

MODELO PARA RECOMENDAÇÃO DE CORRETIVOS E FERTILIZANTES PARA A CULTURA DO FEIJÃO COM BASE NO BALANÇO NUTRICIONAL

ZANÃO JÚNIOR, Luiz Antônio¹

RESUMO

O feijão representa fonte básica de proteínas para população brasileira. O Paraná destaca-se como maior produtor dessa leguminosa. Maioria das recomendações de adubação baseia-se em análises de solo e tabelas que relacionam a classe de disponibilidade do nutriente no solo com a dose a ser aplicada. Objetivo desse trabalho foi desenvolver um sistema alternativo de recomendação de corretivos e fertilizantes para cultura do feijão, mediante modelo Ferticalc-Feijão. O princípio do modelo é o balanço nutricional, ou seja, a recomendação se faz a partir da diferença entre o requerimento de nutrientes pela planta (dependente da produtividade esperada e eficiência da utilização dos nutrientes) e o suprimento de nutrientes pelo solo, por resíduos orgânicos, FBN, matéria orgânica do solo e calagem. O modelo considera ainda o fator sustentabilidade do sistema, visando manter uma quantidade de nutriente no solo capaz de garantir produtividade mínima em cultivos subsequentes. Para recomendar calagem, o sistema considera dois métodos: neutralização do Al^{3+} e elevação dos teores de $Ca^{2+}+Mg^{2+}$, ou saturação por bases. Ferticalc-Feijão foi elaborado por meio da sistematização e modelagem de informações disponíveis na literatura e com experimentos conduzidos para esse fim. Após a construção do Ferticalc-Feijão simulou-se recomendações de adubação com dados de análises de solos de áreas produtoras de feijão. Também, calculou-se as doses dos fertilizantes pelas tabelas do Manual de Adubação do Paraná. O Ferticalc-Feijão recomendou doses menores de nutrientes, diminuindo custos com corretivos e fertilizantes. O modelo Ferticalc-Feijão está em fase de validação no campo para o desenvolvimento de um aplicativo gratuito.

PALAVRAS-CHAVE: *Phaseolus vulgaris*; modelagem, adubação.

MODEL FOR RECOMMENDING LIMING MATERIALS AND FERTILIZERS FOR COMMON BEAN CROP BASED ON NUTRITIONAL BALANCE

ABSTRACT

Common bean is a basic source of protein for the Brazilian population. Paraná stands out as the largest producer of this legume. Most fertilization recommendations are based on soil analyses and tables that relate soil nutrient availability classes to the applied fertilizer rates. The objective of this study was to develop an alternative system for recommending liming materials and fertilizers for the common bean crop through the Ferticalc-Bean model. The principle of the model is nutritional balance; that is, recommendations are based on the difference between plant nutrient requirements (dependent on expected yield and nutrient use efficiency) and nutrient supply from the soil, organic residues, biological nitrogen fixation (BNF), soil organic matter, and liming. The model also considers the sustainability factor of the system, aiming to maintain a nutrient level in the soil capable of ensuring minimum productivity in subsequent crops. For liming recommendations, the system considers two methods: neutralization of Al^{3+} and the increase of $Ca^{2+} + Mg^{2+}$ levels, or base saturation. Ferticalc-Bean was developed through the systematization and modeling of information available in the literature, as well as experiments conducted for this purpose. After constructing Ferticalc-Bean, fertilization recommendations were simulated using soil analysis data from common bean-producing areas. Fertilizer rates were also calculated using the tables from the Paraná Fertilization Manual. Ferticalc-Bean recommended lower nutrient doses, reducing costs with liming materials and fertilizers. The Ferticalc-Bean model is currently under field validation for the development of a free application.

KEYWORDS: *Phaseolus vulgaris*; modeling; fertilization.

¹Pesquisador da Área de Solos do IDR-Paraná. E-mail: lzanao@idr.pr.gov.br

1. INTRODUÇÃO

O feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) é considerado a leguminosa mais importante no mundo para consumo humano direto. O Brasil se destaca sendo o maior produtor e consumidor mundial de feijão, sendo essa a principal fonte de proteína na dieta da população brasileira (MAPA, 2024). É uma cultura de ciclo curto do plantio a colheita e as condições climáticas possibilitam o cultivo de até três safras anuais do grão em algumas regiões (CONAB, 2025).

