, Abrahão C, Tavares AEB, Fernandes DM (2017) Accumulation of macronutrients in beetroot plant. **Horticultura Brasileira** 35:328-334.

Cardoso AII (2008) Produção de beterraba híbrida no Brasil. **Revista Campo & Negócios** 40:26-27.

Casali VWD (1999) Beterraba. In: Ribeiro AC, Guimarães PTG, Alvarez VV H (Eds) **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais - 5ª aproximação.** Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, p. 182.

Clifford T, Howatson G, West DJ, Stevenson EJ (2015) The potential benefits of red beetroot supplementation in health and disease. **Nutrients** 7:2801-2822.

Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil (CNA) (2017) **Mapeamento e qualificação da cadeia produtiva de hortaliças no Brasil.** Brasília: CNA, 79 p.

Corrêa CV, Cardoso AII, Souza LG, Antunes WLP, Magolbo LA (2014) Produção de beterraba em função do espaçamento. **Horticultura Brasileira** 32:111-114.

Cunha MLP, Aquino LA, Novais RF, Clemente JM, Aquino PR, Oliveira TF (2016) Diagnosis of the Nutritional Status of Garlic Crops. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 40:1-14.

Cunha MLP, Oliveira TF, Clemente JM, Gentil TG, Aquino LA (2015) Modeling of nutrients demands in garlic crop. **Australian Journal of Crop Science** 9:1205-1213.

Das S, Filippone SM, Williams DS, Das A, Kukreja RC (2016) Beet root juice protects against doxorubicin toxicity in cardiomyocytes while enhancing apoptosis in breast cancer cells. **Molecular and cellular biochemistry** 421:89-101.

Das S, Williams DS, Das A, Kukreja RC (2013) Beet root juice promotes apoptosis in oncogenic MDA-MB-231 cells while protecting cardiomyocytes under doxorubicin treatment. The **Journal Experimental Secondary Science** 2:1-6.

Deus JAL, Soares I, Neves JCL, Medeiros JF, Miranda FR (2015) Fertilizer recommendation system for melon based on nutritional balance. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 39:498-511.

Dezordi LR, Aquino LA, Novais RF, Aquino PM, Santos LPD (2015) Nutrient recommendation model for carrot crop – Ferticalc Carrot. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 39:1714-1722.

Dezordi LR, Aquino LA, Aquino RFBA, Clemente JM, Assunção NS (2016) Diagnostic methods to assess the nutritional status of the carrot crop. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 40:1-16.

Dias JRM, Tucci CAF, Wadt PGS, Silva AMD, Santos JZL (2013) Níveis críticos e faixas de suficiência nutricional em laranjeira-pêra na Amazônia Central obtidas pelo método DRIS. **Acta amazônica** 43:239-246.

Esatbeyoglu T, Wagner AE, Motafakkerazad R, Nakajima Y, Matsugo S, Rimbach G (2014) Free radical scavenging and antioxidant activity of betanin: Electron spin resonance spectroscopy studies and studies in cultured cells. **Food and Chemical Toxicology** 73:119-126.

Fageria NK, Barbosa Filho MP, Moreira A, Guimarães CM (2009) Foliar fertilization of crop plants. **Journal of Plant Nutrition** 32:1044-1064.

Filgueira FAR (2008) **Novo manual de olericultura: agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças.** Viçosa: UFV, 421p.

Gama-Rodrigues AC, Gama-Rodrigues EF, Brito EC (2007) Decomposição e liberação de nutrientes de resíduos de plantas de cobertura em Argissolo Vermelho-Amarelo na região Noroeste Fluminense (RJ). **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 31:1421-1428.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (2009) **Censo Agropecuário 2006.** Rio de Janeiro: IBGE, p. 777.

Kapadia GJ, Azuine MA, Rao GS, Arai T, Lida A, Tokuda H (2011) Cytotoxic effect of the red beetroot (*Beta vulgaris* L.) extract compared to doxorubicin (Adriamycin) in the human prostate (PC-3) and breast (MCF-7) cancer cell lines. **Anti-Cancer Agents in Medicinal Chemistry (Formerly Current Medicinal Chemistry-Anti-Cancer Agents)** 11:280-284.

Kapadia GJ, Rao GS, Ramachandran C, Lida A, Suzuki N, Tokuda H. Synergistic cytotoxicity of red beetroot (*Beta vulgaris* L.) extract with doxorubicin in human pancreatic, breast and prostate cancer cell lines. **Journal of Complementary and Integrative Medicine** 10:113-122.

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

Marcelo AV, Corá JE, Fernandes C (2012a) Sequências de culturas em sistema de semeadura direta. I – Produção de matéria seca e acúmulo de nutrientes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 36:1553-67.

Marcelo AV, Corá JE, Fernandes C (2012b) Sequências de culturas em sistema de semeadura direta. II – Decomposição e liberação de nutrientes na entressafra. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 36:1568-1582.

Marschner H (1995) **Mineral nutrition of higher plants.** San Diego: Academic Press, 889 p.

Mello MS (2001) **Sistema de interpretação de análise de solo e de recomendação de calagem e fertilizantes para a cultura de tomate.** 91 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Solos e Nutrição de Plantas) - UFV, Viçosa.

Meneses NB (2017) **Diagnóstico do estado nutricional do milho-doce.** 88 f. Tese (Doutorado em Agronomia – Produção Vegetal) - UNESP, Jaboticabal.

Morais ERC (1999) **Formas de potássio em solos do Estado de Minas Gerais e sua disponibilidade para plantas de milho.** 85 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Solos e Nutrição de Plantas) - UFV, Viçosa.

Nowacki L, Vigneron P, Rotellini L, Cazzola H, Merlier F, Prost E, Ralanairina R, Gadonna JP, Rossi C, Vayssade M (2015) Betanin-Enriched Red Beetroot (*Beta vulgaris* L.) Extract Induces Apoptosis and Autophagic Cell Death in MCF-7 Cells. **Phytotherapy Research** 29:1964-1973.

Oliveira RJP, Gatiboni LC, Brunetto G, Miquelluti DJ, Valicheski RR. Resposta da beterraba a adubação com nitrogênio, enxofre e micronutrientes em um Cambissolo Háplico (2017) **Horticultura Brasileira** 35:63-68.

Oliveira RJP, Gatiboni LC, Valicheski RR, Miquelluti DJ, Brunetto G (2016) Calibração da adubação fosfatada e potássica para beterraba na região do Vale do Itajaí. **Horticultura Brasileira** 34:210-215.

Oliveira TF, Aquino LA, Soares MEP, Gentil TG, Fernandes FL, Clemente JM, Reis MR (2019) Modeling the Recommendation of Nutrients for Cabbage (*Brassica oleracea*) Crop. **Journal of Agricultural Science** 11:220-230.

Padovan MP, Almeida DL, Guerra JGM, Ribeiro RLD, Oliveira FL, Santos LA, Alves BJR, Souto SM (2006) Decomposição e liberação de nutrientes de soja cortada em diferentes estádios de desenvolvimento. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 41:667-672.

Parent LE, Dafir M (1992) A theorical concept of compositional nutrient diagnosis. **Journal of the American Society for Horticultural Science** 117:239-242.

Rozane DE, Parent LE, Natale W (2006) Evolution of the predictive criteria for the tropical fruit tree nutritional status. **Científica** 44:102-112.

Santos FC, Neves JCL, Novais RF, Alvarez V VH, Sediyama C (2008) Modelagem da recomendação de corretivos e fertilizantes para a cultura da soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 32:1661-1674.

Santos EMH, Rozane DE (2017) DRIS standard and normal ranges of foliar nutrients for the culture of 'Thompson' atemoya. **Ciência Rural** 47:1-7.

Serra AP, Marchetti ME, Vitorino ACT, Novelino JO, Camacho MA (2010) Desenvolvimento de normas DRIS e CND e avaliação do estado nutricional da cultura do algodoeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 34:97-104.

Silva AP, Alvarez VVH, Souza AP, Neves JCL, Novais RF, Dantas JP (2009) Sistema de recomendação de fertilizantes e corretivos para a cultura do abacaxi – Fertcalc-Abacaxi. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 33:1269-1280.

Silva GA, Grangeiro LC, Sousa VFL, Silva LR, Jesus PM, Silva JL (2019) Agronomic performance of beet cultivars as a function of phosphorus fertilization. **Revista Brasileira de Engenharia Agricola e Ambiental** 23:518-523.

Souza RB (2000) **Níveis críticos de enxofre em solos e em folhas de cultivares de café.** 88 p. Tese (Doutorado em Agronomia – Solos e Nutrição de Plantas) - UFV, Viçosa.

Székely D, Szalóki-Dorkó L, Stéger-Máté M, Szabó-Nótin B, Ivanics J, Monspart-Sényi J (2014) Distribution of antioxidant components in roots of different red beets (*Beta vulgaris* L.) cultivars. **Acta Alimentaria** 43:164-171.

Tesoriere L, Gentile C, Angileri F, Attanzio A, Tutone M, Allegra M, Livrea MA (2013) Trans-epithelial transport of the betalain pigments indicaxanthin and betanin across Caco-2 cell monolayers and influence of food matrix. **European journal of nutrition** 52:1077-1087.

Tivelli SW, Factor TL, Teramoto JRS, Fabri EG, Moraes AD, Trani PE, May A (2011) **Beterraba: do plantio à comercialização.** Campinas: IAC, 45 p.

Tomé Junior JB (2004) **Uma nova abordagem nas recomendações de adubação.** 133 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – UFV, Viçosa.

Trani PE, Factor TL, Breda Júnior JM, Purquerio LFV, Lima Júnior S (2014) Beterraba. In: Aguiar ATE, Gonçalves C, Paterniani MEAGZ, Tucci MLS, Castro CEF (Eds) **Boletim 200 - Instruções agrícolas para as principais culturas econômicas.** Campinas: Instituto Agronômico, p. 67-70.

Trani PE, Raij B (1997) Hortaliças. In: Raij B, Cantarella H, Quaggio JA, Furlani AMC (Eds.) **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo.** Campinas: Instituto Agronômico/Fundação IAC, p.157-185. (Boletim Técnico n.º 100)

Trani PE, Tivelli SW, Factor L, Breda Junior JM (2013) **Calagem e adubação da beterraba.** Campinas: IAC, 5p.

Urano EOM, Kurihara CH, Maeda S, Vitorino ACT, Gonçalves MC, Marchetti ME (2006) Avaliação do estado nutricional da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 4:1421-1428.

Wadt PGS, Anghinoni I, Guindani RHP, Lima AST, Puga AP, Silva GS, Prado RM (2013) Padrões nutricionais para lavouras arrozeiras irrigadas por inundação pelos métodos da CND e chance matemática. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 37: 145-156.

Zhang Q, Pan J, Wang Y, Lubet R, You M (2013) Beetroot red (betanin) inhibits vinyl carbamate-and benzo (a) pyrene-induced lung tumorigenesis through apoptosis. **Molecular carcinogenesis** 52:686-691.

CAPÍTULO 2 - Modelagem da demanda de nutrientes pela cultura da beterraba de mesa

Resumo - O sistema de balanço nutricional pode apresentar maior exatidão na estimativa das fertilizações dos cultivos em comparação às tabelas de recomendação de fertilização. Para sua eficiência, a construção do modelo necessita de informações relativas à demanda de nutrientes pela cultura e a produtividade. Objetivou-se, então, gerar modelos que melhor relacionem a demanda de cada nutriente pela cultura da beterraba e o índice de colheita de matéria seca com a produtividade de raízes, além de determinar a ordem de acúmulo total e do índice de exportação de nutrientes. O trabalho foi conduzido na região do Alto Paranaíba, MG, Brasil, durante a safra de 2017. Foram amostradas 47 áreas comerciais de beterraba, híbridos Boro e Betty. A produtividade média de raízes de beterraba foi de 68,9 Mg ha^{-1}, com variação de 38,4 a 98,6 Mg ha^{-1}. O modelo linear foi o mais adequado para expressar a relação entre a produtividade e o índice de colheita de matéria seca, e também a relação entre a produtividade e os acúmulos de nutrientes, exceto para o acúmulo total (raiz + parte aérea) de Mn e Zn, que ajustaram-se ao modelo de incrementos decrescentes. A ordem de acúmulo total de nutrientes na cultura da beterraba foi a seguinte: K > N > Ca > Mg > P > S > Fe > Zn > Mn > B > Cu. O índice de exportação da beterraba segue a ordem: Zn > P > Cu > N > Mg > K > S > B > Ca > Fe > Mn.

Palavras-chave: *Beta vulgaris* L. var. *vulgaris*, beterraba de mesa, demanda nutricional, exportação de nutrientes, índice de colheita

1 Introdução

As principais tabelas de recomendação de fertilização utilizadas para a cultura da beterraba na região Sudeste do Brasil estão nas publicações oficiais de Casali (1999) e Trani et al. (2014). Esta última, mais recente, a recomendação de fertilização para a beterraba é baseada em produtividade esperada muito aquém da produtividade atualmente obtida por produtores altamente tecnificados da principal região produtora de beterraba do Brasil (Alto Paranaíba, MG).

Uma alternativa ao uso das tabelas é o sistema de balanço nutricional (Deus et al., 2015; Dezordi et al., 2015a). Esse sistema tem se mostrado mais adequado que a tabela de recomendação por considerar as variações nas estimativas de produtividade e nos atributos do solo (como teores de nutrientes disponíveis e resíduos culturais) de forma contínua e não intervaladas em classes de fertilidade do solo (baixa, média e alta). Para isso, o sistema leva em conta a relação entre a demanda de nutrientes pelas plantas, o suprimento de nutrientes pelo solo e a produtividade esperada.

Contudo, comum a qualquer modelagem, há necessidade de obter as informações inerentes ao modelo, especialmente na região produtora, uma vez que a produtividade, a eficiência da fertilização e a demanda por nutrientes é afetada pelas condições ambientais e pacote tecnológico. Embora pouco comuns, estudos com demanda nutricional são fundamentais para o manejo da adubação de uma cultura, pois auxiliam na definição das doses de fertilizantes que devem ser aplicadas (Oliveira et al., 2010). Grangeiro et al. (2007), Sediyama et al. (2011) e Cardoso et al. (2017) determinaram o acúmulo de nutrientes pela cultura da beterraba. Entretanto, esses trabalhos foram realizados em condições experimentais específicas que não se assemelham ao sistema de produção adotado na maior região produtora brasileira de beterraba, dificultando o aproveitamento dos resultados.

A quantificação do acúmulo e exportação de nutrientes por culturas, em áreas comerciais de alta produtividade, é necessária para modelar a demanda de nutrientes e abranger maior variabilidade amostral (Cunha et al., 2015). Considerando esses preceitos, modelos foram publicados para arroz (Witt et al.,

1999; Haefele et al., 2003; Buresh et al., 2010; Xu et al., 2015), milho (Liu et al. 2006; Setiyono et al., 2010; Zhang et al. 2012; Xu et al., 2013; Jiang et al., 2017), soja (Yang et al., 2017) e trigo (Liu et al. 2006; Chuan et al., 2013). Recentemente, também foram publicados trabalhos com hortaliças, como alho (Cunha et al., 2015), batata-doce (Kumar et al., 2016), cenoura (Dezordi et al., 2015b) e mandioca (Byju et al., 2012; Ezui et al., 2017). No entanto, para a cultura da beterraba de mesa, um dos principais cultivos olerícolas do Brasil (Grangeiro et al., 2007), não há modelagem para expressar as quantidades de nutrientes acumuladas e/ou exportadas pela beterraba, em função da variação na produtividade, que possibilitem o desenvolvimento do sistema de balanço nutricional para a cultura.

Assim, objetivou-se gerar modelos que melhor relacionem a demanda de cada nutriente pela cultura da beterraba e o índice de colheita com a produtividade de raízes, além de determinar, ainda, a ordem de acúmulo total e do índice de exportação de nutrientes.

2 Material e métodos

Para a realização do trabalho, foram acompanhadas áreas comerciais de produção de beterraba nos municípios de Ibiá, Campos Altos, Rio Paranaíba e São Gotardo, na microrregião do Alto Paranaíba, Estado de Minas Gerais, Brasil, durante o ano de 2017. Os cultivos encontravam-se em altitude de 980 a 1200 m, com clima predominante Cwa, segundo a classificação de Köppen-Geiger Este clima é caracterizado por uma estação seca e um período chuvoso bem definido entre outubro e março. Os dados climáticos registrados durante o período experimental são apresentados na Tabela 1. Os tipos de solo predominantes foram os Latossolos Vermelhos e Vermelho-Amarelos, de textura muito argilosa.

Tabela 1. Temperatura mínima, temperatura máxima e precipitação durante o período experimental.

Variável climática	Mês											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Tmin (°C)	19,1	18,2	18,2	18,2	16,4	14,7	12,2	15,2	15,4	18,2	17,9	18,9
Tmax (°C)	28,8	28,6	29,3	27,6	25,6	25,0	23,0	27,9	27,9	30,2	26,5	27,3
Preciptação (mm)	337	151	95	24	108	11	0	0	29	94	260	274

O banco de dados foi composto por amostras de 47 áreas comerciais, sendo 31 áreas com o híbrido Boro e 16 com o híbrido Betty. As principais culturas antecessoras aos cultivos de beterraba foram alho, cenoura, milho e milheto. Em todas as áreas foi realizada semeadura direta, com desbaste em torno de 35 dias após a semeadura e manutenção de 500 a 550 mil plantas ha^{-1}. A semeadura estendeu-se entre os meses de janeiro e agosto de 2017. As fertilizações variaram de 99 a 280 kg ha^{-1} de N; 432 a 1254 kg ha^{-1} de P_2O_5 e 138 a 470 kg ha^{-1} de K_2O. A irrigação foi feita por sistema de pivô central.

No final do ciclo da beterraba, em cada área, amostraram-se quatro pontos, nos quais foram colhidos três metros quadrados para avaliação da produtividade de raízes. De cada ponto cinco plantas tiveram a raiz e a parte aérea separadas, lavadas (em solução detergente 0,1% e água corrente com auxílio de esponja) e colocadas a secar em estufa com ventilação forçada de ar a 70ºC, por 72 h, para quantificação da matéria seca de raiz e parte aérea. Depois, as amostras foram trituradas, em moinho tipo Wiley, equipado com peneira de 1,27 mm, e preparadas para determinação dos teores de nutrientes (N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn e Zn) nas raízes e na parte aérea, conforme métodos descritos por Miyazawa et al. (2009).

O acúmulo de cada nutriente na parte aérea e na raiz foi obtido pelo produto entre a quantidade de matéria seca e o teor do nutriente em cada parte da planta (raiz ou parte aérea). Somando-se os acúmulos de cada nutriente na parte aérea e raiz obteve-se o acúmulo total na planta. Calculou-se o índice de colheita (IC) pela razão entre o acúmulo de matéria seca da raiz e o acúmulo total da planta, o qual foi expresso em porcentagem. O índice de exportação (IE) do nutriente, expresso em porcentagem, foi obtido pela razão entre o acúmulo do nutriente na raiz e o acúmulo total da planta.

Os dados foram submetidos à análise de *outliers*, com a exclusão de valores discrepantes. Após a exclusão, realizou-se a análise descritiva das variáveis, por meio da média, desvio padrão, valor mínimo e valor máximo. Além disso, modelos matemáticos foram construídos a partir da relação das variáveis acúmulo de nutrientes na raiz, acúmulo de nutrientes total (raiz + parte aérea) e IC com a produtividade de raízes.

Os critérios para o ajuste de modelos entre a produtividade e o acúmulo de nutrientes na raiz e total (raiz + parte aérea) foram os seguintes, em ordem decrescente de prioridade: a explicação biológica dos dados, a significância dos modelos, a significância dos parâmetros do modelo e o coeficiente de determinação (Cunha et al., 2015). Segundo esses critérios, apenas dois tipos de modelos foram ajustados aos dados: linear (1) e de incrementos decrescentes (2).

$$\hat{y} = a + bx \quad (1)$$

$$\hat{y} = a\left(1 - e^{(-bx_i)}\right) \quad (2)$$

3 Resultados e discussão

A produtividade de beterraba apresentou média de 68,9 Mg ha^{-1}, com variação de 38,4 a 98,6 Mg ha^{-1} (Tabela 2). Segundo Tivelli et al. (2011), no Brasil, a produtividade de beterraba é muito variável. A produtividade média brasileira é de 25,4 a 44,7 Mg ha^{-1} (Corrêa et al., 2014; Magro et al., 2015; Silva et al., 2016). Considerando a produtividade média obtida, o acúmulo total de macronutrientes foi de 294; 34; 360; 93; 37 e 24 kg ha^{-1} de N, P, K, Ca, Mg e S, respectivamente, e para os micronutrientes, 260; 71; 1687; 323 e 411 g ha^{-1} para B, Cu, Fe, Mn e Zn, respectivamente (Tabela 2).

Tabela 2. Produtividade, matéria seca total, índice de colheita e acúmulo nas raízes e total de N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn e Zn da cultura da beterraba.

Variável	Unidade	n	Média	s	Mínimo	Máximo
Produtividade	Mg ha^{-1}	47	68,9	15,0	38,4	98,6
Matéria seca total	Mg ha^{-1}	47	13,8	2,1	9,6	17,4
Índice de colheita	%	47	67,6	6,1	56,8	83,0
Acúmulo de N nas raízes	kg ha^{-1}	40	177	39	100	246
Acúmulo de P nas raízes	kg ha^{-1}	45	21	5	12	29
Acúmulo de K nas raízes	kg ha^{-1}	46	167	42	71	240
Acúmulo de Ca nas raízes	kg ha^{-1}	40	29	5	21	38
Acúmulo de Mg nas raízes	kg ha^{-1}	47	18	4	11	29
Acúmulo de S nas raízes	kg ha^{-1}	43	9	2	4	13
Acúmulo de B nas raízes	g ha^{-1}	45	95	16	62	130
Acúmulo de Cu nas raízes	g ha^{-1}	41	46	15	15	80
Acúmulo de Fe nas raízes	g ha^{-1}	35	499	99	343	715
Acúmulo de Mn nas raízes	g ha^{-1}	38	83	24	49	138
Acúmulo de Zn nas raízes	g ha^{-1}	40	253	51	158	372
Acúmulo total de N	kg ha^{-1}	39	294	52	186	394
Acúmulo total de P	kg ha^{-1}	47	34	6	22	44
Acúmulo total de K	kg ha^{-1}	46	360	93	149	501
Acúmulo total de Ca	kg ha^{-1}	41	93	17	66	127
Acúmulo total de Mg	kg ha^{-1}	46	37	6	26	50
Acúmulo total de S	kg ha^{-1}	41	24	5	16	32
Acúmulo total de B	g ha^{-1}	40	260	43	188	352
Acúmulo total de Cu	g ha^{-1}	15	71	22	34	114
Acúmulo total de Fe	g ha^{-1}	40	1687	395	1075	2346
Acúmulo total de Mn	g ha^{-1}	38	323	114	177	577
Acúmulo total de Zn	g ha^{-1}	41	411	99	244	695

n: número de observações; s: desvio padrão

Houve diferença na ordem de acúmulo médio de nutrientes total e nas raízes (Tabela 2). A ordem de acúmulo médio total (raiz + parte aérea) foi K > N > Ca > Mg > P > S > Fe > Zn > Mn > B > Cu, enquanto nas raízes a ordem de acúmulo médio

foi N > K > Ca > P > Mg > S > Fe > Zn > B > Mn > Cu. Verifica-se que a sequência obtida para o acúmulo médio total de macronutrientes foi igual à obtida por Sediyama et al. (2011) e semelhante à de Cardoso et al. (2017), em que houve inversão das posições de Ca e Mg (K>N>Mg>Ca>P>S). Essa inversão pode ser explicada pelo efeito antagônico entre Ca e Mg (Prado, 2008; Abrahão et al., 2014), em especial quando são aplicadas elevadas doses de calcário com ampla relação Ca:Mg nos cultivos de hortaliças. Para os micronutrientes, Sediyama et al. (2011) obtiveram sequência semelhante, com diferença de posição apenas para Zn e Mn (Fe>Mn>Zn>B>Cu). Isso pode ser evidência da diferença nas condições de oxirredução do Mn entre os ambientes de cultivo, haja vista que Sediyama et al. (2011) realizaram a aplicação de resíduos orgânicos. Estes intensificam a atividade microbiana, o que aumenta a redução do Mn e a sua liberação para a solução do solo (Schmidt et al., 2009).

Observou-se ajuste das médias de produtividade e IC ao modelo de incrementos decrescentes (Figura 1). Com isso, dentro do intervalo da função, para cada aumento de produtividade de 1 Mg ha^{-1} haverá acréscimo de 0,011% no IC.

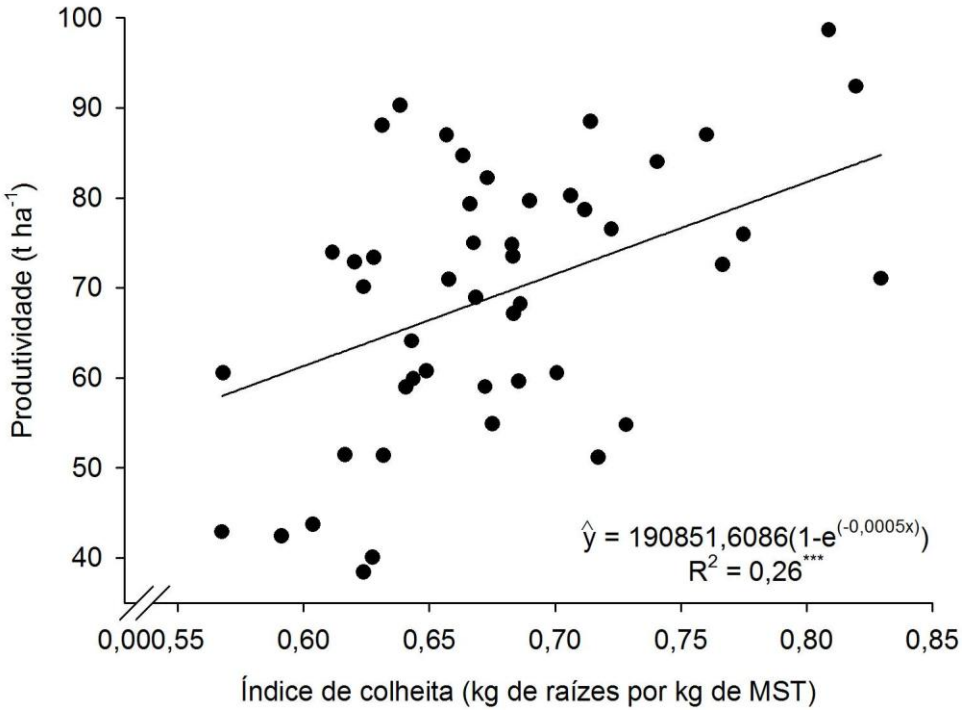

Figura 1. Relação entre a produtividade e o índice de colheita da cultura da beterraba. *** significativo ao nível de 0,001.

O IE médio seguiu a ordem: Zn > P > Cu > N > Mg > K > S > B > Ca > Fe > Mn (Tabela 3). Logo, atenção especial deve ser dada aos nutrientes P, N e K na adubação de reposição, pois apresentam IE relativamente alto e são demandados em maiores quantidades (Tabela 2). Consequentemente, pode haver empobrecimento do solo por colheitas sucessivas, caso as adubações sejam inferiores às quantidades exportadas (Cunha et al., 2015). O empobrecimento pode ser ainda maior em lavouras de alta produtividade, haja vista o aumento linear do IC em função da produtividade (Figura 1). Em alguns mercados, a comercialização de beterraba é feita em maços das raízes com as folhas (Tivelli et al., 2011). Nesse caso, destacam-se nutrientes com baixo IE, como S, B, Ca, Fe e Mn, em que mais de 60% de seus acúmulos estão nas folhas.

Tabela 3. Índice de exportação médio de N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn e Zn da cultura da beterraba.

Nutriente	n	Média	s	Mínimo	Máximo
		----------%----------			
N	41	59,9	4,9	51,2	69,2
P	40	62,5	6,5	48,6	72,0
K	42	47,3	7,8	34,0	62,8
Ca	45	32,1	5,9	21,4	41,9
Mg	43	49,5	5,0	42,0	60,0
S	40	35,9	5,6	28,1	49,8
B	40	34,7	4,9	26,4	47,6
Cu	15	60,8	9,8	42,4	74,1
Fe	39	31,5	5,2	22,6	42,0
Mn	43	22,8	4,1	14,9	28,9
Zn	40	64,4	8,4	51,4	80,0

n: número de observações; s: desvio padrão

Os modelos ajustados para a relação entre a produtividade e o acúmulo de nutrientes não apresentaram coeficientes de determinação (R^2) elevados (valores entre 0,11 e 0,84). Entretanto, todos os modelos e seus respectivos parâmetros foram significativos ($p < 0,001$), com exceção do Cu e do Mn (Figuras 2 e 3).

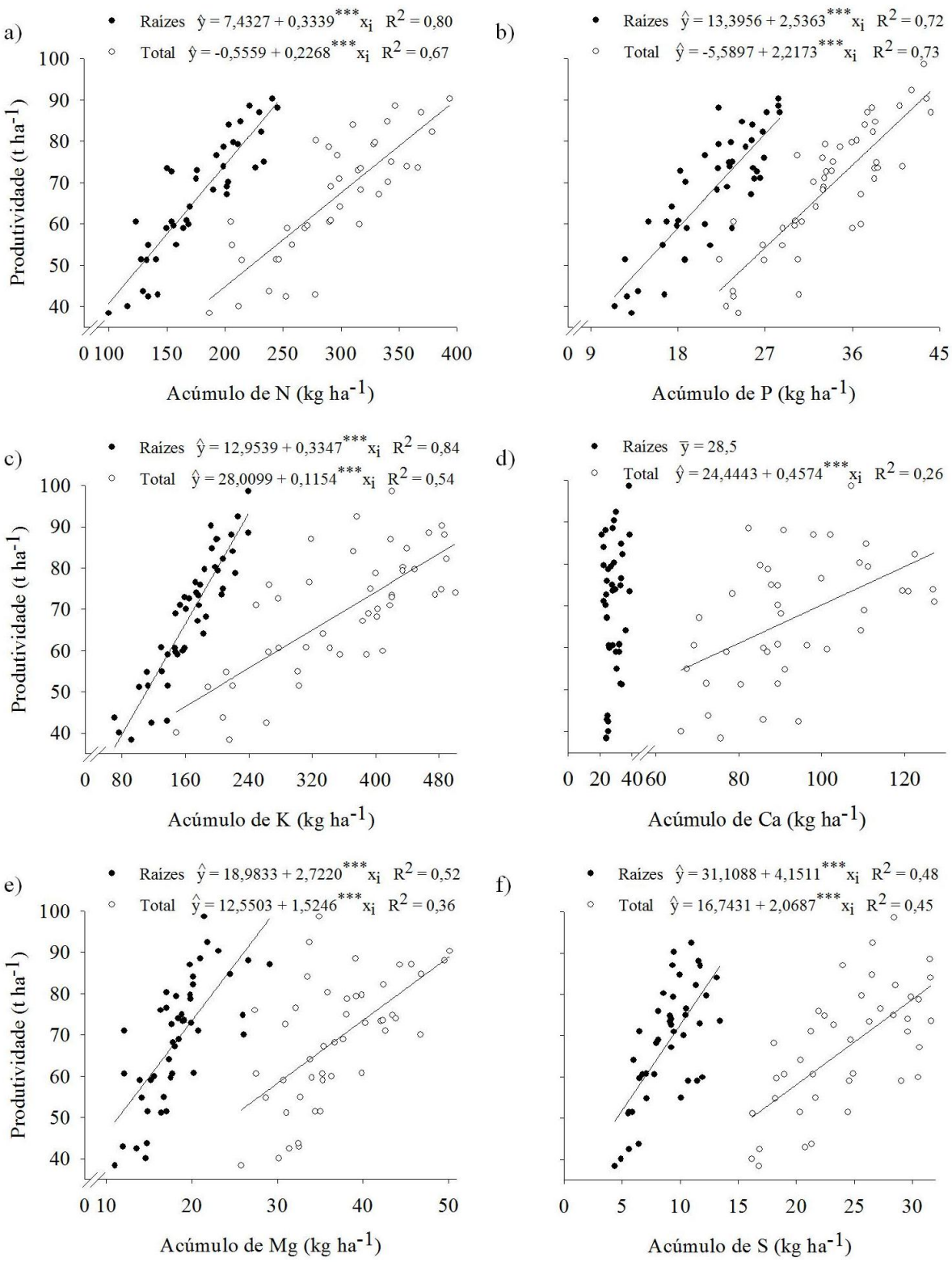

Figura 2. Relação entre a produtividade e o acúmulo nas raízes e total de N (a), P (b), K (c), Ca (d), Mg (e) e S (f). *** significativo ao nível de 0,001.

O modelo linear crescente foi o que melhor expressou a relação entre a produtividade da cultura e o acúmulo de nutrientes na raiz e total (raiz + parte aérea), com exceção do acúmulo de Ca nas raízes (Figura 2). Tal fato pode ser atribuído à baixa mobilidade do Ca na planta (Prado, 2008), o que ocasionou baixo acúmulo do nutriente na raiz, que é um órgão de reserva. Para os demais nutrientes, a tendência linear crescente, em razão de não ter atingido o máximo acúmulo, sugere que os mesmos podem estar dentro da zona de deficiência (Taiz e Zieger, 2017) e que a planta ainda responde ao fornecimento do nutriente e, consequentemente, a produtividade de raízes.