O feijoeiro, por apresentar ciclo relativamente curto e distribuição do sistema radicular muito superficial é uma cultura exigente em macro e micronutrientes e não tolera solos ácidos e com alumínio trocável. Assim, a correção da acidez do solo e a adubação são as práticas que têm proporcionado os maiores incrementos na produtividade do feijoeiro quando em condições de solos ácidos e de baixa fertilidade.

A fertilidade do solo e adubação do feijão são uns dos fatores mais importantes a influenciar o processo produtivo da cultura. Os fertilizantes representam os maiores gastos com insumos para implantação de uma lavoura de feijão.

Geralmente as recomendações de adubação estão baseadas no uso de tabelas feitas com calibrações regionais, de acordo com características do solo e com a cultura no Brasil. Em 2017 foi lançado o novo Manual de Adubação e Calagem para o estado do Paraná, com recomendações para um número maior de culturas, com bases mais atualizadas no estado (SBCS/NEPAR, 2017).

Segundo Ramírez (2015), esse método das tabelas procura fazer uma classificação distinguindo classes de fertilidade, o que resulta em inconvenientes derivados da heterogeneidade do solo, que muda de uma para outra localidade.

Segundo Novais et al. (2007) é necessário desenvolver sistemas para recomendação de adubação baseadas em modelagem que permita a utilização mais ampla e evolução mais segura, substituindo as atuais tabelas de recomendação de adubação. O desenvolvimento desses modelos permite, em um segundo momento, o desenvolvimento de softwares ou aplicativos que estimem doses recomendadas de nutrientes, levando em consideração uma quantidade maior de fatores. Esses modelos permitem uma recomendação mais precisa e que podem levar à economia de fertilizantes. Além de evitar prejuízos econômicos para os produtores, pode-se diminuir o excesso de fertilizantes, diminuindo contaminação ambiental.

O objetivo do presente trabalho consiste em desenvolver um sistema alternativo para recomendação de corretivos e fertilizantes para a cultura do feijão fundamentado no balanço de nutrientes, mediante a construção do modelo Ferticalc-Feijão para posterior desenvolvimento de um aplicativo.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 NECESSIDADES NUTRICIONAIS DO FEIJÃO

A maioria dos estudos sobre a marcha de absorção de nutrientes pelo feijoeiro nos possibilita concluir que a absorção de nutrientes apresenta comportamento semelhante à curva de crescimento da cultivar (GALLO; MIYASAKA, 1961; HAAG et al., 1967; MORAES, 1988; VIEIRA, 2006). Dessa forma, época de maior demanda nutricional situa-se no período que antecede maior crescimento do feijoeiro, ou seja, entre o início da floração e a formação de vagens. A partir da época da formação das vagens ocorrem decréscimos nos teores de N, P, Mg e K nas folhas da planta madura, em decorrência da translocação desses nutrientes para os grãos. Por outro lado, o desenvolvimento das plantas condiciona o aumento nos teores de Ca principalmente nas folhas, o que indica em parte, a ausência de redistribuição interna desse nutriente, e, por conseguinte, a necessidade de um suprimento constante à cultura.

No que se refere ao acúmulo de macronutrientes, vários autores demonstraram que N e K são os nutrientes mais absorvidos pelo feijoeiro (GALLO; MIYASAKA, 1961; HAAG et al., 1967; MORAES, 1988; VIEIRA, 2006). A ordem de acúmulo de Ca, Mg, P e S varia conforme o estudo, dependendo principalmente das condições em que o estudo foi conduzido e da cultivar avaliada.

2.2 NECESSIDADE DE CALAGEM DA CULTURA DO FEIJÃO

A maioria dos solos do Brasil caracteriza-se por apresentar níveis elevados de acidez, trazendo implicações diretas e indiretas que se refletem em reduzido desenvolvimento e baixa produtividade do feijoeiro. As quantidades de calcário geralmente têm sido recomendadas através de métodos que se fundamentam na correção da acidez do solo, elevando-se o pH e saturação por bases a valores tidos como adequados ao bom desenvolvimento das culturas, e na neutralização do Al^{3+} trocável. De um modo geral, condições favoráveis a disponibilidade de nutrientes às plantas, são verificadas na faixa de pH em água de 5,5 a 6,0 (OLIVEIRA, 2003; SOUZA et al., 2007; MALAVOLTA, 2006; SBCS/NEPAR, 2017).