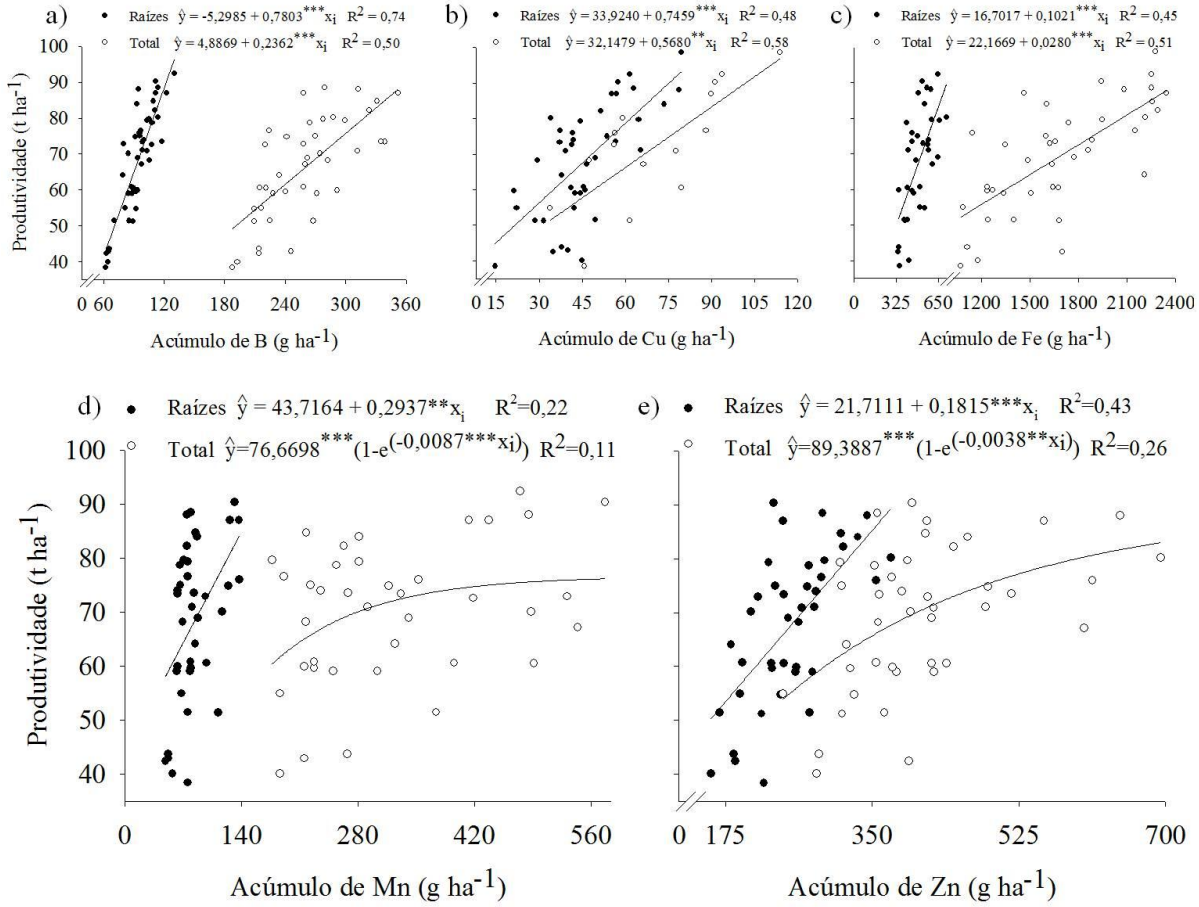

Figura 3. Relação entre a produtividade e o acúmulo nas raízes e total de B (a), Cu (b), Fe (c), Mn (d) e Zn (e). ** e *** significativos aos níveis de 0,01 e 0,001, respectivamente.

Dentro do intervalo de cada função, os modelos ajustados sugeriram que para aumentar a produtividade da cultura em 1 Mg ha^{-1}, a beterraba acumulará mais 4,41

kg ha^{-1} de N; 0,45 kg ha^{-1} de P; 8,67 kg ha^{-1} de K; 2,19 kg ha^{-1} de Ca; 0,66 kg ha^{-1} de Mg e 0,48 kg ha^{-1} de S. Para as raízes, os modelos indicaram incrementos médios de 3,00 kg ha^{-1} de N; 0,39 kg ha^{-1} de P; 2,99 kg ha^{-1} de K; 0,37 kg ha^{-1} de Mg e 0,24 kg ha^{-1} de S. Ainda de acordo com os modelos, o acúmulo necessário para se alcançar a produtividade média do trabalho (68,9 Mg ha^{-1}) é de 306 kg ha^{-1} de N; 34 kg ha^{-1} de P; 354 kg ha^{-1} de K; 97 kg ha^{-1} de Ca; 37 kg ha^{-1} de Mg e 25 kg ha^{-1} de S.

Para os micronutrientes, observou-se tendência linear crescente entre a produtividade da cultura e o acúmulo de nutrientes nas raízes (Figura 3). Com relação ao acúmulo total, as médias para B, Cu e Fe melhor se ajustaram ao modelo linear positivo, enquanto para Mn e Zn houve ajuste ao modelo de incrementos decrescentes. Esse é representado pela região de comportamento parabólico existente entre a zona de deficiência e a zona adequada do modelo que explica a relação entre o crescimento vegetal (ou produtividade das culturas) e o conteúdo de um nutriente no tecido vegetal (Witt et al., 1999). Dessa forma, os acúmulos de Mn e Zn podem ter excedido os limites da zona de deficiência e são esperados pequenos aumentos de produtividade com o fornecimento desses nutrientes.

Os modelos indicaram que para aumentar a produtividade da cultura em 1 Mg ha^{-1}, dentro do intervalo da função, a beterraba acumulará nas raízes mais 1,28 g ha^{-1} de B; 1,34 g ha^{-1} de Cu; 9,79 g ha^{-1} de Fe; 3,41 g ha^{-1} de Mn e 5,51 g ha^{-1} de Zn. Para a produtividade média do trabalho (68,9 Mg ha^{-1}), o acúmulo total necessário é de 271 g ha^{-1} de B; 65 g ha^{-1} de Cu; 1.669 g ha^{-1} de Fe; 263 g ha^{-1} de Mn e 388 g ha^{-1} de Zn.

4 Conclusões

O modelo linear permite melhor estimar o acúmulo de nutrientes pela cultura da beterraba a partir da produtividade de raízes, exceto para manganês e zinco.

A ordem de acúmulo total de nutrientes na cultura da beterraba, foi a seguinte: K > N > Ca > Mg > P > S > Fe > Zn > Mn > B > Cu.

O índice de exportação da beterraba segue a ordem: Zn > P > Cu > N > Mg > K > S > B > Ca > Fe > Mn.

5 Referências

Abrahão C, Bôas RLV, Bull LT (2014). Relação K:Ca:Mg na solução nutritiva para produção de minitomate cultivado em substrato. **Irriga** 19:214-224.

Buresh RJ, Pampolino MF, Witt C (2010) Field-specific potassium and phosphorus balances and fertilizer requirements for irrigated rice-based cropping systems. Plant **and Soil** 335:35-64.

Byju G, Nedunchezhiyan M, Ravindran CS, Mithra VS, Ravi V, Naskar SK (2012) Modeling the response of cassava to fertilizers: a site-specific nutrient management approach for greater tuberous root yield. **Communications in Soil Science and Plant Analysis** 43:1149-1162.

Cardoso AII, Magro FO, Oliveira Júnior MX, Abrahão C, Tavares AEB, Fernandes DM (2017) Accumulation of macronutrients in beetroot plant. **Horticultura Brasileira** 35:328-334.

Casali VWD (1999) Beterraba. In: Ribeiro AC, Guimarães PTG, Alvarez VV H (Eds.) **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), p. 182.

Chuan L, He P, Jina J, Li S, Grant C, Xua X, Qiua S, Zhaoa S, Zhoua W (2013) Estimating nutrient uptake requirements for wheat in China. **Field Crops Research** 146:96-104.

Corrêa CV, Cardoso AII, Souza LG, Antunes WLP, Magolbo LA (2014) Produção de beterraba em função do espaçamento. **Horticultura Brasileira** 32:111-114.

Cunha MLP, Oliveira TF, Clemente JM, Gentil TG, Aquino LA (2015) Modeling of nutrients demands in garlic crop. **Australian Journal of Crop Science** 9:1205-1213.

Deus JAL, Soares I, Neves JCL, Medeiros JF, Miranda FR (2015) Fertilizer recommendation system for melon based on nutritional balance. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 39:498-511.

Dezordi LR, Clemente JM, Oliveira TF, Gentil TG, Aquino LA (2015b) Nutrient demand of the carrot crop. **African Journal of Agricultural Research** 10:3533-3542.

Dezordi LR, Aquino LA, Novais RF, Aquino PM, Santos LPD (2015a) Nutrient recommendation model for carrot crop – Ferticalc Carrot. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 39:1714-1722.

Ezui KS, Franke AC, Ahiabor BDK, Tetteh FM, Sogbedji J, Janssen BH, Mando A, Giller KE (2017) Understanding cassava yield response to soil and fertilizer nutrient supply in West Africa. **Plant and Soil** 420:331-347.

Grangeiro LC, Negreiros MD, Souza BD, Azevedo PD, Oliveira SD, Medeiros MD (2007) Acúmulo e exportação de nutrientes em beterraba. **Ciência e Agrotecnologia** 31:267-273.

Haefele SM, Wopereis MCS, Ndiaye MK, Barro SE, Isselmou MO (2003) Internal nutrient efficiencies, fertilizer recovery rates and indigenous nutrient supply of irrigated lowland rice in Sahelian West Africa. **Field Crops Research** 80:19-32.

Jiang WT, Liu XH, Qi W, Xu XN, Zhu YC (2017) Using QUEFTS model for estimating nutrient requirements of maize in the Northeast China. **Plant, Soil and Environment** 63:498-504.

Kumar P, Byju G, Singh BP, Minhas JS, Dua VK (2016) Application of QUEFTS Model for Site-Specific Nutrient Management of NPK in Sweet Potato (*Ipomoea batatas* L. Lam). **Communications in Soil Science and Plant Analysis** 47:1599-1611.

Liu M, Yu Z, Liu Y, Konjin NT (2006) Fertilizer requirements for wheat and maize in China: the QUEFTS approach. **Nutrient Cycling in Agroecosystems** 74:245-258.

Magro FO, Silva EG, Takata WHS, Cardoso AII, Fernandes DM, Evangelista RM (2015) Organic compost and potassium top dressing fertilization on production and quality of beetroot. **Australian Journal of Crop Science** 9:962-967.

Miyazawa M, Pavan MA, Muraoka T, Carmo CAFS, Melo WJ (2009) Análises químicas de tecido vegetal. In: Silva FC (ed) **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes.** Brasília: EMBRAPA, p. 191-233.

Oliveira ED, Freire FJ, Oliveira RD, Freire MBGS, Simões Neto DE, Silva SD (2010) Extração e exportação de nutrientes por variedades de cana-de-açúcar cultivadas sob irrigação plena. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 34:1343-1352.

Prado RM (2008) **Nutrição de plantas.** São Paulo: Editora UNESP, 420 p.

Schmidt F, Sousa RO, Fortes MA, Wolter RCD, Wesz J (2009) Resíduos de azevém na superfície de um Planossolo alagado e seus efeitos na concentração de nutrientes na solução do solo e em plantas de arroz. **Ciência Rural** 39:2080-2086.

Sediyama MA, Santos MR, Vidigal SM, Salgado LT (2011) Produtividade e exportação de nutrientes em beterraba cultivada com cobertura morta e adubação orgânica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** 15:883–889.

Silva PNL, Lanna NBL, Cardoso AII (2016) Produção de beterraba em função de doses de torta de mamona em cobertura. **Horticultura Brasileira** 34: 416-421.
Taiz L, Zeiger E (2017) **Fisiologia Vegetal.** Porto Alegre: Artmed, 888 p.

Tivelli SW, Factor TL, Teramoto JRS, Fabri EG, Moraes AD, Trani PE, May A (2011) **Beterraba: do plantio à comercialização.** Campinas: IAC, 45 p.

Trani PE, Factor TL, Breda Júnior JM, Purquerio LFV, Lima Júnior S (2014) Beterraba. In: Aguiar ATE, Gonçalves C, Paterniani MEAGZ, Tucci MLS, Castro CEF (Eds) **Boletim 200 - Instruções agrícolas para as principais culturas econômicas.** Campinas: IAC, p. 67-70.

Xu X, He P, Pampolino MF, Chuan L, Johnston AM, Qiu S, Zhao S, Zhou W (2013) Nutrient requirements for maize in China based on QUEFTS analysis. **Field Crops Research** 150:115-125.

Xu X, Xie J, Hou Y, He P, Pampolino MF, Zhao S, Qiua S, Johnstone AM, Zhou W (2015) Estimating nutrient uptake requirements for rice in China. **Field Crops Research** 180:37-45.

Witt C, Dobermann A, Abdulrachman S, Gines HC, Guanghuo W, Nagarajan R, Satawatananont S, Son TT, Tan PS, Tiem LV, Simbahan GC, Olk DC (1999) Internal nutrient efficiencies of irrigated lowland rice in tropical and subtropical Asia. **Field Crops Research** 63:113-138.

Yang F, Xu X, Wang W, Ma J, Wei D, He P, Pampolino MF, Johnston AM (2017) Estimating nutrient uptake requirements for soybean using QUEFTS model in China. **PloS ONE.** 1-12.

Zhang Y, Hou P, Gao Q, Chen X, Zhang F, Cui Z (2012) On-farm estimation of nutrient requirements for spring corn in North China. **Agronomy Journal** 104:1436-1442.

CAPÍTULO 3 - Modelagem da recomendação de nutrientes para a cultura da beterraba de mesa

Resumo - Os sistemas de balanço nutricional são alternativa ao uso das tabelas para a recomendação eficiente de fertilização. Nestes sistemas, modelos matemáticos permitem variar de forma contínua o requerimento de nutrientes da cultura em função da produtividade esperada, condizente com o potencial produtivo atual, e do suprimento de nutrientes pelo solo e pelos resíduos culturais. Com isso, objetivou-se desenvolver modelos de recomendação de nutrientes para a cultura da beterraba com base no princípio do balanço nutricional. O sistema de recomendação de nutrientes foi dividido no subsistema requerimento (REQ), que inclui a demanda da cultura e a eficiência de recuperação (ER) do nutriente aplicado, e no subsistema suprimento (SUP), que corresponde ao fornecimento de nutrientes pelo solo, pelos resíduos culturais e pela correção do solo. Para determinar os atributos necessários ao cálculo da demanda nutricional da cultura, obteve-se um banco de dados com informações de lavouras de beterraba localizadas no Alto Paranaíba - MG. Para nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K), o sistema recomenda aplicar o total exportado da área pela cultura, quando o SUP for maior que o REQ, e a diferença entre o requerido pela planta e o suprido pelo solo, quando o SUP for menor que o REQ. Devido à escassez de dados referente à ER, para Ca, Mg e S, o sistema apresenta somente o subsistema SUP, e para os micronutrientes, apenas a extração e a exportação da cultura. A modelagem permite a recomendação eficiente de nutrientes para a cultura da beterraba.

Palavras-chave: adubação eficiente, balanço nutricional, *Beta vulgaris* L. var. *vulgaris*, nutrição de hortaliças

1 Introdução

No Brasil, as tabelas de recomendação contidas em publicações oficiais como a “5ª Aproximação” (Ribeiro et al., 1999) e o “Boletim 200” (Aguiar et al., 2014) são a principal ferramenta utilizada no manejo de fertilizantes em sistemas agrícolas. Embora tenham trazido grande contribuição na melhoria das recomendações, as tabelas apresentam limitações (Tomé Júnior, 2004). Dentre essas, a aplicabilidade regional baseada em fronteiras políticas e não em condições edafoclimáticas, as recomendações que não variam de forma contínua com a produtividade esperada ou com o teor de nutrientes no solo e a abrangência de produtividades, geralmente, inferiores às obtidas em cultivos tecnificados (Santos et al., 2008; Deus et al., 2015; Dezordi et al., 2015). Consequentemente, há certo empirismo nas adubações realizadas pelos agricultores, que na maior parte dos cultivos aplicam doses fixas de nutrientes, em especial no cultivo de hortaliças.

Uma alternativa ao uso das tabelas para a recomendação eficiente de fertilizantes são os sistemas de balanço nutricional, os quais apresentaram resultados satisfatórios para culturas como a soja (Santos et al., 2008), abacaxi (Silva et al., 2009), melão (Deus et al., 2015), cenoura (Dezordi et al., 2015) e repolho (Oliveira et al., 2019). Nestes sistemas, modelos matemáticos permitem estimar o requerimento de nutrientes pela cultura em função da produtividade esperada e do suprimento de nutrientes pelo solo de acordo com os resultados da análise química (nutrientes disponíveis) e os resíduos culturais presentes. Logo, a recomendação de adubação baseia-se na diferença entre a demanda da cultura e o suprimento dos nutrientes disponíveis no solo mais o advindo da mineralização dos resíduos culturais.

Devido à carência de dados na literatura, a obtenção de atributos relacionados à demanda nutricional representa o ponto crítico para a proposição de um sistema de balanço nutricional (Dezordi et al., 2015). Dentre esses atributos estão o teor de matéria seca (*t*MS), o coeficiente de utilização biológica (CUB), o índice de colheita (IC), o índice de exportação (IE) e a eficiência de recuperação pela planta (ER) dos nutrientes aplicados no solo. O CUB pode ser definido como a quantidade de matéria seca produzida por unidade do nutriente acumulado em

determinado órgão da planta (Fageria, 1998). O IC representa a fração de matéria seca no órgão comercial da cultura (raiz tuberosa, no caso da cultura da beterraba) em relação à toda matéria seca da planta. O IE corresponde à porcentagem do nutriente no órgão comercial da cultura (raiz tuberosa, no caso da cultura da beterraba) em relação ao acúmulo da planta. A ER indica a porcentagem do nutriente aplicado ao solo que a planta recupera (Fageria, 1998).

Para o suprimento de nutrientes no solo, as informações necessárias podem ser obtidas em trabalhos disponíveis na literatura. Podem ser citados os trabalhos com eficiência de recuperação dos extratores utilizados nas análises de solo (Morais, 1999; Souza, 1999; Mello, 2000) e o acúmulo e a dinâmica de mineralização e liberação de nutrientes pelos resíduos culturais (Padovan et al., 2006; Gama-Rodrigues et al., 2007; Marcelo et al., 2012a,b).