No Paraná, a necessidade de calcário a ser utilizada na cultura do feijoeiro é calculada pelo método da elevação da saturação por bases (V %) do solo. Recomenda-se a elevação do índice de saturação em bases para 70 % sempre que esse valor estiver abaixo de 60 % (SBCS/NEPAR, 2017).

2.3 ADUBAÇÃO DA CULTURA DO FEIJÃO

O N é o nutriente mais exigido pela maioria das culturas, inclusive pelo feijoeiro (VIEIRA, 2006). A adubação nitrogenada nessa cultura tem sido fundamental no aumento da produtividade.

De um modo geral as doses de N recomendadas por ocasião da semeadura estão entre 15-25 kg ha⁻¹ de N. Em cobertura no solo recomenda-se a aplicação de 30 a 60 kg ha⁻¹ de N (SBCS/NEPAR, 2017).

A máxima disponibilidade de P no solo e sua melhor absorção pelas culturas se verifica entre valores de pH entre 6,0 a 7,0. Assim, reforça-se a importância da calagem. A fixação do fósforo, muitas vezes, pode ser diminuída pelo aumento do pH do solo (NOVAIS; SMYTH, 1999; BEEGLE, 2005; SBCS/NEPAR, 2017).

Apesar da pequena quantidade do P exigida pelo feijoeiro, a adubação fosfatada é a que mais tem proporcionado respostas positivas na produtividade da cultura no Paraná (PARRA et al., 1980). Os acréscimos obtidos estão correlacionados com sua disponibilidade nos solos, sendo destacado o acentuado efeito da adubação fosfatada principalmente nos solos com baixos teores de P.

Conforme SBCS/NEPAR (2017), para interpretação dos resultados foram estabelecidas classes de teores desse nutriente, considerando-se ainda os teores de argila do solo. As doses recomendadas variam de 0 a 110 kg ha⁻¹ de P₂O₅ em função da disponibilidade de fósforo determinada pela análise do solo e da produtividade esperada.

No caso do K, apesar de ser um nutriente exigido em grandes quantidades pela cultura, a adubação potássica, em 33 experimentos conduzidos pelo IAPAR, raramente evidenciou efeitos positivos na produtividade do feijoeiro (PARRA et al., 1980). As recomendações de fertilizante potássico para o estado do Paraná baseiam-se na interpretação dos teores de nutrientes revelados pela análise de solo, extraídos pela solução extratora ácida Mehlich-1 (HCl 0,05 mol L⁻¹ + H₂SO₄ 0,0125 mol L⁻¹). As doses recomendadas para o feijoeiro variam de 0 a 60 kg ha⁻¹ de K₂O (SBCS/NEPAR, 2017).

A calagem é a maneira mais prática de se fornecer Ca e Mg para as plantas. Por ser uma cultura exigente quanto à correção do solo, as quantidades desses macronutrientes fornecidas com a calagem costumam ser suficientes para se prevenir eventuais deficiências e suprir a necessidade do feijoeiro. Entretanto, o suprimento desses nutrientes irá depender da composição do corretivo utilizado (CTSBF, 2010; SBCS/NEPAR, 2017).

A resposta das culturas à aplicação de S tem aumentado pelo maior potencial produtivo, e portanto, maior extração desse nutriente pelas cultivares mais recentes e pelo uso constante de

fertilizantes de alta concentração e que não contêm S, como ureia, superfosfato triplo, DAP, MAP e KCl. Em solos arenosos ou com baixo teor de matéria orgânica a probabilidade de resposta à aplicação de S também aumenta. A matéria orgânica é a principal fonte de S no solo. Recomenda-se a aplicação de pelo menos 30 kg ha⁻¹ de S no cultivo do feijoeiro (OLIVEIRA, 2003).