A beterraba (*Beta vulgaris* L. var. *vulgaris*) está entre as 17 principais hortaliças propagadas por sementes (ABCSEM, 2014). Atualmente, é o 33° produto mais comercializado na CEAGESP, com a comercialização de 28.360 toneladas (CEAGESP, 2017). Dada sua importância econômica e o aumento da área cultivada nos últimos anos, sobretudo por produtores com amplo acesso à tecnologia, o sistema de balanço nutricional é uma ferramenta que pode embasar adubações coerentes com a fertilidade do solo e a produtividade almejada para a cultura. Assim, objetivou-se desenvolver modelos de recomendação de nutrientes para a cultura com base no princípio do balanço nutricional.

2 Material e métodos

2.1 Desenvolvimento do sistema

Os modelos matemáticos foram subdivididos em dois subsistemas: requerimento nutricional (REQ) e suprimento de nutrientes pelo solo (SUP). O requerimento nutricional foi estimado com base na exportação da cultura e na ER do nutriente aplicado. Para calcular a extração, o subsistema REQ considerou a exportação dos nutrientes em função da produtividade almejada e o IC. O

subsistema SUP considerou o fornecimento de nutrientes pelo solo, pelos resíduos de cultivos anteriores e pela correção do solo (calagem e gessagem).

2.1.1 Subsistema Requerimento – REQ

2.1.2.1 Determinação de atributos para modelagem da demanda nutricional

Para determinar os atributos necessários ao cálculo da demanda nutricional da cultura da beterraba obteve-se um banco de dados com informações de lavouras de beterraba localizadas no Alto Paranaíba - MG. Para isso, foram realizadas amostragens durante o ano de 2017, que abrangeram cultivos localizados nos municípios de Ibiá, Campos Altos, Rio Paranaíba e São Gotardo. Nesses municípios, os cultivos de beterraba encontravam-se à altitude de 980 a 1200 m, com clima predominante Cwa, segundo a classificação de Köppen-Geiger. Este clima é caracterizado por uma estação seca e um período chuvoso bem definido entre outubro e março. Os tipos de solo predominantes foram os Latossolos Vermelho e Vermelho-Amarelo de textura muito argilosa.

Foram amostradas 47 lavouras de beterraba, das quais 31 cultivadas com o híbrido Boro e 16 com o híbrido Betty. Nessas lavouras, determinaram-se a produtividade de raízes, o acúmulo de matéria seca das raízes e da parte aérea e os respectivos teores de nutrientes nessas partes da planta. Amostras das raízes e da parte aérea coletadas na colheita foram secas em estufa com circulação forçada de ar a 70ºC por 72 h. Em seguida foram trituradas em moinho Willey com peneira de 1,27 mm. Os teores de nutrientes foram determinados segundo métodos descritos em Malavolta et al. (1997).

Foram ajustados modelos para estimar a exportação de nutrientes em função da produtividade. Calculou-se o IC pela razão entre o acúmulo de MS ou nutrientes no órgão comercial (raiz) e o acúmulo total da cultura (raiz + parte aérea), o qual foi expresso em percentagem.

A ER dos nutrientes aplicados foi estimada com base em trabalhos encontrados na literatura. Oliveira et al. (2017), em solo com teor de matéria orgânica de 33,3 g kg^{-1}, verificaram que a ER do N variou de 70 a 100%, com esse

último valor obtido para as doses de N abaixo do nível crítico encontrado no trabalho (100 kg ha^{-1} de N). Em solo com teor de matéria orgânica igual a 19,0 g kg^{-1}, Aquino et al. (2006) constataram que o acúmulo total de N foi superior a 100 kg ha^{-1} mesmo sem aplicação do nutriente. Esses resultados suscitam que a matéria orgânica do solo e resíduos culturais podem influenciar significativamente o acúmulo de N pela beterraba. Dessa forma, para evitar a recomendação de doses de N superestimadas, considerou-se para essa simulação o valor de 95% para a ER, número razoável devido ao alto residual de N em áreas de cultivo de hortaliças. Além disso, o aumento da dose de N induz à maior partição de matéria seca e, principalmente, fresca, para a parte aérea ao invés da raiz (Aquino et al., 2006).

Para o P, Oliveira et al. (2016) obtiveram em solo de textura média taxa de recuperação de 9,2% para a cultura da beterraba. Machado et al. (2011) constataram que o aumento das doses de fertilizantes fosfatados proporcionam maior aumento da disponibilidade de P no solo arenoso que no argiloso, o que confirma o maior tampão desse último solo para P. Destaca-se que a adsorção reduz a disponibilidade de P no solo, o que culmina com menor absorção do nutriente pelas plantas e consequente redução da ER. Desse modo, dada a textura argilosa do solo utilizado nessa simulação, foi adotado o valor de 10%. Entretanto, caso seja utilizada a adubação localizada de P, esse valor pode ser aumentado. Trabalhos recentes têm demonstrado que esse modo de aplicação é mais eficiente que a aplicação a lanço no fornecimento do nutriente a hortaliças, como repolho (Duarte et al., 2019) e cenoura (Gonçalves, 2018). Logo, para a beterraba existe a necessidade de estudos nesse sentido, o que pode aumentar a eficiência da adubação fosfatada na cultura, sobretudo em solos com textura argilosa.

A ER do K aplicado pode atingir valores superiores a 70% em solo com alto teor do nutriente (3,2 $mmol_c$ dm^{-3}) (Passos, 2019). Destaca-se que vários fatores influenciam o suprimento de K, como relação quantidade/intensidade (Silva et al., 2000), fertilizante recém-adicionado (Rosolem et al., 2012), mineralogia do solo (Faria et al., 2012) e níveis de umidade e compactação (Costa et al., 2009). Para outras hortaliças foram determinados valores de ER de 70,0% para a batata (Fernandes e Soratto, 2012) e 100,0% para o repolho (Oliveira, 2017). Com isso, foi adotado o valor de 95% para essa simulação.

2.1.2.2 Modelagem do requerimento nutricional

Para estimar o requerimento nutricional, o subsistema REQ considerou a extração da cultura (calculada em função da produtividade) e a ER do nutriente aplicado. Com exceção do Ca, a exportação (EXP) foi estimada em função da produtividade através de modelos lineares obtidos no Capítulo 2 (Tabela 1), os quais foram adotados devido à melhor representação da dispersão dos dados observados.

A extração (EXT) e o requerimento (REQ), exceto para o Ca, foram estimados de acordo com equações adaptadas de Dezordi et al. (2015). Para o Ca, a EXT foi estimada a partir do modelo EXT = (Prod – 24,4443) / 0,4574.

$$EXT = \frac{100 \,.EXP}{IE}$$

$$REQ = \frac{100 \,.EXT}{ER}$$

Em que:

EXT: extração do nutriente (kg ha^{-1} ou g ha^{-1} para macro e micronutrientes, respectivamente);

EXT: exportação do nutriente (kg ha^{-1} ou g ha^{-1} para macro e micronutrientes, respectivamente);

IE: índice de exportação do nutriente (% - Tabela 2);

REQ: requerimento do nutriente (kg ha^{-1} ou g ha^{-1} para macro e micronutrientes, respectivamente);

ER: eficiência de recuperação pela planta do nutriente aplicado (%).

Tabela 1. Modelos para estimativa da exportação de nutrientes (EXP) em função da produtividade (Prod).

Nutriente	Unidade	Equação	R^2
N	kg ha^{-1}	EXP = (Prod - 7,4327) / 0,3339	0,80
P		EXP = (Prod - 13,3956) / 2,5363	0,72
K		EXP = (Prod - 12,9539) / 0,3347	0,84
Ca		EXP = $\bar{y}$ = 28,5	-
Mg		EXP = (Prod - 18,9833) / 2,7220	0,52
S		EXP = (Prod - 31,1088) / 4,1511	0,48
B		EXP = (Prod + 5,2985) / 0,7803	0,74
Cu	g ha^{-1}	EXP = (Prod - 33,9240) / 0,7459	0,48
Fe		EXP = (Prod - 16,7017) / 0,1021	0,45
Mn		EXP = (Prod - 43,7164) / 0,2937	0,22
Zn		EXP = (Prod - 21,7111) / 0,1815	0,43

Tabela 2. Média e erro padrão do índice de exportação de nutrientes obtidos para a cultura da beterraba.

	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
$\bar{X}$ (%)	59,9	62,5	47,3	32,1	49,5	35,9	34,7	60,8	31,5	22,8	64,4
S (%)	0,8	1,0	1,2	0,9	0,8	0,9	0,8	2,5	0,8	0,6	1,3

$\bar{X}$: média; S: erro padrão da média

2.1.2 Subsistema suprimento - SUP

O subsistema SUP foi desenvolvido somente para macronutrientes devido ao desconhecimento das constantes de decomposição de micronutrientes das principais culturas antecessoras ao cultivo de beterraba. Para estimar o suprimento o subsistema levou em consideração o fornecimento de nutrientes provenientes do solo, dos resíduos de culturas anteriores e da correção do solo (calagem e gessagem):

$$SUP = SUP_{solo} + SUP_{resíduos} + SUP_{calagem/gessagem}$$

2.1.2.1 Suprimento pelo solo

Para estimar o suprimento de nutrientes pelo solo foram considerados os resultados da análise química do solo, a eficiência de recuperação dos nutrientes pelos extratores utilizados nas análises e a profundidade efetiva do sistema radicular da cultura da beterraba, conforme a seguinte equação:

$$SUP\ X_{solo} = \frac{X_{análise}\ .\ PER}{ER_{Ext}\ .10}$$

Em que:

$SUP\ X_{solo}$: suprimento do nutriente X pelo solo (kg ha^{-1});

$X_{análise}$: teor do nutriente X na análise química do solo (mg dm^{-3}; $mmol_c\ dm^{-3}$)

PER: profundidade efetiva do sistema radicular (cm);

ER_{Ext}: eficiência de recuperação do nutriente pelo extrator (mg dm^{-3}/mg dm^{-3} - Tabela 3).

Tabela 3. Eficiência de recuperação do nutriente do solo pelo extrator (mg dm^{-3}/mg dm^{-3}) em função, ou não, do fósforo remanescente (P-rem).

Nutriente	Extrator	Equação	R^2
P	Mehlich-1	$TR_P = 0,0672821 + 0,012165^{**}P\text{-}rem$	0,681
P	Resina	$TR_P = 0,419^{***}P\text{-}rem^{0,128099}$	0,694
K	Mehlich-1	$TR_K = 0,8020$	-
K	Resina	$TR_K = 0,7559$	-
Ca	KCl e Resina	$TR_{Ca} = 0,7661$	-
Mg	KCl e Resina	$TR_{Mg} = 0,7989$	-
S	$Ca(H_2PO_4)_2$ + HOAc	$TR_S = 0,04 + 0,057^{**}P\text{-}rem$	0,955

***Significativo pelo teste t a 0,1 %; **Significativo pelo teste t a 1 %. Adaptado de Morais (1999), Souza (1999) e Mello (2000) apud Dezordi et al. (2015). P-rem: Fósforo remanescente (mg L^{-1}).

Para estimar o suprimento de N pelo solo empregou-se a equação de cinética de mineralização da matéria orgânica dos solos brasileiros descritos por Carvalho et al. (2006) desenvolvidos segundo o modelo proposto por Stanford e Smith (1972):

$$SUP\ N_{solo} = (0,5\ .\ PER\ .\ D_{solo}\ .\ T_{MO}\ .\ 1,48)e^{0,006t}$$

Em que:

$SUP\ N_{solo}$: suprimento de N pelo solo (kg ha^{-1});

PER: profundidade efetiva das raízes (cm);

D_{solo}: densidade do solo (kg dm^{-3});

T_{MO}: teor de matéria orgânica no solo (dag kg^{-1});

t: ciclo da cultura (dia).

A temperatura e, principalmente, a umidade do solo podem alterar a taxa de mineralização da matéria orgânica (Costa e Sangakkara, 2006). Ademais, práticas como a calagem, adição de P e revolvimento intensivo do solo, típicas de áreas de cultivo de hortaliças, podem acelerar a taxa de mineralização. Logo, este modelo pode estar subestimando a contribuição do N proveniente da matéria orgânica nessas áreas.

Diferente de outros sistemas de recomendação de nutrientes que consideram a PER somente de 20 cm, para este foi considerada uma PER de 30 cm (Tabela 4). Essa maior profundidade foi adotada a partir de resultados obtidos em coletas em quatro pontos de quatro talhões com padrões distintos de manejo nas camadas de 0-20, 20-30, 30-40, 40-50 e 50-60 cm na direção da raiz principal das plantas com o uso de uma sonda de 0,074 m de diâmetro (adaptado de Böhm, 1979). Posteriormente, as raízes foram separadas conforme Zaccheo et al. (2012) e considerou-se como PER a profundidade na qual se situam pelo menos 80% das raízes (Klar, 1991).

Tabela 4. Porcentagem acumulada de raízes por camadas para estabelecimento da profundidade efetiva do sistema radicular da cultura da beterraba.

Camada	Talhão 1	Talhão 2	Talhão 3	Talhão 4	Média	Erro padrão
cm	----------% acumulada----------					%
0-20	86,2	68,9	82,5	76,6	78,6	3,8
20-30	92,0	84,8	92,4	89,5	89,7	1,7
30-40	95,0	91,8	96,4	95,2	94,6	1,0
40-50	97,5	98,8	98,1	97,6	98,0	0,3
50-60	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	0,0

2.1.2.2 Suprimento pelos resíduos culturais

O suprimento de nutrientes pelos resíduos culturais foi estimado pelo modelo proposto por Wieder e Lang (1982), que descreve a variação do conteúdo de nutrientes ou matéria seca (MS) no material em decomposição em função do tempo decorrido ou ciclo da cultura.

$$FR_X = C_X \cdot e^{(-k_0 t)}$$

$$SUP\ X_{RC} = C_X - FR_X$$

Em que:

FR_X: fração remanescente do nutriente no material em decomposição depois de transcorrido o tempo t (kg ha^{-1});

C_X: conteúdo do nutriente nos resíduos culturais (kg ha^{-1});

k_0: constante de decomposição do nutriente (Tabela 5);

t: ciclo da cultura (dias);

$SUP\ X_{RC}$: suprimento do nutriente X pelos resíduos culturais (kg ha^{-1}).

O conteúdo de nutriente nos resíduos culturais no momento de implantação da cultura (C_X) foi estimado pelo produto entre a quantidade de MS de resíduos vegetais existente na área e o teor dos nutrientes nesses resíduos.

Tabela 5. Constante de decomposição (k_0) de matéria seca (MS) e de macronutrientes das principais culturas antecessoras ao cultivo.

Cultura	k_0						
	MS	N	P	K	Ca	Mg	S
Braquiária	0,006	0,005	0,003	0,050	0,005	0,005	0,015
Crotalaria spectabilis[1]	0,004	0,020	0,015	0,030	0,010	0,015	0,010
Milheto[1]	0,006	0,010	0,020	0,050	0,010	0,015	0,015
Milho e sorgo[2]	0,005	0,010	0,010	0,030	0,010	0,020	0,010
Soja[2]	0,015	0,027	0,027	0,063	0,018	0,027	0,015
Fabaceae	0,010	0,025	0,020	0,045	0,015	0,020	0,010
Poaceae	0,006	0,010	0,010	0,040	0,010	0,010	0,010
Geral	0,008	0,015	0,015	0,040	0,010	0,015	0,015

[1]Constantes obtidas com o manejo realizado durante o florescimento da cultura. [2]Constantes obtidas com os resíduos vegetais após a colheita dos grãos. Adaptado de Padovan et al. (2006), Gama-Rodrigues et al. (2007) e Marcelo et al. (2012b).

Os resíduos de áreas de cultivo de hortaliças tendem a apresentar maior conteúdo de nutrientes devido às altas doses de fertilizantes, geralmente, empregadas. Além disso, práticas típicas adotadas nessas áreas como irrigação e preparo intensivo do solo aceleram a taxa de decomposição dos resíduos (Moreira & Siqueira, 2006).

2.1.2.3 Suprimento pela correção do solo

O suprimento de Ca e Mg via calagem foi estimado pelas seguintes equações (Dezordi et al., 2015):

$$SUP\ Ca_{calagem} = QC\ .\ T_{CaO}\ .\ f$$

$$SUP\ Mg_{calagem} = QC\ .\ T_{MgO}\ .\ f$$

Em que:

$SUP\ Ca_{calagem}$: suprimento de Ca via calagem (kg ha^{-1});

$SUP\ Mg_{calagem}$: suprimento de Mg via calagem (kg ha^{-1});

QC: quantidade de calcário aplicado (Mg ha^{-1});

T_{CaO}: teor de CaO no corretivo (dag kg^{-1});

T_{MgO}: teor de MgO no corretivo (dag kg^{-1});

f: fator de conversão de massa de óxidos (CaO ou MgO, Mg ha^{-1}) para massa elementar (Ca ou Mg, kg ha^{-1}). Para determinar o suprimento de Ca e Mg via calagem deve-se utilizar *f* igual a 7,15 e 6,03, respectivamente.

O suprimento de Ca e S via gessagem foi estimado pelas seguintes equações:

$$SUP\ Ca_{gessagem} = QG \,.\, T_{Ca} \,.\, 10$$

$$SUP\ S_{gessagem} = QG \,.\, T_{S} \,.\, 10$$

Em que:

$SUP\ Ca_{gessagem}$: suprimento de Ca via gessagem (kg ha^{-1});

$SUP\ S_{gessagem}$: suprimento de S via gessagem (kg ha^{-1});

QG: quantidade de gesso aplicado (Mg ha^{-1});

T_{Ca}: teor de Ca no gesso aplicado (%);

T_{S}: teor de S no gesso aplicado (%).

2.2 Recomendação de fertilização

A recomendação de fertilizantes para N, P e K foi gerada segundo a filosofia do balanço nutricional. Dessa forma, a recomendação consistiu da diferença entre o requerimento nutricional da cultura (REQ) e o suprimento de nutrientes (SUP). Contudo, para que não ocorresse empobrecimento do solo ao longo dos cultivos, a recomendação foi gerada de tal modo que a dose aplicada desses macronutrientes não fosse inferior à quantidade exportada pela cultura, exceto para o P, que devido à sua interação com o solo teve sua exportação corrigida pela ER. Assim, o sistema recomenda aplicar o total exportado da área pela cultura, quando o SUP for maior

que o REQ, e a diferença entre o requerido pela planta e o suprido pelo solo, quando o SUP for menor que o REQ.

Para Ca, Mg e S o sistema apresenta somente o subsistema SUP e para os micronutrientes apenas a EXP e a EXT da cultura, sem recomendar a dose a ser aplicada. Com isso, as quantidades de Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn e Zn a serem aplicadas deverão ser estimadas pelos usuários e/ou técnicos responsáveis em função da EXP e da EXT da cultura. Este posicionamento foi adotado por não se conhecer a real ER destes nutrientes pela beterraba e, consequentemente, não ser possível determinar o requerimento dos mesmos pela cultura.

2.3 Aplicação do sistema

Para comparar as recomendações de N, P e K, simulações foram geradas para as produtividades de 50, 65, 80 e 95 Mg ha^{-1} de raízes, as quais foram baseadas na faixa de produtividade obtida no banco de dados do Capítulo 2. As simulações foram realizadas considerando os atributos químicos na camada de 0 a 30 cm de uma área com solo classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo e anteriormente cultivado com milheto (Tabela 6).

Considerou-se que os resíduos culturais do milheto (parte aérea toda) representavam 8 Mg ha^{-1}, com teor de 18,3, 2,7 e 22,9 g kg^{-1} de N, P e K, na MS, respectivamente (Silva et al., 2010). Para efeito de cálculo, considerou-se que a beterraba apresentou 90 dias de ciclo e adotou-se 30 cm como PER da cultura.

Para comparar as recomendações de N, P_2O_5 e K_2O geradas pela modelagem, simulações foram feitas em função da variação dos atributos químicos do solo (teor de matéria orgânica; teor de P – Mehlich-1 e teor de K – Mehlich-1), da quantidade de resíduos culturais e da produtividade almejada de raízes (análise de sensibilidade). Foram comparadas, ainda, as recomendações de N, P_2O_5 e K_2O geradas pela modelagem com as da literatura em função dos atributos químicos citados anteriormente. Supôs-se em todas as simulações que o P foi aplicado a lanço e que não ocorreram perdas dos nutrientes por volatização, imobilização e lixiviação.

Tabela 6. Atributos químicos do solo empregado nas simulações de recomendação de nutrientes na modelagem.

Atributo químico	Unidade	Extrator/Método	Valor
pH	-	H_2O	6,3
Fósforo (P)	mg dm^{-3}	Mehlich-1	4,5
Potássio (K^+)	$mmol_c$ dm^{-3}	Mehlich-1	1,0
Cálcio (Ca^{2+})	$mmol_c$ dm^{-3}	KCl	26
Magnésio (Mg^{2+})	$mmol_c$ dm^{-3}	KCl	7
Enxofre (S)	mg dm^{-3}	Fosfato de Cálcio	8
Boro (B)	mg dm^{-3}	Água Quente	0,13
Cobre (Cu)	mg dm^{-3}	Mehlich-1	1,8
Ferro (Fe)	mg dm^{-3}	Mehlich-1	30
Manganês (Mn)	mg dm^{-3}	Mehlich-1	2,2
Zinco (Zn)	mg dm^{-3}	Mehlich-1	1,6
Alumínio (Al^{3+})	$mmol_c$ dm^{-3}	KCl	0,0
H + Al	$mmol_c$ dm^{-3}	Solução Tampão SMP	23,4
Mat.orgânica (MO)	dag kg^{-1}	-	1,7

P, K, Cu, Fe, Mn, Zn - Mehlich-1; Ca, Mg, Al - KCl 1 mol L^{-1}; S-SO_4 - Fosfato monobásico de Ca 0,01 mol L^{-1}; B - água quente; H + Al - Solução Tampão SMP a pH 7,5; Mat. orgânica - Método colorimétrico. P-rem: 4,9 mg L^{-1}.

3 Resultados e discussão

As simulações feitas pela modelagem evidenciaram que a produtividade almejada influencia a exportação e extração de nutrientes pela cultura (Tabela 7). Houve diferença entre a ordem de exportação e de extração tanto para os macronutrientes quanto para os micronutrientes. Para os macronutrientes, as ordens de exportação e extração foram N>K>P>Ca>Mg>S e K>N>Ca>Mg>P>S, respectivamente. Para os micronutrientes houve mudança de posição entre Mn e Zn, com a ordem de exportação Fe>Zn>Mn>B>Cu e a de extração Fe>Mn>Zn>B>Cu. Esses resultados são consequência da diferença entre o IC dos nutrientes (Tabela 2).

Tabela 7. Extração e exportação de macro e micronutrientes geradas pela modelagem de recomendação em função da produtividade almejada.

Nutriente	Produtividade almejada (Mg ha^{-1})							
	50	65	80	95	50	65	80	95
	Extração				Exportação			
	kg ha^{-1}				kg ha^{-1}			
N	213	288	363	438	128	172	217	262
P	23	33	42	52	14	20	26	32
K	234	329	424	518	111	156	200	245
Ca	56	89	122	154	29	29	29	29
Mg	23	34	45	56	11	17	22	28
S	13	23	33	43	5	8	12	15
	g ha^{-1}				g ha^{-1}			
B	204	260	315	370	71	90	109	129
Cu	35	69	102	135	22	42	62	82
Fe	1035	1502	1968	2435	326	473	620	767
Mn	94	318	542	766	21	73	124	175
Zn	242	370	499	627	156	239	321	404

Nas simulações geradas não se considerou o suprimento de Ca e Mg via calagem e o suprimento de Ca e S via gessagem por ser desnecessária a aplicação desses corretivos, segundo os resultados da análise química utilizada na simulação (Tabela 6). Entretanto, a prática da calagem não deve ser negligenciada, pois a produtividade da beterraba é reduzida significativamente caso não seja adotada (Tucher et al., 2018; Olsson et al., 2019). Para estes macronutrientes e para os micronutrientes (B, Cu, Fe, Mn e Zn), o sistema apresentou somente a EXP (quantidade acumulada nas raízes) e a EXT (quantidade acumulada nas raízes e na parte aérea) da cultura nas simulações realizadas (Tabela 7). Devido ao desconhecimento da eficiência de recuperação da cultura por esses nutrientes não foi possível estimar o requerimento nutricional e, consequentemente, gerar a recomendação de fertilização. Isso demonstra a necessidade da realização de estudos com esses nutrientes para a modelagem completa da recomendação de nutrientes para a cultura da beterraba. Destaca-se que o sistema permite constantes

atualizações a partir de novos estudos que gerem resultados condizentes com a realidade dos cultivos no campo.

As recomendações de N, P_2O_5 e K_2O foram geradas de forma diferente pelo sistema em função da produtividade almejada (Tabela 8). Para as produtividades de 50 e 65 Mg ha^{-1}, em que o suprimento de N e K pelo solo e pelos resíduos culturais é maior que o requerimento da cultura, a recomendação do sistema consistiu na exportação dos nutrientes aplicados. Essa forma de recomendação visa evitar o empobrecimento do solo ao longo dos cultivos. Para as produtividades de 80 e 95 Mg ha^{-1}, as recomendações de N, P_2O_5 e K_2O geradas pelo sistema foram feitas segundo a filosofia do balanço nutricional. Com isso, as recomendações basearam-se na diferença entre o requerimento da cultura e o suprimento pelo solo e pelos resíduos culturais.

Tabela 8. Recomendações de N, P_2O_5 e K_2O geradas pela modelagem da recomendação e pela literatura para diferentes produtividades almejadas.

Nutriente	Produtividade almejada (Mg ha^{-1})				"Boletim 200"[1]	"5ª Aproximação"[2]*
	50	65	80	95	30 a 50 (Mg ha^{-1})	40 (Mg ha^{-1})
	kg ha^{-1}					
N	128[E]	172[E]	227[R]	306[R]	110 a 210	100
P_2O_5	244[R]	461[R]	677[R]	894[R]	90 a 360	300
K_2O	111[E]	156[E]	200[E]	262[R]	80 a 320	240

[1](Aguiar et al., 2014); [2](Ribeiro et al., 1999). *Valores retirados da literatura considerando a análise de solo (Tabela 6) com disponibilidade baixa de P e K. [E]Recomendação em função da exportação, corrigida pela eficiência de recuperação do nutriente apenas para P. [R]Recomendação de acordo com o balanço nutricional (diferença entre requerimento e suprimento).

A fertilização gerada pela modelagem divergiu da recomendada pelas publicações oficiais, especialmente da "5ª Aproximação" (Ribeiro et al., 1999) (Tabela 8). Nesta publicação as doses recomendadas de N, P_2O_5 e K_2O foram inferiores às geradas pela modelagem para a obtenção das maior produtividade (95 Mg ha^{-1}). Ademais, com exceção do N, para a produtividade de 50 Mg ha^{-1} a modelagem gerou doses menores que as recomendadas por esta mesma publicação, a qual tem produtividade almejada de 40 Mg ha^{-1}. Para N e K_2O com produtividades almejadas de até 65 e 95 Mg ha^{-1}, respectivamente, as recomendações geradas pela modelagem situaram-se dentro das respectivas faixas

de doses recomendadas pelo “Boletim 200” (Aguiar et al., 2014), o qual apresenta produtividade almejada de 30 a 50 Mg ha^{-1}. Esses resultados confirmam que o “Boletim 200” (Aguiar et al., 2014) apresenta-se mais atualizado que a “5ª Aproximação” (Ribeiro et al., 1999). Ressalta-se que foi considerada apenas a adubação química nas recomendações da literatura indicadas na Tabela 8, embora as duas publicações oficiais recomendem também a adubação orgânica. Essa prática, no entanto, não é adotada nos cultivos de beterraba em grandes áreas, como é o caso da região do Alto Paranaíba.

Na análise de sensibilidade, semelhante ao verificado na Tabela 8, foram observados dois comportamentos do sistema a depender da condição simulada (Figura 1). Nas regiões dos gráficos representadas pelo suprimento elevado de N, P e K (altos teores de matéria orgânica, P – Mehlich-1 e K – Mehlich-1), a recomendação gerada pela modelagem é constante para cada produtividade. Nesse caso, a diferença entre o requerimento da cultura e o suprimento do solo é menor que a EXP da cultura e, dessa forma, o sistema recomenda fertilizar a quantidade exportada de nutrientes.

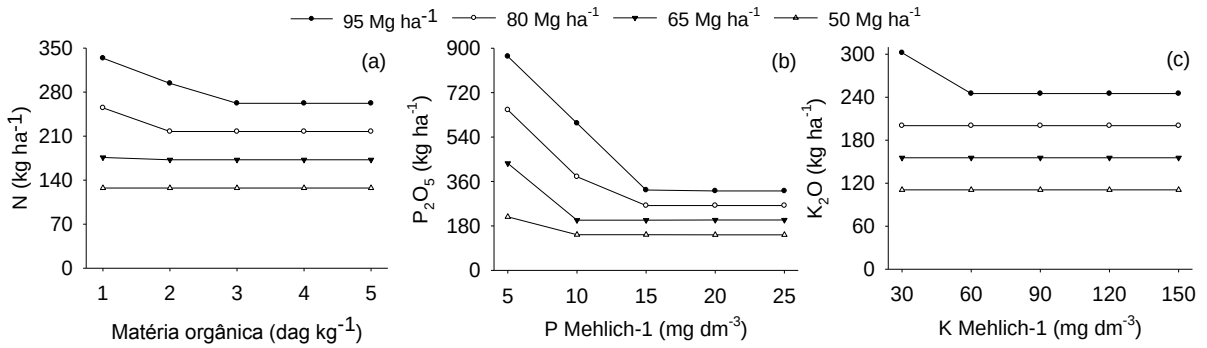

Figura 1. Análise de sensibilidade da modelagem para recomendação de N, P_2O_5 e K_2O em função de atributos da análise química do solo e produtividade almejada.

Em contrapartida, nas regiões dos gráficos representadas por altas produtividades e baixo suprimento de nutrientes pelo solo, a recomendação do sistema baseia-se na diferença entre o requerimento nutricional e o suprimento do solo. Logo, nessas condições as recomendações geradas são superiores à EXP pela cultura, observação constatada nos gráficos através da flexão das linhas de tendência obtidas para cada produtividade (Figura 1).

Tal como na Tabela 8, constata-se na Figura 2 a divergência entre as recomendações geradas pela modelagem e a literatura. Embora a produtividade almejada seja a mesma (50 Mg ha^{-1}), as doses de N, P_2O_5 e K_2O geradas pela modelagem ficaram abaixo das recomendadas pelo “Boletim 200” (Aguiar et al., 2014). Sob condições de baixo suprimento de P e K, a modelagem mesmo com maior produtividade almejada apresentou doses de P_2O_5 e K_2O, respectivamente, abaixo das recomendadas pela “5ª Aproximação” (Ribeiro et al., 1999).

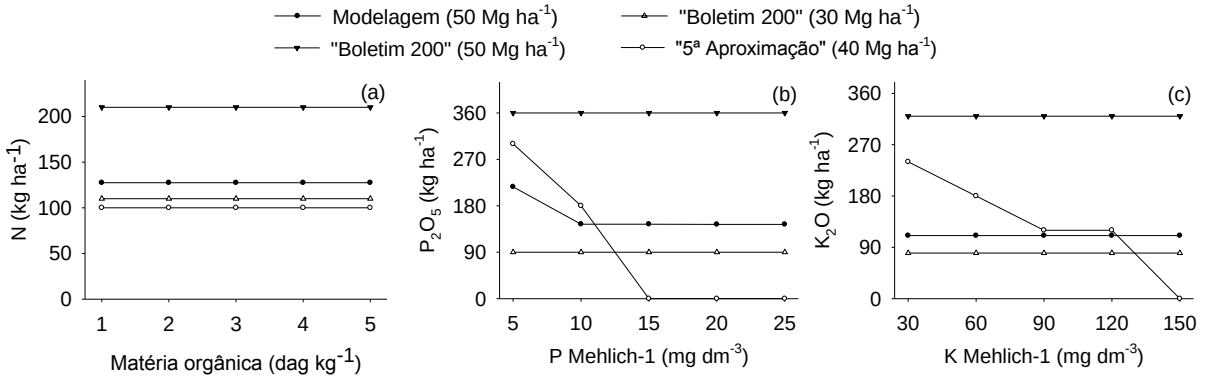

Figura 2. Recomendação de N, P_2O_5 e K_2O geradas pela modelagem para a produtividade almejada de 50 Mg ha^{-1} e pelas publicações oficiais em função de atributos da análise química do solo.

A quantidade de resíduos de milheto presentes na área de cultivo influencia significativamente as recomendações de fertilização, exceto para o P (Figura 3). Abaixo de 5 Mg ha^{-1}, a recomendação de N e K_2O gerada pelo sistema baseia-se na diferença entre o requerimento nutricional e o suprimento do solo, independente da produtividade almejada. Para o P, a recomendação gerada pela modelagem é constante para cada produtividade, independente da quantidade de resíduos culturais de milheto presentes. Com isso, o sistema recomenda fertilizar a quantidade exportada do nutriente.

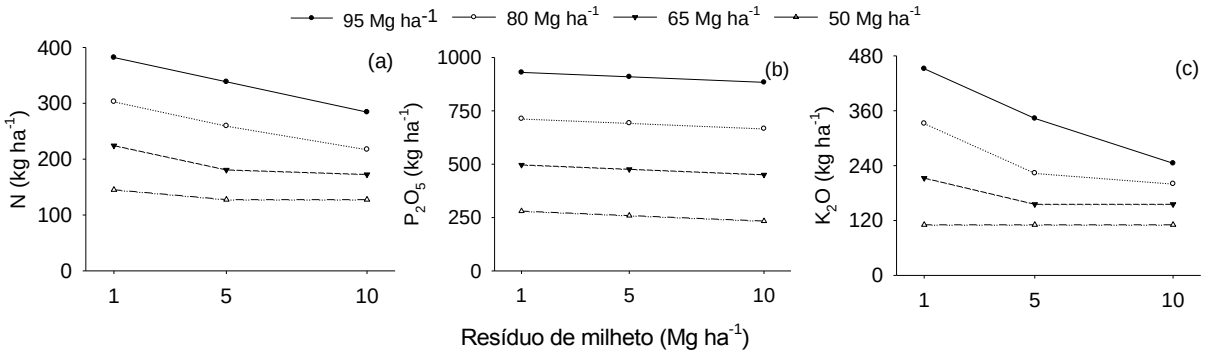

Figura 3. Análise de sensibilidade da modelagem para recomendação de N, P_2O_5 e K_2O em função da quantidade de resíduos de milheto presentes na área de cultivo e produtividade almejada.

4 Conclusões

A modelagem permite a recomendação de adubação para a cultura, com a vantagem das doses variarem com a produtividade almejada e o teor de nutrientes disponíveis no solo e nos restos vegetais de cultivos anteriores.

O sistema tem grandes perspectivas para a melhoria da fertilização da cultura da beterraba.