Segundo CTSBF (2010) em solos arenosos, ou com baixos teores de matéria orgânica ou solos com pH muito elevado há maior probabilidade de ocorrer deficiência de micronutrientes, principalmente Mn, Zn, Cu e Fe e, em solos ácidos pode ocorrer deficiência de Mo. Por outro lado, o aumento do pH do solo promove maior disponibilidade de Mo, suprimindo a pequena necessidade do feijoeiro nesse micronutriente.

Conforme Oliveira (2003) e CTSBF (2010), se constatada deficiência de micronutrientes através da análise química do solo ou de análise de tecido, recomenda-se sua aplicação, de preferência no solo, na semeadura. As deficiências mais comuns observadas são de Zn e B. Nesse caso, recomenda-se a aplicação de 2 a 4 kg ha⁻¹ de Zn e 1 kg ha⁻¹ de B, preferencialmente no solo, juntamente com a adubação de semeadura.

2.4 MODELOS FERTICALC

Utilizando os princípios do balanço nutricional, o Ferticalc combina modelos mecanísticos e empíricos, utilizando a menor quantidade de informações possível, sem, comprometer a exatidão das recomendações, conforme Deus (2012). As recomendações a partir do Ferticalc são baseadas no balanço nutricional entre perdas e ganhos de nutrientes no sistema solo-planta. O balanço nutricional é obtido pela diferença entre o requerimento do nutriente pela cultura e seu suprimento pelo solo, fixação biológica de N (FBN), os resíduos vegetais e a matéria orgânica.

Segundo Oliveira, et al. (2005) nos modelos Ferticalc se expressa tanto o requerimento (rq), quanto o suprimento (su) para cada nutriente em termos de dose, devendo ser a diferença entre ambos igual à dose recomendada do nutriente (dNu_i) via fertilizante. O requerimento (rqNu_i) é a demanda (dNu_i) dos nutrientes corrigidas pela taxa de recuperação dos mesmos pela planta (trNu_i_Pl) (ALVAREZ V. et al., 2014), para atingir uma produtividade determinada, por ciclo de produção.

O balanço no Ferticalc-Feijão, fica resumido assim: $drNu_i = (rqCul + rqSus) - (suSol + suMOS + suROrg + suFBN)$. Em que, $drNu_i$ = dose recomendada do nutriente i; $rqCul$ = requerimento da cultura; $rqSus$ = requerimento de sustentabilidade; $suSol$ = suprimento pelo solo; $suMOS$ = suprimento pela matéria orgânica do solo; $suROrg$ = suprimento pelos Resíduos Orgânicos e $suFBN$ = suprimento pela FBN.

O sistema leva em consideração o requerimento de sustentabilidade $rqSus$ para manter e

melhorar a fertilidade do solo a longo prazo, ou para cultivos futuros, procurando-se de acordo com o proposto por Deus (2012), não considerar a totalidade das reservas dos nutrientes trocáveis no solo como fonte.

O Ferticalc apresenta três módulos: o primeiro, que estima o requerimento; o segundo, que estima o suprimento de nutrientes e, o terceiro, que calcula o balanço entre os requerimentos e o suprimento, e estima as quantidades de nutrientes, corretivos e fertilizantes a serem aplicados para atingir a demanda da cultura (DEUS, 2012; RAMIREZ, 2015).

Segundo Cantarutti et al (2007), uma das vantagens na utilização de modelos como o Ferticalc, para cálculo das doses de nutrientes é a possibilidade de solucionar processos complexos associados aos efeitos de múltiplas características de solo, possibilitando a simulação de várias situações ou condições de produção, diferente do modelo expresso nas tabelas de recomendação.

O Ferticalc foi desenvolvido para arroz (RAFAELLI, 2000), milho (CARVALHO, 2000), banana (OLIVEIRA et al., 2005), coco (ROSA, 2002), soja (SANTOS, 2002), algodão (POSSAMAI, 2003), pastagens (SANTOS, 2003), abacaxi (SILVA, 2006), melão (DEUS, 2012), laranja (STAHINGER, 2013), orquídea (SANTOS, 2014) e batata (RAMÍREZ, 2015).

O objetivo principal do presente projeto consiste em desenvolver um sistema para recomendação de corretivos e fertilizantes para a cultura do feijão fundamentado no balanço de nutrientes, mediante a construção do modelo Ferticalc-Feijão.