5 Referências

ABCSEM (Associação Brasileira do Comércio de Sementes e Mudas). 2º levantamento de dados socioeconômicos da cadeia produtiva de hortaliças no Brasil; 2014 [cited 2018 Sep 11]. Disponível em: http://www.abcsem.com.br/imagens_noticias/Apresenta%C3%A7%C3%A3o%20completa%20dos%20dados%20da%20cadeia%20produtiva%20de%20hortali%C3%A7as%20-%2029MAIO2014.pdf.

Aguiar ATE, Gonçalves C, Paterniani MEAGZ, Tucci MLS, Castro CEF (2014) **Boletim 200 - Instruções agrícolas para as principais culturas econômicas.** Campinas: IAC, 453 p.

Aquino LA, Puiatti M, Pereira PRG, Pereira FHF, Ladeira IR, Castro MRS (2006) Produtividade, qualidade e estado nutricional da beterraba de mesa em função de doses de nitrogênio. **Horticultura Brasileira** 24:199-203.

Böhm W. **Methods of studying root systems** (1979) Berlin: Springer-Verlag, 188 p.

Carvalho FT, Novais RF, Alvarez V VH, Barros NF, Cantarutti RB, Bahia Filho AFC (2006) Sistema de interpretação de análise de solo para recomendação de NPK para a cultura do milho. **Revista Ceres** 53:211-223.

CEAGESP. Beterraba; 2017 [cited 2018 Sep 11]. Disponível em: http://www.ceagesp.gov.br/produtos/beterraba/.

Costa WAJM, Sangakkara UR (2006) Agronomic regeneration of soil fertility in tropical Asian smallholder uplands for sustainable food production. **The Journal of Agricultural Science** 144:111-133.

Deus JAL, Soares I, Neves JCL, Medeiros JF, Miranda FR (2015) Fertilizer recommendation system for melon based on nutritional balance. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 39:498-511.

Dezordi LR, Aquino LA, Novais RF, Aquino PM, Santos LPD (2015) Nutrient recommendation model for carrot crop – Ferticalc Carrot. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 39:1714-1722.

Duarte LO, Aquino LA, Caixeta IAB, Gonçalves FAR, Reis MR (2019) Rates and methods of phosphorus application in cabbage crop. **Pesquisa Agropecuária Tropical** 49:1-10.

Fageria NF (1998) Otimização da eficiência nutricional na produção das culturas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** 2:6-16.

Faria AF, Álvarez V VH, Mattiello EM, Neves JL, Barros NF, Paiva HN (2012) Capacidade de suprimento de potássio em solos de Minas Gerais-Brasil. **Spanish Journal of Soil Science** 2:26-37.

Fernandes AM, Soratto RP (2012) **Nutrição mineral, calagem e adubação da batateira.** Itapetininga: Editora FEPAF, 121p.

Gama-Rodrigues AC, Gama-Rodrigues EF, Brito EC (2007) Decomposição e liberação de nutrientes de resíduos de plantas de cobertura em Argissolo Vermelho-Amarelo na região Noroeste Fluminense (RJ). **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 31:1421-1428.

Gonçalves FAR (2018) **Modos de aplicação de fósforo na cultura da cenoura e adsorção iônica em biochar de batata.** 50 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – UFV, Rio Paranaíba.

Klar AE (1991) **Irrigação: freqüência e quantidade de aplicação.** São Paulo: Nobel, 156 p.

Machado VJ, Souza CHE, Andrade BB, Lana RMQ, Korndorfer GH (2011) Curvas de disponibilidade de fósforo em solos com diferentes texturas após aplicação de doses crescentes de fosfato monoamônico. **Bioscience Journal** 27:70-76.

Malavolta E, Vitti GC, Oliveira AS (1997) **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações.** Piracicaba: POTAFOS, 319 p.

Marcelo AV, Corá JE, Fernandes C (2012a) Sequências de culturas em sistema de semeadura direta. I – Produção de matéria seca e acúmulo de nutrientes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 36:1553-67.

Marcelo AV, Corá JE, Fernandes C (2012b) Sequências de culturas em sistema de semeadura direta. II – Decomposição e liberação de nutrientes na entressafra. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 36:1568-1582.

Mello MS (2001) **Sistema de interpretação de análise de solo e de recomendação de calagem e fertilizantes para a cultura de tomate.** 91 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Solos e Nutrição de Plantas) - UFV, Viçosa.

Morais ERC (1999) **Formas de potássio em solos do Estado de Minas Gerais e sua disponibilidade para plantas de milho.** 85 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Solos e Nutrição de Plantas) - UFV, Viçosa.

Moreira FMS, Siqueira JO (2006) Matéria orgânica do solo. In: _____. **Microbiologia e bioquímica do solo.** Lavras: Editora UFLA, p. 203-262.

Oliveira RJP, Gatiboni LC, Brunetto G, Miquelluti DJ, Valicheski RR. Resposta da beterraba a adubação com nitrogênio, enxofre e micronutrientes em um Cambissolo Háplico (2017) **Horticultura Brasileira** 35:63-68.

Oliveira RJP, Gatiboni LC, Valicheski RR, Miquelluti DJ, Brunetto G (2016) Calibração da adubação fosfatada e potássica para beterraba na região do Vale do Itajaí. **Horticultura Brasileira** 34:210-215.

Oliveira TF, Aquino LA, Soares MEP, Gentil TG, Fernandes FL, Clemente JM, Reis MR (2019) Modeling the Recommendation of Nutrients for Cabbage (*Brassica oleracea*) Crop. **Journal of Agricultural Science** 11:220-230.

Olsson Å, Persson L, Olsson S (2019) Influence of soil characteristics on yield response to lime in sugar beet. **Geoderma** 337:1208-1217.

Padovan MP, Almeida DL, Guerra JGM, Ribeiro RLD, Oliveira FL, Santos LA, Alves BJR, Souto SM (2006) Decomposição e liberação de nutrientes de soja cortada em diferentes estádios de desenvolvimento. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 41:667-672.

Passos DRC (2019) **Resposta da beterraba a doses de fósforo e de potássio em latossolo com altos teores desses nutrientes.** 51 f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Unesp, Jaboticabal.

Ribeiro AC, Guimarães PTG, Alvarez V VH (1999) **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), 359 p.

Rosolem CA, Vicentini JPTMM, Steiner F (2012). Suprimento de potássio em função da adubação potássica residual em um Latossolo Vermelho do Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 36:1507-1515.

Santos FC, Neves JCL, Novais RF, Alvarez V VH, Sediyama C (2008) Modelagem da recomendação de corretivos e fertilizantes para a cultura da soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 32:1661-1674.

Silva AG, Crusciol CAC, Soratto RP, Costa CHM, Ferrari Neto J (2010) Produção de fitomassa e acúmulo de nutrientes por plantas de cobertura e cultivo da mamona em sucessão no sistema plantio direto. **Ciência Rural** 40:1-7.

Silva AP, Alvarez VVH, Souza AP, Neves JCL, Novais RF, Dantas JP (2009) Sistema de recomendação de fertilizantes e corretivos para a cultura do abacaxi – Fertcalc-Abacaxi. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 33:1269-1280.

Silva IR, Furtini Neto AE, Fernandes LA, Curi N, Vale FB (2000) Formas, relação quantidade/intensidade e biodisponibilidade de potássio em diferentes Latossolos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 35:2065-2073.

Souza RB (2000) **Níveis críticos de enxofre em solos e em folhas de cultivares de café.** 88 p. Tese (Doutorado em Agronomia – Solos e Nutrição de Plantas) - UFV, Viçosa.

Stanford GS, Smith SJ (1972) Nitrogen mineralization potentials of soils. **Soil Science Society of America Journal** 36:465-472.

Tomé Junior JB (2004) **Uma nova abordagem nas recomendações de adubação.** 133 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – UFV, Viçosa.

Tucher SV, Hörndl D, Schmidhalter U (2018) Interaction of soil pH and phosphorus efficacy: Long-term effects of P fertilizer and lime applications on wheat, barley, and sugar beet. **Ambio** 47:41-49.

Wieder RK, Lang GE (1982) A critique of the analytical methods used in examining decomposition data obtained from litter bags. **Ecology** 63:1636-1642

Zaccheo PVC, Neves CSVJ, Stenzel NMC, Okumura RS (2012) Distribuição do sistema radicular de porta-enxertos sob laranjeira ‘Folha Murcha’ em clima subtropical. **Semina: Ciências Agrárias** 33:921-930.

CAPÍTULO 4 - Índices de diagnose nutricional para a cultura da beterraba de mesa

Resumo - A diagnose nutricional por meio da análise foliar é ferramenta que pode otimizar o manejo das adubações. Entretanto, em beterraba de mesa são escassas as informações que permitam a adequada avaliação do estado nutricional, como teores que abranjam as elevadas produtividades obtidas atualmente e definição de folha e época de amostragem. Dessa forma, objetivou-se determinar índices diagnósticos e valores de referência pelos métodos da faixa de suficiência (FS), Sistema Integrado de Diagnose e Recomendação (DRIS) e Diagnose da Composição Nutricional (CND) para duas fases fenológicas da cultura da beterraba (início do intumescimento da raiz tuberosa e colheita), assim como elencar os nutrientes quanto à ordem de limitação nutricional e verificar se existe concordância entre as diagnoses geradas nas duas fases fenológicas. Para a determinação dos índices diagnósticos e valores de referência, obteve-se um banco de dados com os teores foliares dos nutrientes N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn e Zn e a produtividade de raízes em cultivos comerciais de beterraba na região do Alto Paranaíba-MG. A ordem de limitação nutricional foi gerada em função da faixa ótima dos teores foliares e do potencial de resposta à adubação. Os valores de referência (faixas ótimas) gerados pelos métodos da FS, DRIS e CND, no geral, foram concordantes para o diagnóstico da limitação nutricional. Os teores de nutrientes na folha referência gerados para a cultura na região do Alto Paranaíba-MG diferem dos existentes na literatura. Os nutrientes mais limitantes para o cultivo da beterraba nessa região foram o K e S. A limitação de K, Ca, Mg, S, Cu e Zn pode ser diagnosticada precocemente na fase de início de intumescimento da raiz.

Palavras-chave: *Beta vulgaris* L. var. *vulgaris*, CND, diagnose precoce, DRIS, limitação nutricional

1 Introdução

Uma das principais ferramentas para otimizar o manejo das adubações é a diagnose do estado nutricional, a qual permite obter informações acerca do equilíbrio dos nutrientes no tecido vegetal e, consequentemente, racionalizar a aplicação de fertilizantes e corretivos (Rozane et al., 2016). O principal órgão utilizado para avaliação do estado nutricional das plantas é a folha, o que se deve à relação entre teores foliares, absorção de nutrientes e produtividade (Fageria et al., 2009).

Para a análise foliar é preciso padronizar a fase fenológica de coleta, sendo comumente indicada a época em que a planta estabilizou seu crescimento e acúmulo de matéria seca, a fim de minimizar os efeitos de diluição ou concentração de nutrientes na folha, os quais prejudicam a diagnose (Malavolta et al., 1997). Ademais, a padronização da época de coleta possibilita a comparação de resultados independente da condição de cultivo. Entretanto, geralmente, quando o crescimento vegetativo alcançou valores máximos ou próximos ao máximo, já se passou parte considerável do ciclo da cultura e a diagnose pode não ser efetiva para corrigir distúrbios nutricionais na safra corrente (Gonçalves et al., 2017). Dessa forma, o que se tem buscado é avaliar o estado nutricional em diferentes estádios fenológicos a fim de possibilitar um diagnóstico mais precoce (Carvalho et al., 2011; Tomio et al., 2015; Gonçalves et al., 2017; Silva et al., 2017).

Outro aspecto importante da diagnose foliar associada à época de coleta é a definição da folha a ser amostrada. A cultura da beterraba apresenta ciclo curto e variável (60 a 110 dias a depender do genótipo, época e região de cultivo), constante emissão de folhas durante a fase vegetativa e ausência de alterações fenotípicas durante o ciclo comercial (o qual não engloba a fase reprodutiva). Trani e Raij (1997) recomendam a amostragem da folha recém-desenvolvida, sem indicação de época. Tivelli et al. (2011) sugerem a coleta do limbo das folhas recém-maduras centrais no período entre 40 e 60 dias após a semeadura, o que pode não permitir correções na safra corrente, dado o ciclo curto da cultura. Além disso, como o período entre folhas emitidas é curto, a definição da folha fisiologicamente madura (indicada para coleta) é difícil. Assim, para contornar essas dificuldades, pode-se estabelecer como época de amostragem de folhas o período de colheita da cultura e

coleta-se toda a parte aérea das plantas ao invés de determinada folha (Dezordi et al., 2016).

A interpretação dos resultados da análise foliar é outro problema na cultura da beterraba. Isso porque os teores adequados encontrados na literatura para as condições brasileiras não abrangem as maiores produtividades obtidas atualmente. Os resultados da análise do tecido vegetal podem ser interpretados por métodos como a faixa de suficiência (FS) (univariado), Sistema Integrado de Diagnóstico e Recomendação (DRIS) (bivariado) e Diagnóstico da Composição Nutricional (CND) (multivariado). A FS tem como vantagem a facilidade de interpretação do estado nutricional da cultura, sendo o principal método utilizado para tal fim (Wadt et al., 2013). O método DRIS apresenta-se vantajoso por minimizar os efeitos de diluição ou concentração (Beaufils, 1973; Jones, 1981) e possibilitar identificar desequilíbrios nutricionais mesmo quando todos os nutrientes encontram-se acima do nível crítico (Baldock e Schulte, 1996). Além de compartilhar das mesmas vantagens do DRIS (Tomio et al., 2015), o CND permite um diagnóstico mais exato por considerar interações múltiplas entre os nutrientes (Parent e Dafir, 1992).

Objetivou-se determinar índices diagnósticos e valores de referência pelos métodos da FS, DRIS e CND para duas fases fenológicas da cultura da beterraba (início do intumescimento da raiz tuberosa e colheita), elencar os nutrientes quanto à ordem de limitação nutricional e verificar se existe concordância entre as diagnoses geradas nessas fases fenológicas.

2 Material e métodos

Para determinação das normas DRIS e CND, obteve-se um banco de dados com os teores foliares dos nutrientes N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn e Zn e a produtividade de raízes em cultivos comerciais de beterraba, na região do Alto Paranaíba-MG. As amostragens foram realizadas durante o ano de 2017 e abrangeram cultivos localizados nos municípios de Campos Altos, Ibiá, Rio Paranaíba e São Gotardo. Nesses municípios, os cultivos de beterraba encontravam-se à altitude de 980 a 1200 m, com clima predominante Cwa, segundo a classificação de Köppen-Geiger. Este clima é caracterizado por uma estação seca

e um período chuvoso bem definido entre outubro e março. Os tipos de solo predominantes foram os Latossolos Vermelho e Vermelho-Amarelo de textura muito argilosa.

Foram amostradas 45 lavouras de beterraba, das quais 29 cultivadas com o híbrido Boro e 16 com o híbrido Betty. Nessas, determinaram-se a produtividade de raízes e os teores foliares dos nutrientes. A coleta de folhas para diagnose foliar consistiu de toda a parte aérea das plantas no início do intumescimento da raiz e no momento de colheita da cultura. As amostras foliares foram secas em estufa com circulação forçada de ar a 70ºC por 72 h. Em seguida, foram trituradas em moinho tipo Willey com peneira de 1,27 mm. Os teores de nutrientes foram determinados segundo métodos descritos em Malavolta et al. (1997).

Os dados relativos aos teores foliares e produtividades foram analisados criticamente (análise de *outliers*) e processados para geração dos valores de referência para diagnose foliar do estado nutricional da cultura da beterraba pelos métodos da FS, DRIS e CND. Posteriormente, para estabelecimento dos padrões ou normas dos métodos, a população foi dividida em duas classes com base na produtividade. O limiar dessas classes foi definido como a produtividade média dos talhões mais 2/3 do desvio padrão desta variável (Dezordi et al., 2016). A subpopulação com maior produtividade foi considerada nutricionalmente equilibrada ou de referência para estabelecimento dos padrões ou normas para interpretação dos métodos.

Para a determinação da FS foram obtidos a média ($\bar{x}$) e o desvio padrão (s_x) dos teores foliares de cada nutriente na subpopulação de alta produtividade. Os limites da FS foram definidos pelo teor médio mais ou menos o desvio padrão desta variável ($FS = \bar{x} + s_{\bar{x}}$) e cada nutriente foi avaliado independentemente dos demais.

Para os cálculos do método DRIS, primeiramente, estabeleceram-se os quocientes entre o teor de cada nutriente e os teores dos demais. A média e o desvio padrão dos quocientes da subpopulação de alta produtividade compuseram as normas DRIS. Posteriormente, as relações duais de todos os talhões foram log-transformadas (Beverly, 1987). A média aritmética das relações duais log-transformadas foi definida como índice DRIS (IA) desse nutriente.

$$f\left(\frac{A}{N}\right) = \left(\frac{A}{N} - \frac{a}{n}\right) s$$

$$I_A = \frac{f\left(\frac{A}{B}\right) + f\left(\frac{A}{C}\right) + \ldots + f\left(\frac{A}{N}\right) + f\left(\frac{B}{A}\right) + f\left(\frac{C}{A}\right) + \ldots + f\left(\frac{N}{A}\right)}{2(n-1)}$$

Em que:

f (A/N) = função da relação dual entre os teores de nutrientes da amostra;

A/N = relação dual entre os teores de nutrientes da amostra;

a/n = relação dual entre os teores de nutriente na subpopulação de alta produtividade;

s = desvio padrão da relação dual entre os teores de nutrientes na subpopulação de alta produtividade;

n = número de nutrientes envolvidos.

No método CND, ajustou-se os teores dos nutrientes de cada talhão para a mesma unidade (g kg^{-1}). Em seguida, foram calculados os teores dos componentes da matéria seca, exceto os macro e micronutrientes (R). Após a obtenção destes resultados, calculou-se a média geométrica entre os teores dos constituintes da matéria seca (G), para posterior correção do teor de cada nutriente, o que resultou na variável multinutriente (Vi).

$$R = 100 - \Sigma x_i$$

$$G = [(\Pi x_i).R]^{1/(n+1)}$$

$$V_i = \ln (x_i / G)$$

Em que:

x_i = teores dos nutrientes nas folhas;

n = número de nutrientes em avaliação.

A média e o desvio padrão das variáveis multinutrientes da subpopulação de alta produtividade compuseram as normas CND. Por meio dessas foram calculados, para cada nutriente e em cada talhão, o índice da variável multinutriente (I_{Vi}) por meio das normas CND.

$$I_{Vi} = \left(\frac{Vi\text{-}vi}{si}\right)$$

Em que:

I_{Vi} = Índice da variável multinutriente;

Vi = variável multinutriente da amostra;

vi = média das variáveis multinutriente da subpopulação de alta produtividade;

si = desvio padrão das variáveis multinutriente da subpopulação de alta produtividade.

Em ambos os métodos, o somatório do módulo dos índices DRIS ou índices das variáveis multinutrientes de todos os nutrientes resultou no Índice de Balanço Nutricional (IBN). O quociente entre o IBN e o número de nutrientes envolvidos (n) resultou no Índice de Balanço Nutricional Médio (IBNm).

Após a definição dos índices DRIS e CND, os teores foliares ótimos foram determinados por regressões entre o índice do nutriente (variável independente) e o seu respectivo teor foliar (variável dependente) para as áreas que compuseram a população de referência. Posteriormente, obteve-se o teor do nutriente na folha que proporciona um índice nulo ou equilibrado. A faixa ótima de cada nutriente consistiu no teor foliar ótimo da população referência ± 2/3 do desvio-padrão (Dezordi et al., 2016). Estes teores e faixas ótimas geradas pelo DRIS e CND foram comparados com teores e faixas de suficiência citados por Trani e Raij (1997) e Barlóg (2014).

As lavouras foram classificadas quanto ao estado nutricional em três classes para cada nutriente: limitante por deficiência (LD), limitante por excesso (LE) e não limitante (NL), através de dois critérios distintos: em função da faixa ótima dos teores foliares e do potencial de resposta à adubação (PRA). Com relação ao primeiro critério, classificaram-se como LD ou LE as lavouras que apresentavam teores foliares abaixo ou acima dos limites da faixa, respectivamente. Quando o teor

encontrava-se no intervalo da faixa, o nutriente foi considerado como NL para a lavoura. Para a classificação quanto ao PRA, as lavouras foram classificadas em resposta positiva, positiva ou nula, nula, negativa ou nula e negativa (Wadt et al., 1998). Posteriormente, as lavouras com resposta positiva e positiva ou nula foram classificadas como LD para o respectivo nutriente. As lavouras com resposta nula foram classificadas como NL e, para as demais classes de resposta à adubação (negativa e negativa ou nula), as lavouras foram agrupadas na classe LE (Urano et al., 2006).

Com base nas classificações anteriormente descritas (LD, NL e LE), gerou-se a ordem de limitação nutricional em ambos os critérios de classificação (faixa ótima e PRA) para o DRIS e CND. Para isso, os nutrientes foram ordenados de forma decrescente quanto à frequência de lavouras com limitação nutricional por deficiência.

Os valores de referência foram determinados com o auxílio do software Microsoft Excel®. Os parâmetros das equações ajustadas foram analisados com a finalidade de testar sua significância pelo teste *t* com o uso do software Action Stat.

3 Resultados e discussão

A produtividade que dividiu a população nas classes de baixa e alta produtividade pelos métodos da FS, DRIS e CND foi de 79,2 Mg ha^{-1}. Das 45 áreas amostradas, 13 (28,9%) apresentaram produtividade superior a este limiar, as quais formaram a população de referência (Partelli et al., 2014; Xu et al., 2015). A produtividade de raízes da população de referência variou de 79,3 a 98,6 Mg ha^{-1}, com média de 86,3 Mg ha^{-1}. Quanto aos modelos matemáticos para relacionar os índices (DRIS e CND) com os teores foliares (Tabelas 1 e 2), observa-se que para os micronutrientes, na fase de início do intumescimento da raiz tuberosa, os melhores ajustes foram obtidos com equações lineares de segundo grau (exceto para o Zn); enquanto para os demais nutrientes, as equações lineares de primeiro grau se adequaram melhor. Na colheita, os modelos lineares melhor se ajustaram, com exceção de Cu e Zn. Não houve ajuste de modelo em nenhuma das épocas de amostragem para o Mg.

Tabela 1. Modelo matemático, amplitude dos índices e coeficiente de determinação (R^2) das regressões ajustadas para descrever os teores foliares da parte aérea de beterraba em função do índice DRIS para a população de referência[1] na fase de início do intumescimento da raiz tuberosa e no momento da colheita.

Modelo matemático	Amplitude			R^2
Início do intumescimento da raiz tuberosa				
$N = 36,682 + 3,0703^{**}I_N$	-1,29	$< I_N <$	0,68	0,489
$P = 3,7258 + 0,6387^{**}I_P$	-0,88	$< I_P <$	0,74	0,626
$K = 51,670 + 12,256^{***}IK + 6,9255^{**}I_K^2$	-1,23	$< I_K <$	1,08	0,856
$Ca = 13,655 + 3,0378^{***}I_{Ca}$	-1,56	$< I_{Ca} <$	1,16	0,752
$Mg = 4,3705 – 0,0138^{ns}I_{Mg}$	-0,58	$< I_{Mg} <$	0,62	0,003
$S = 3,7270 + 1,1579^{***}I_S$	-0,79	$< I_S <$	0,52	0,779
$B = 38,799 + 13,626^{***}I_B + 8,2682^{***}I_B^2$	-0,88	$< I_B <$	1,69	0,969
$Cu = 9,7330 + 9,0725^{***}I_{Cu} + 8,2863^{***}I_{Cu}^2$	-0,86	$< I_{Cu} <$	1,98	0,975
$Fe = 310,57 + 208,81^{***}I_{Fe} + 66,497^{***}I_{Fe}^2$	-1,49	$< I_{Fe} <$	1,90	0,976
$Mn = 19,620 + 21,408^{***}I_{Mn} + 12,719^{***}I_{Mn}^2$	-1,22	$< I_{Mn} <$	1,85	0,978
$Zn = 50,001 + 15,301^{***}I_{Zn}$	-1,14	$< I_{Zn} <$	1,26	0,841
Colheita				
$N = 25,618 + 5,9138^{***}I_N$	-1,83	$< I_N <$	0,59	0,742
$P = 2,5968 + 0,5983^{***}I_P$	-0,89	$< I_P <$	0,90	0,691
$K = 47,666 + 10,072^{***}I_K$	-1,46	$< I_K <$	0,95	0,710
$Ca = 15,286 + 3,455^{***}I_{Ca}$	-1,15	$< I_{Ca} <$	0,77	0,643
$Mg = 4,1604 + 0,1077^{ns}I_{Mg}$	-0,47	$< I_{Mg} <$	0,46	0,148
$S = 4,4060 + 1,7610^{***}I_S$	-0,96	$< I_S <$	0,79	0,820
$B = 38,004 + 4,3430^{***}I_B$	-0,88	$< I_B <$	0,84	0,738
$Cu = 10,999 + 41,478^{***}I_{Cu} + 31,461^{***}I_{Cu}^2$	-1,43	$< I_{Cu} <$	1,53	0,965
$Fe = 323,73 + 137,50^{***}I_{Fe}$	-1,28	$< I_{Fe} <$	1,10	0,842
$Mn = 63,070 + 38,178^{***}I_{Mn}$	-1,34	$< I_{Mn} <$	1,22	0,893
$Zn = 34,825 + 34,451^{***}I_{Zn} + 15,770^{***}I_{Zn}^2$	-1,04	$< I_{Zn} <$	1,77	0,996

[1]Produtividade superior a 79,2 Mg ha^{-1}; ** e *** significativos pelo teste t a 1 e 0,01%, respectivamente; [ns]Não significativo pelo teste t.

Tabela 2. Modelo matemático, amplitude dos índices e coeficiente de determinação (R^2) das regressões ajustadas para descrever os teores foliares da parte aérea de beterraba em função do índice CND para a população de referência[1] na fase de início do intumescimento da raiz tuberosa e no momento da colheita.

Modelo matemático	Amplitude			R^2
Início do intumescimento da raiz tuberosa				
$N = 36,682 + 1,1921^{ns}I_N$	-1,97	$< I_N <$	1,29	0,250
$P = 3,7258 + 0,2350^{*}I_P$	-2,35	$< I_P <$	1,34	0,335
$K = 50,913 + 10,010^{***}I_K + 4,0306^{**}I_K^2$	-2,16	$< I_K <$	1,36	0,833
$Ca = 13,655 + 1,8325^{**}I_{Ca}$	-2,10	$< I_{Ca} <$	1,51	0,610
$Mg = 4,3705 – 0,0102^{ns}I_{Mg}$	-2,42	$< I_{Mg} <$	1,37	0,012
$S = 3,7270 + 0,1957^{ns}I_S$	-1,72	$< I_S <$	2,34	0,149
$B = 38,364 + 10,707^{***}I_B + 5,4909^{***}I_B^2$	-1,31	$< I_B <$	2,15	0,965
$Cu = 9,5640 + 7,8626^{***}I_{Cu} + 6,7121^{***}I_{Cu}^2$	-0,94	$< I_{Cu} <$	2,24	0,987
$Fe = 306,95 + 197,06^{***}I_{Fe} + 63,840^{***}I_{Fe}^2$	-1,49	$< I_{Fe} <$	1,90	0,966
$Mn = 19,693 + 19,584^{***}I_{Mn} + 10,683^{***}I_{Mn}^2$	-1,33	$< I_{Mn} <$	2,03	0,979
$Zn = 50,001 + 9,2317^{***}I_{Zn}$	-1,14	$< I_{Zn} <$	1,26	0,665
Colheita				
$N = 25,618 + 3,4382^{**}I_N$	-2,67	$< I_N <$	0,91	0,512
$P = 2,5968 + 0,2585^{*}I_P$	-1,73	$< I_P <$	1,80	0,384
$K = 47,666 + 4,5887^{*}I_K$	-2,27	$< I_K <$	1,48	0,426
$Ca = 15,286 + 1,7672^{**}I_{Ca}$	-2,24	$< I_{Ca} <$	1,15	0,473
$Mg = 4,1604 + 0,0254^{ns}I_{Mg}$	-1,63	$< I_{Mg} <$	1,46	0,061
$S = 4,4060 + 0,8786^{***}I_S$	-1,56	$< I_S <$	1,60	0,667
$B = 38,004 + 2,3962^{**}I_B$	-1,30	$< I_B <$	1,47	0,616
$Cu = 10,194 + 40,844^{***}I_{Cu} + 30,921^{***}I_{Cu}^2$	-1,46	$< I_{Cu} <$	1,55	0,964
$Fe = 323,73 + 95,463^{***}I_{Fe}$	-1,56	$< I_{Fe} <$	1,57	0,805
$Mn = 63,070 + 32,711^{***}I_{Mn}$	-1,53	$< I_{Mn} <$	1,48	0,906
$Zn = 34,643 + 31,453^{***}I_{Zn} + 13,652^{***}I_{Zn}^2$	-1,13	$< I_{Zn} <$	1,91	0,988

[1]Produtividade superior a 79,2 Mg ha^{-1}; *, ** e *** significativos pelo teste t a 5, 1 e 0,01%, respectivamente; [ns]Não significativo pelo teste t.

A FS apresentou faixas ótimas mais largas que os métodos DRIS e CND em ambas as fases para todos os nutrientes (Tabelas 3 e 4). Embora as faixas do DRIS e CND tenham se incluído no intervalo ótimo estabelecido pela FS, o CND, por sua vez, evidenciou faixas ótimas mais estreitas que o DRIS para a maioria dos nutrientes. Esse resultado corrobora com Cunha et al. (2016) e Dezordi et al. (2016) para as culturas do alho e cenoura, respectivamente. Os menores intervalos das faixas ótimas geradas pelo CND têm como possível vantagem o diagnóstico mais preciso do estado nutricional da cultura (Gott et al., 2014). Contudo, as faixas muito estreitas geradas para alguns nutrientes podem levar à diagnose equivocada em virtude de possíveis erros nas análises laboratoriais para determinação dos teores foliares (Dezordi et al., 2016).

Tabela 3. Faixa ótima para a concentração dos nutrientes na parte área da cultura da beterraba na fase de início do intumescimento da raiz tuberosa gerada pelos métodos da faixa de suficiência (FS), DRIS e CND em comparação com a literatura existente.

Nutriente	FS	DRIS	CND	Literatura*
	----------g kg^{-1}----------			
N	34,3 – 39,1	35,6 – 37,8	35,9 – 37,5	30 – 50
P	3,3 – 4,1	3,5 – 3,9	3,6 – 3,9	2 – 4
K	45,8 – 63,4	47,6 – 58,6	46,1 – 59,3	20 – 40
Ca	11,3 – 16,0	12,3 – 15,0	12,4 – 14,9	25 – 35
Mg	4,3 – 4,5	4,4 – 4,4	4,4 – 4,4	3 – 8
S	3,2 – 4,2	3,4 – 4,0	3,6 – 3,9	2 – 4
	----------mg kg^{-1}----------			
B	26,3 – 60,6	34,0 – 48,0	33,7 – 47,8	40 – 80
Cu	0,6 – 30,9	7,3 – 17,9	7,3 – 17,7	5 - 15
Fe	123,9 – 607,8	205,9 – 467,3	204,7 – 464,8	70 – 200
Mn	0,5 – 58,6	11,3 – 37,3	11,4 – 37,3	70 – 200
Zn	38,7 – 61,3	43,1 – 56,9	43,9 – 56,1	20 – 100

*Trani & Raij (1997).

Tabela 4. Faixa ótima para a concentração dos nutrientes na parte área da cultura da beterraba no momento da colheita gerada pelos métodos da faixa de suficiência (FS), DRIS e CND em comparação com a literatura existente.

Nutriente	FS	DRIS	CND	Literatura*
	---------- g kg^{-1} ----------			
N	20,8 – 30,4	22,9 – 28,4	23,3 – 27,9	34,1 – 40,7
P	2,2 – 3,0	2,4 – 2,8	2,4 – 2,8	2,7 – 4,9
K	40,6 – 54,7	43,8 – 51,6	44,6 – 50,7	33,4 – 48,0
Ca	12,7 – 17,9	13,9 – 16,6	14,1 – 16,5	3,7 – 8,7
Mg	4,1 – 4,3	4,1 – 4,2	4,1 – 4,2	2,5 – 5,3
S	3,3 – 5,5	3,8 – 5,0	3,8 – 5,0	-
	---------- mg kg^{-1} ----------			
B	35,0 – 41,1	36,3 – 39,7	36,4 – 39,6	-
Cu	<78,9	<50,8	<50,6	-
Fe	217,3 – 430,1	259,4 – 388,1	260,7 – 386,7	-
Mn	28,7 – 97,4	41,6 – 84,5	41,5 – 84,7	-
Zn	3,2 – 91,3	19,7 – 61,7	19,8 – 61,3	-

*Barłóg (2014).

Mesmo com a variação na extensão das faixas ótimas geradas pelos métodos (FS, DRIS e CND), observa-se certa concordância entre as mesmas. Essa concordância também foi constatada por René et al. (2013) e Dezordi et al. (2016), os quais utilizaram os métodos univariado (nível crítico), bivariado (DRIS) e multivariado (CND). Destaca-se que a produtividade média brasileira de beterraba é de 25,4 a 44,7 Mg ha^{-1} (Corrêa et al., 2014; Magro et al., 2015; Silva et al., 2016). No presente trabalho a população de referência para estabelecimento dos padrões para diagnose foliar pela FS, DRIS e CND abrangeu áreas com produtividades entre 79,3 e 98,6 Mg ha^{-1}, as quais estão bem acima da média brasileira. A obtenção de elevadas produtividades presume o equilíbrio nutricional da cultura, de forma que os talhões que compuseram a população de referência estejam nessa condição de equilíbrio, fato constatado na cultura da cenoura por Dezordi et al (2016). Ainda segundo esses autores, nessa condição os efeitos de concentração, diluição e relação entre nutrientes podem ser menos expressivos, o que torna desnecessária a

utilização de métodos bi ou multivariados frente aos univariados para geração de valores de referência.

Na fase de início de intumescimento da raiz, as faixas ótimas geradas pela FS, DRIS e CND para N, P, Mg, S, Mn e Zn situaram-se dentro do intervalo de Trani e Raij (1997) (Tabela 3). Para K e Ca, as faixas ótimas encontradas pelos métodos FS, DRIS e CND situaram-se acima e abaixo dos limites superior e inferior, respectivamente, obtidos por Trani e Raij (1997). Com relação ao B, o limite inferior das faixas ótimas geradas pela FS, DRIS e CND foi menor que o encontrado por Trani e Raij (1997). Observa-se que, para todos esses nutrientes, as faixas ótimas obtidas pelos três métodos foram mais estreitas que as verificadas por Trani e Raij (1997). Para Cu e Fe, no entanto, as faixas ótimas constatadas por Trani e Raij (1997) foram mais estreitas que as geradas pelos métodos do DRIS, CND e FS, principalmente.