3. METODOLOGIA

Para o desenvolvimento do modelo Ferticalc-Feijão, foram calculadas as necessidades de calagem, por dois métodos de recomendação mais utilizados no Brasil, e posteriormente foi calculada a recomendação de adubação para uma safra da cultura do feijão, considerando ciclo de aproximadamente 85 dias. Nas simulações foram utilizados dados reais de dez solos com características distintas e discrepantes contendo entre 9 a 75 % de argila (Tabela 1).

3.1 NECESSIDADE DE CALAGEM

As simulações da necessidade da calagem com o modelo Ferticalc- Feijão foram estimadas por dois métodos mais utilizados atualmente: Método da saturação por bases e Método da neutralização do Al e elevação dos teores de Ca+Mg do solo.

3.1.1 Método de Saturação por bases

Esse método se baseia na relação existente entre pH do solo e saturação por bases (V %). Quanto maior a saturação por bases maior o pH do solo.

A necessidade de calagem foi obtida pela equação: $NC = [(V_2 - V_1)/100] * T$, em que T (CTC a pH 7) = SB + (H+Al) em $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; SB (soma de bases) = $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+ + \text{Na}^+$, em $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; V_1 (saturação por bases atual do solo) = $100 * (\text{SB}/T)$, em %; V_2 = saturação por bases desejada ou esperada para a cultura a ser implantada e para a qual é necessária a calagem, com valor tabelado (SBCS/NEPAR, 2017). No caso do feijão, será utilizado o $V_2 = 70$ %.

Tabela 1 – Análise química e granulométrica dos solos considerados para o Ferticalc-Feijão.

Amostra	pH H ₂ O	pH CaCl ₂	P mg dm ⁻³	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	t	T
				----- cmol _c dm ⁻³ -----							
1	5,1	4,5	28,3	0,16	1,0	0,4	0,25	4,1	1,6	1,8	5,7
2	5,3	4,7	2,5	0,16	3,4	0,9	0,20	4,9	4,5	4,7	9,4
3	5,3	4,7	8,0	0,29	3,6	2,0	0,45	5,0	5,9	6,3	10,9
4	5,5	4,9	15,6	0,31	3,2	1,6	0,15	12,1	5,11	5,11	16,9
5	4,9	4,3	1,8	0,12	1,2	1,0	1,04	9,7	2,4	3,4	12,1
6	5	4,4	4,2	0,10	1,4	0,8	1,00	9,7	2,3	3,3	12,0
7	5,3	4,7	3,2	0,45	3,1	1,9	0,47	8,4	5,5	5,9	13,8
8	5,2	4,6	35,8	0,37	2,7	1,0	0,34	6,0	4,1	4,4	10,1
9	5,5	4,9	34,2	0,36	4,4	2,2	0,05	5,0	6,9	6,9	11,8
10	5,2	4,6	1,7	0,21	1,5	1,2	0,50	6,4	2,9	3,4	9,4
Amostra	C g kg ⁻¹	V %	m	B	Cu	Fe	Mn	Zn	Argila	Silte	Areia
				----- mg dm ⁻³ -----						%	-----
1	8,4	27,5	13,8	0,2	1,1	55,5	63,6	1,1	9	6	85
2	15,7	47,8	4,3	0,3	1,8	95,0	76,7	2,9	14	27	59
3	20,7	54,3	7,1	0,6	1,1	93,6	15,5	2,5	25	21	54
4	20,7	30,2	0,0	0,4	1,3	31,2	60,5	1,6	36	34	30
5	26,4	19,8	30,3	0,4	7,1	35,8	67,4	1,6	49	23	28
6	28,0	19,2	30,3	0,2	3,5	63,6	36,2	1,2	57	17	27
7	25,6	39,5	7,9	0,2	7,1	22,9	50,3	1,1	65	16	19
8	11,3	40,5	7,7	0,3	3,0	55,1	82,5	2,4	66	11	23
9	17,5	58,0	0,7	0,3	9,0	52,4	99,3	6,8	70	17	13
10	12,8	31,1	14,7	0,2	8,1	34,0	44,8	0,2	75	14	12

Ca, Mg, Al: extrator KCl 1,0 mol L⁻¹; T = capacidade de troca de cátions a pH 7,0; P, K, Cu, Fe, Mn e Zn: extrator Mehlich-1; t = CTC efetiva; H+Al: extrator acetato de cálcio 0,5 mol L⁻¹ - pH 7,0; m = saturação por Al³⁺; B: Extrator água quente; V = saturação por bases; SB = Soma de Bases Trocáveis; C: Walkey-Black.