Na colheita, as faixas ótimas de N e P geradas pelos métodos da FS, DRIS e CND estiveram abaixo do limite inferior encontrado por Barłóg (2014), com beterraba açucareira, na Polônia. Para o Ca, as faixas ideais de teores do nutriente geradas pelos métodos situaram-se acima do limite superior verificado por Barłóg (2014). Com relação ao K, o limite superior da faixa de teores gerada pelos métodos da FS, DRIS e CND situou-se acima do constatado por Barłóg (2014). Para esses macronutrientes citados, verifica-se que as faixas ótimas geradas pelos métodos, principalmente DRIS e CND, foram mais estreitas que as encontradas por Barłóg (2014). Isso pode estar associado ao banco de dados utilizado pelo autor, que englobou 408 áreas de cultivo ao longo de nove anos, nas quais, possivelmente, foram empregados diversas variedades de beterraba açucareira bem como podem ter ocorrido alterações expressivas nas práticas de cultivo com impacto no aproveitamento de nutrientes.

Essas discordâncias verificadas entre as faixas geradas pelos métodos utilizados no presente trabalho e as encontradas na literatura evidenciam a importância da diagnose foliar com padrões regionalizados, ou seja, elaborados para cada condição edafoclimática de cultivo, conforme constatado para outras culturas, como alho (Cunha et al. 2016), arroz (Wadt et al., 2013), cana-de-açúcar (Camacho

et al., 2012), cenoura (Dezordi et al., 2016), goiaba (Souza et al., 2013) e laranja-pêra (Dias et al., 2013; Santos et al., 2013).

As faixas ótimas de K, Ca, Mg, S, Cu e Zn são semelhantes nas duas fases amostradas dentro de cada método (FS, DRIS e CND) (Tabelas 3 e 4). Para N e P, os teores das faixas ótimas geradas pela FS, DRIS e CND na colheita apresentaram-se menores que os das faixas obtidas na fase de início de intumescimento da raiz. No caso do Mn, foi observado comportamento contrário para o DRIS e CND, em que as faixas ótimas na colheita situaram-se acima do limite superior do intervalo na fase de início de intumescimento da raiz. Malavolta et al. (1997) destacam que é preciso padronizar a fase fenológica de amostragem para comparar resultados de análise foliar. Entretanto, para K, Ca, Mg, S, Cu e Zn essa padronização evidenciou não ser necessária quando se consideram as faixas ótimas geradas pelos métodos da FS, DRIS e CND em cada fase com base na população de referência. Assim, tal fato torna-se uma vantagem por permitir a diagnose correta desses nutrientes numa fase precoce da cultura (início do intumescimento da raiz tuberosa). Isso é mais vantajoso ainda para o K, que é o nutriente mais extraído e exportado pela beterraba (Sediyama et al., 2011; Cardoso et al., 2017). Com relação ao B, embora as faixas ótimas geradas em cada fase sejam próximas, na colheita o intervalo é mais estreito e com menor limite superior. Dessa forma, o diagnóstico com base na faixa ótima gerada no início do intumescimento da raiz tem possibilidade de ser errôneo.

A divergência das faixas ótimas entre as fases pode ser explicada pelo acúmulo de cada nutriente ao longo do ciclo da beterraba. Os teores de N e P reduziram da fase de início de intumescimento da raiz para a colheita, o que pode ser consequência da maior alocação desses nutrientes nas raízes em relação à parte aérea, em especial ao final do ciclo da cultura (Cardoso et al., 2017).

Na fase de início de intumescimento da raiz tuberosa os nutrientes mais limitantes foram K, Mg e S, independente do método (FS, DRIS e CND) e do critério de classificação (potencial de resposta à adubação e faixa ótima) para a população geral (Tabela 5). Tendência semelhante foi observada para a população de baixa produtividade, haja vista que esta compõe 71,1% da população geral. A deficiência de K pode ser justificada pela maior demanda do nutriente nessa fase da cultura da

beterraba (Grangeiro et al., 2007; Cardoso et al., 2017). A limitação do Mg pode estar associada ao efeito antagônico entre Ca e Mg (Prado, 2008), em especial quando são aplicadas elevadas doses de calcário com ampla relação Ca:Mg nos cultivos de hortaliças. No caso do S, a deficiência pode estar associada ao uso de fontes de fertilizantes e formulados que não contenham o nutriente em sua composição. Oliveira et al. (2017) constataram em solo com teor médio de S (6,79 mg dm^{-3}) que a aplicação de 50 kg ha^{-1} do nutriente dobrou a produtividade, o que demonstra que a beterraba é responsiva à adubação sulfatada. Na colheita, desses três nutrientes mais limitantes na fase de início de intumescimento da raiz (K, Mg e S), para a população de baixa produtividade, K e S continuaram como os mais limitantes.

De forma geral, na fase de início de intumescimento da raiz, Mn e Zn foram os nutrientes menos limitantes. Na colheita, o Zn continuou como um dos nutrientes menos limitantes, juntamente com o Cu. Para a população de alta produtividade (população de referência), a ordem de limitação nutricional não apresentou sequência dos nutrientes, independente do método ou critério de classificação. Destaca-se a divergência das ordens de limitação nutricional geradas pelos métodos FS, DRIS e CND e os critérios de classificação (potencial de resposta à adubação e faixa ótima) com a ordem de limitação obtida com base em Trani e Raij (1997), na fase de início de intumescimento da raiz. Esse resultado confirma a necessidade de atualização dos teores foliares da cultura da beterraba e evidencia a capacidade de diagnóstico nutricional minucioso dos métodos FS, DRIS e CND. Sem pormenorizar, embora tenham sido observadas diferenças nas ordens de limitação entre os critérios de classificação, não foi possível apontar qual delas foi mais eficiente.

Tabela 5. Ordem de limitação nutricional gerada pelos métodos da faixa de suficiência, DRIS e CND em duas fases para a cultura da beterraba.

Método/classificação	Ordem de limitação	Ordem de limitação
	----------População geral----------	-----População de baixa produtividade------
	Início do intumescimento da raiz tuberosa	Início do intumescimento da raiz tuberosa
FS	K>Mg>S>Ca>N=P>Zn>B>Fe>Cu=Mn	K>Mg>S>Ca>N>P>B=Zn>Fe>Cu=Mn
DRIS[1]	K>Cu>S>Mn>Ca=B=Fe>N>P=Zn>Mg	K>Cu>S>Ca>N=B=Mn>Fe>P>Zn>Mg
DRIS[2]	Mg>K>S>Ca>B>P>Zn>N=Cu>Fe>Mn	Mg>K>S>Ca>B>P>Zn=Cu>N>Fe>Mn
CND[1]	K=S>Ca=Cu>N=P=B=Mn>Fe>Zn>Mg	K>S>Ca>B>P=Fe>N=Cu>Mn>Zn>Mg
CND[2]	Mg>S>K>P>Ca>B>Zn>N>Cu>Fe>Mn	Mg>K>S>Ca>P>B>Zn>Cu>N>Fe>Mn
Literatura*	Ca>Mn>B>N>P=K=Mg=S=Cu=Fe=Zn	Ca>Mn>B>N>P=K=Mg=S=Cu=Fe=Zn
	Colheita	Colheita
FS	Mg>K>S=Fe>Ca>B>P>N>Mn>Cu=Zn	K=Mg>Fe>Ca=S>B>N=P>Mn>Cu>Zn
DRIS[1]	Fe>S>Cu>K=Mn>Ca>Zn>N>P>B>Mg	Fe>S>K>Cu>Ca=Mn>Zn>N>P>Mg>B
DRIS[2]	S>Fe>Ca>B>K=Mg>P=Mn>N=Zn>Cu	S>Fe>Ca>K=B>Mg>P=Mn>N>Zn>Cu
CND[1]	Fe>S>K>Ca=Cu=Mn>Zn>B>N=P>Mg	Fe>S>K>Ca>Cu>Mn>Zn>N>B>Mg>P
CND[2]	S>Ca=Fe>B>K>Mg>P=Mn>N>Zn>Cu	S>Fe>K=Ca>B>Mg>P=Mn>N>Zn>Cu
Literatura*	não há	não há
	-------População de alta produtividade------	
	Início do intumescimento da raiz tuberosa	
FS	P=Mg>N=S=Zn>K=Ca>B=Cu=Fe=Mn	
DRIS[1]	Cu>Mn>Fe>P=K=S=B=Zn>N=Ca>Mg	
DRIS[2]	Mg>N=P=S=Zn>K=Ca=B=Fe>Cu>Mn	
CND[1]	Cu>Mn>N=P=K=S>Mg=B=Fe=Zn>Ca	
CND[2]	Mg>P>N=S>Zn>Ca=B=Fe>Cu=Mn>K	
Literatura*	Ca>Mn>B>N=P=K=Mg=S=Cu=Fe=Zn	
	Colheita	
FS	Mg>P=S=Mn>K=Ca=B=Fe>N>Cu>Zn	
DRIS[1]	Cu>P=Mn=Zn>Ca=S=Fe>N=B>K>Mg	
DRIS[2]	P=Ca=S=Mn>Mg=B=Zn>Fe>N=K>Cu	
CND[1]	P=B=Mn>K=Mg=S=Cu=Fe=Zn>N=Ca	
CND[2]	Ca>P=S=Mn>N=Mg=B=Zn>Fe>K>Cu	
Literatura*	não há	

[1]Classificação gerada em função do Potencial de Resposta à Adubação. [2]Classificação gerada em função da faixa ótima de teor foliar. [3]Alta produtividade (>79,2 Mg ha^{-1}). [4]Baixa produtividade (<79,2 Mg ha^{-1}).

4 Conclusões

As faixas ótimas dos teores foliares dos macronutrientes e micronutrientes para beterraba de mesa gerados pelos métodos da FS, DRIS e CND, no geral, foram concordantes para o diagnóstico da limitação nutricional.

Os teores de nutrientes na folha referência gerados para culturas da beterraba de mesa, na região do Alto Paranaíba-MG, diferem dos existentes na literatura.

O K e o S foram os nutrientes mais limitantes para o cultivo da beterraba na região do Alto Paranaíba – MG.

A limitação de K, Ca, Mg, S, Cu e Zn pode ser diagnosticada precocemente na fase de início de intumescimento da raiz.

5 Referências

Baldock JO, Schulte EE (1996) Plant analysis with standardized scores combines DRIS and sufficiency range approaches for corn. **Agronomy Journal** 88:448-456.

Barłóg P (2014) Diagnosis of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) nutrient imbalance by DRIS and CND-clr methods at two stages during early growth. **Journal of plant Nutrition** 39:1-16.

Beaufils ER (1973) **Diagnosis and recommendation integrated system (DRIS)**. Pietermaritzburg: University of Natal, 132 p. (Soil Science Bulletin, 1).

Beverly RB (1987) Comparison of DRIS and alternative nutrient diagnostic methods for soybean. **Journal of Plant Nutrition** 10:901-920.

Camacho MA, Silveira MV, Camargo RA, Natale W (2012) Faixas normais de nutrientes pelos métodos ChM, DRIS, CND e nível crítico pelo método de distribuição normal reduzida para laranjeira-pera. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 36:193-200.

Cardoso AII, Magro FO, Oliveira Júnior MX, Abrahão C, Tavares AEB, Fernandes DM (2017) Accumulation of macronutrients in beetroot plant. **Horticultura Brasileira** 35:328-334.

Carvalho AJC, Fontes PSF, Freitas MSM, Monnerat PH, Fontes AG (2011) Yellow passion fruit plant nutritional diagnosis at different phenological stages by the diagnosis and recommendation integrated system method. **Journal of Plant Nutrition** 34:614-626.

Corrêa CV, Cardoso AII, Souza LG, Antunes WLP, Magolbo LA (2014) Produção de beterraba em função do espaçamento. **Horticultura Brasileira** 32:111-114.

Cunha MLP, Aquino LA, Novais RF, Clemente JM, Aquino PR, Oliveira TF (2016) Diagnosis of the Nutritional Status of Garlic Crops. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 40:1-14.

Dezordi LR, Aquino LA, Aquino RFBA, Clemente JM, Assunção NS (2016) Diagnostic methods to assess the nutritional status of the carrot crop. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 40:1-16.

Dias JRM, Tucci CAF, Wadt PGS, Silva AMD, Santos JZL (2013) Níveis críticos e faixas de suficiência nutricional em laranjeira-pêra na Amazônia Central obtidas pelo método DRIS. **Acta amazônica** 43:239-246.

Fageria NK, Barbosa Filho MP, Moreira A, Guimarães CM (2009) Foliar fertilization of crop plants. **Journal of Plant Nutrition** 32:1044-1064.

Gonçalves FAR, Aquino LA, Dezordi LR, Clemente JM, Novais RF (2017) Índices DRIS em três fases fenológicas da cultura da cenoura. **Pesquisa Agropecuária Tropical (Agricultural Research in the Tropics)** 47:31-40.

Gott RM, Aquino LA, Carvalho AMX, Santos LPD, Nunes PHMP, Coelho BS (2014) Índices diagnósticos para interpretação de análise foliar do milho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** 18:1110-1115.

Grangeiro LC, Negreiros MD, Souza BD, Azevedo PD, Oliveira SD, Medeiros MD (2007) Acúmulo e exportação de nutrientes em beterraba. **Ciência e Agrotecnologia** 31:267-273.

Jones CA (1981) Proposed modifications of the Diagnosis and Recommendation Integrated System (DRIS) for interpreting plant analysis. **Communications in Soil Science and Plant Analysis** 12:785-794.

Magro FO, Silva EG, Takata WHS, Cardoso AII, Fernandes DM, Evangelista RM (2015) Organic compost and potassium top dressing fertilization on production and quality of beetroot. **Australian Journal Crop Science** 9:962-967.

Malavolta E, Vitti GC, Oliveira SA (1997) **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações.** 2nd ed. Piracicaba: POTAFOS, 319 p.

Oliveira RJP, Gatiboni LC, Brunetto G, Miquelluti DJ, Valicheski RR (2017) Resposta da beterraba à adubação com nitrogênio, enxofre e micronutrientes em um Cambissolo Háplico. **Horticultura Brasileira** 35:63-68.

Parent LE, Dafir M (1992) A theorical concept of compositional nutrient diagnosis. **Journal of the American Society for Horticultural Science** 117:239-242.
Partelli FL, Dias JRM, Vieira HD, Wadt PGS, Paiva Júnior E (2014) Avaliação nutricional de feijoeiro irrigado pelos métodos CND, DRIS e faixas de suficiência. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 38:858-866.

Prado RM (2008) **Nutrição de plantas.** São Paulo: Editora UNESP, 420 p.

René W, Côté B, Camiré C, Burgess M, Fyles JW (2013) Development and application of CVA, DRIS, and CND norms for three hybrids of *Populus maximowiczii* planted on southern Quebec. **Journal of Plant Nutrition** 36:118-142.

Rozane DE, Parent LE, Natale W (2016) Evolution of the predictive criteria for the tropical fruit tree nutritional status. **Científica** 44:102-112.

Santos EF, Donha RMA, Araújo CMM, Lavres Junior J, Camacho MA (2013) Faixas normais de nutrientes em cana-de-açúcar pelos métodos ChM e CND e nível crítico pela distribuição normal reduzida. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 37:1651-1658.

Sediyama MA, Santos MR, Vidigal SM, Salgado LT (2011) Produtividade e exportação de nutrientes em beterraba cultivada com cobertura morta e adubação orgânica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** 15:883–889.

Silva FDS, Silva NO, Oliveira TF, Reis MR, Aquino LA (2017). Foliar indices for carrot crop using the compositional nutrient diagnosis method. **Pesquisa Agropecuária Tropical** 47:399-407.

Silva PNL, Lanna NBL, Cardoso AII (2016) Produção de beterraba em função de doses de torta de mamona em cobertura. **Horticultura Brasileira** 34:416-421.

Souza HAD, Rozane DE, Amorim DAD, Natale W (2013) Normas preliminares DRIS e faixas de suficiência para goiabeira 'Paluma'. **Revista Brasileira de Fruticultura** 35:282-291.

Tivelli SW, Factor TL, Teramoto JRS, Fabri EG, Moraes AD, Trani PE, May A (2011) **Beterraba: do plantio à comercialização.** Campinas: IAC, 45 p.

Tomio DB, Utumi MM, Perez DV, Dias JRM, Wadt PGS (2015) Antecipação da diagnose foliar em arroz de sequeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 50:250-258.

Trani PE, Raij B (1997) Hortaliças. In: Raij B, Cantarella H, Quaggio JA, Furlani AMC (Eds.) **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo.** Campinas: Instituto Agronômico/Fundação IAC, p.157-185. (Boletim Técnico n.º 100)

Urano EOM, Kurihara CH, Maeda S, Vitorino ACT, Gonçalves MC, Marchetti ME (2006) Avaliação do estado nutricional da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 41:1421-1428.

Xu M, Zhang J, Wu F, Wang X (2015) Research Article Nutritional Diagnosis for Apple by DRIS, CND and DOP. **Advance Journal of Food Science and Technology** 7:266-273.

Wadt PGS, Anghinoni I, Guindani RHP, Lima AST, Puga AP, Silva GS, Prado RM (2013) Padrões nutricionais para lavouras arrozeiras irrigadas por inundação pelos métodos da CND e chance matemática. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 37: 145-156.

Wadt PGS, Novais RF, Alvarez VVH, Fonseca S, Barros NF, Dias LE (1998) Três métodos de cálculo do DRIS para avaliar o potencial de resposta à adubação de árvores de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 22:661-666.