3.1.2 Método da neutralização do Al e elevação dos teores Ca+Mg

Este método se baseia na neutralização do alumínio trocável e elevação dos teores de Ca e Mg no solo. A necessidade de calagem (NC) é obtida pela seguinte equação: $NC = Y [Al^{3+} - (mt \cdot t/100)] + [X - (Ca^{2+} + Mg^{2+})]$. Considera-se que Y = valor variável em função do poder tampão de acidez do solo (PTA), que será estimada de acordo com a textura do solo (Tabela 2); Al^{3+} = acidez trocável, em $cmol_c dm^{-3}$; mt = máxima saturação por Al^{3+} tolerada pela cultura, em %; t = CTC efetiva, em $cmol_c dm^{-3}$; X = valor variável em função dos requerimentos de Ca e Mg pelas culturas; $Ca^{2+} + Mg^{2+}$ = teores de Ca e de Mg trocáveis, em $cmol_c dm^{-3}$. Foram considerados para fins de cálculo, mt = 15 % e X = 2 $cmol_c dm^{-3}$, conforme indicação de Alvarez, V. e Ribeiro (1999), para a cultura do feijão.

3.1.3 Quantidade de calcário a ser usada (QC)

A necessidade de calagem (NC) calculada pelos critérios ou métodos anteriormente apresentados indica a quantidade de $CaCO_3$, PRNT = 100 % a ser aplicada por hectare. Assim, a quantidade de calcário (QC) a ser aplicada deve ser ajustada de acordo com o poder relativo de neutralização total (PRNT) do calcário adquirido, em $t ha^{-1}$, utilizando-se a equação: $QC = NC \cdot (100/PRNT)$.

Após calcular a necessidade de calagem pelos dois métodos, os resultados foram diferentes. Dessa forma, foi definida a necessidade de calagem recomendada (NCR). Para isso, foi adotado o algoritmo proposto por Stahringer (2013), que inclui a seguinte sequência:

Procedimento I - Dentre os valores calculados de NC, foram definidas a menor e a maior dose, e foram comparados com o valor de X (Ca^{2+} e Mg^{2+} que a cultura necessita, que nesse caso é 2 $cmol_c dm^{-3}$), utilizando o seguinte algoritmo:

Se dentre as NC, a menor NC foi $< X$, a NCR, foi a $> NC$; Se a maior NC foi $> X$, a NCR foi $X = 2 cmol_c dm^{-3}$; Se as duas NC foram $< X$, a NCR, foi $X = 2 cmol_c dm^{-3}$.

No entanto, o valor da NCR tem que ser $\geq X$ e $\leq H+Al$, para fazer essa verificação, seguiu-se para o procedimento II.

Procedimento II - Segundo o valor de H+Al da análise de solo, em $cmol_c dm^{-3}$, foram comparadas as NC obtidas com o referido valor H+Al, observando se são menores, levando-se em consideração que 1 $t ha^{-1}$ de $CaCO_3$ equivale a 1 $cmol_c dm^{-3}$:

Se a maior NC foi $> X$ e $< H+Al$ a NCR, foi a maior NC;

Se a maior NC foi $> H+Al$, a NCR foi o valor H+Al.

Por fim, torna-se necessário verificar que o pH calculado esteja na faixa do requerimento do

feijão, que é de 5,5 a 6,0 pH em H₂O (Raij et al., 1985). Assim, com o Ferticalc-Feijão há a possibilidade de se calcular a necessidade de calagem pelos dois métodos sugeridos, visando a aumentar o pH do solo, neutralizar a acidez trocável, e elevar os teores de Ca e Mg no solo, se necessário, nutrindo corretamente as plantas. Há possibilidade, conforme Deus (2012), de selecionar a necessidade de calagem mais adequada de acordo com a proposta dos procedimentos I e II, também atender necessidades específicas do solo avaliado, segundo critérios propostos pelo usuário.

3.2 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA FERTICALC-FEIJÃO

O sistema Ferticalc deve ser alimentado com dados referentes ao crescimento e acumulação de nutrientes para obtenção do Coeficiente de Utilização Biológica (CUB), para o feijão. Esses dados podem ser obtidos através de experimentos ou utilizar os disponíveis na literatura. Oliveira et al. (2005) elaboraram Ferticalc-Banana com dados obtidos dessa última maneira.

No caso do Ferticalc-Feijão, foram conduzidos experimentos para obtenção dos dados, na estação experimental do IDR-Paraná em Santa Tereza do Oeste e, como houve necessidade, foram complementados por dados publicados, podendo ser atualizado continuamente.

3.2.1 Módulo Requerimento

a) Requerimento de nutrientes pela planta

Estudos com adubação e nutrição da cultura do feijão foram objetivo de muitas pesquisas (GALLO; MIYASAKA, 1961; HAAG et al., 1967; PARRA et al., 1980; MORAES, 1988 e Vieira, 2006), porém, faltam alguns dados para ter uma base completa que permita fazer uma estratificação do requerimento $rqNu_i_{PI}$, de acordo com as cultivares cultivadas atualmente no Brasil.

Para o desenvolvimento do módulo requerimento foi considerado o ciclo produtivo médio das cultivares de feijão no Paraná, que é de aproximadamente 85 dias; o teor de cada um dos nutrientes armazenadas nos cinco compartimentos avaliados (folhas, caule, raízes, vagens e grãos) e o acúmulo de massa de matéria seca (mMS).

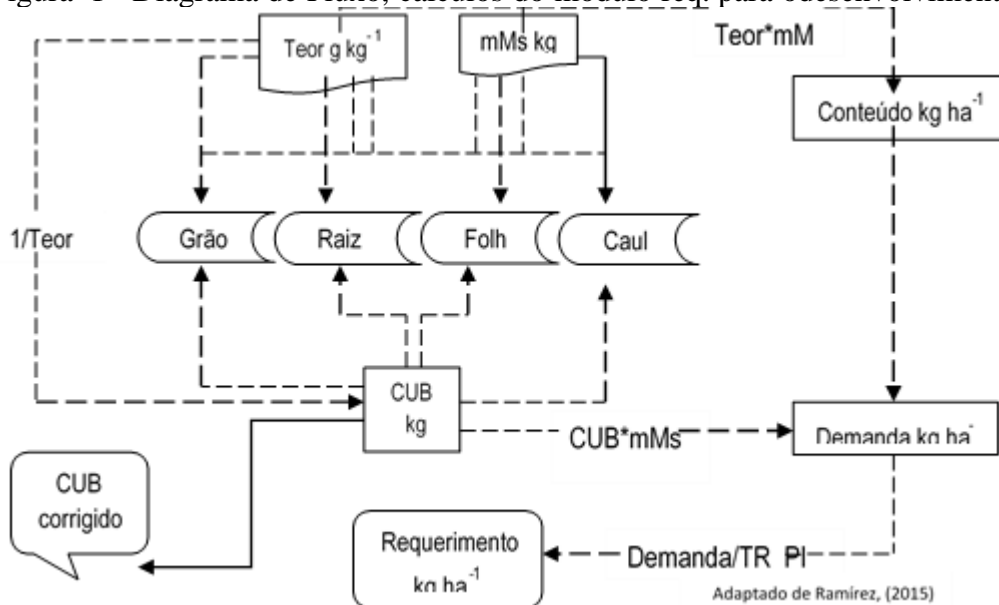
Os teores para cada um dos compartimentos da planta foram registrados, segundo a estratificação de sete produtividades numa faixa de 1,0 até 4,0 t ha⁻¹ (1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5 e 4,0 t ha⁻¹) (Tabela 2).

Tabela 2 - Teores considerados no desenvolvimento da base de dados para o Ferticalc-Feijão, ao longo do ciclo, para produtividade de 3000 kg ha⁻¹ de grãos.

Teor foliar	Macronutrientes						Micronutrientes				
	g kg ⁻¹						mg kg ⁻¹				
	N	P	K	Ca	Mg	S	Fe	Mn	B	Cu	Zn
Raízes	14,10	2,80	14,30	2,50	2,10	2,90	160,00	203,0	82,00	4,00	32,00
Folhas	35,00	4,50	30,21	15,00	4,50	3,01	300,75	60,45	27,49	9,70	29,13
Caule	14,91	2,37	44,36	5,72	2,33	2,39	100,22	17,90	23,52	8,14	20,80
Vagens	16,00	2,10	26,11	3,80	3,22	1,46	136,07	17,84	31,70	6,58	16,63
Grãos	27,32	3,90	17,33	2,80	2,02	1,54	56,52	9,81	11,45	8,44	26,02

Os dados registrados foram obtidos de experimentos conduzidos, dados de pesquisa ainda não publicados e alguns complementados da literatura. Nos casos em que o acúmulo ao longo do ciclo foi apresentado como equação, foi obtido matematicamente o ponto de máximo acúmulo do nutriente *i* no compartimento *j*, que se corrige pelo fator de retranslocação, visando não superestimar a demanda da planta, que posteriormente foi corrigida pela taxa de recuperação da planta *trNu_i_PI*, para obter o requerimento total (Figura 1).

Figura 1 - Diagrama de Fluxo, cálculos do módulo req. para o desenvolvimento do Ferticalc-Feijão.



Os dados registrados foram obtidos de experimentos conduzidos, dados de pesquisa ainda não publicados e alguns complementados da literatura. Nos casos em que o acúmulo ao longo do ciclo foi apresentado como equação, foi obtido matematicamente o ponto de máximo acúmulo do nutriente *i* no compartimento *j*, que se corrige pelo fator de retranslocação, visando não superestimar a

demanda da planta, que posteriormente foi corrigida pela taxa de recuperação da planta $trNu_i_{Pl}$, para obter o requerimento total (Figura 1).

As informações específicas registradas neste módulo-planta foram da acumulação de massa de matéria seca e teor de nutrientes (N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn e Zn), para cada parte da planta: raízes (r), folhas (f), caules (c) e grãos (g) relacionadas com a produtividade desejada.

Depois, com esses dados foram calculados o Coeficiente de Utilização Biológica (CUB) em $kg\ kg^{-1}$ para macronutrientes e $kg\ g^{-1}$ para micronutrientes do nutriente i no compartimento j , expressado como: $CUB_{ij} = (1/tNu_{ij}) * 1000$. Assim, tNu_{ij} = teor do nutriente i no compartimento j em $g\ kg^{-1}$ para macronutrientes e $mg\ kg^{-1}$ para micronutrientes, e 1000 é o fator de conversão de $g\ ha^{-1}$ para $kg\ ha^{-1}$ (Figura 1 e Tabela 3).

No Ferticalc-Feijão os ajustes foram feitos considerando a translocação das partes da planta com capacidade fotossintética (folha e caule), para os grãos, utilizando a seguinte equação: FC_{-rt} (fator de correção pela retranslocação) = $CUB_{Colheita} / CUB_{floração}$. A necessidade do uso dessa equação justifica-se necessária pela diferença de concentração dos nutrientes nos órgãos fotossintetizantes no momento da floração, comparativamente aos observados na colheita (senescência). Esse fator de correção pela retranslocação foi feito considerando como nutrientes móveis na planta o N, P, K e Mg. Posteriormente foi feito o cálculo das frações de partição de mMS (fpmMS) por compartimento, com respeito ao total da mMS acumulada pela planta: $fpmMS = mMS_j / \Sigma mMS$, sendo que mMS_j = massa de matéria seca produzida pelo compartimento j em $kg\ ha^{-1}$ e ΣmMS = somatória da massa da matéria seca produzida pela totalidade dos compartimentos em $kg\ ha^{-1}$ (Tabela 3).

Tabela 3 - Coeficientes de Utilização Biológica (CUB), para a produtividade de $3000\ kg\ ha^{-1}$, por compartimento na cultura do feijão, empregados no Ferticalc-Feijão.

Macronutrientes						
	----- $g\ kg^{-1}$ -----					
	CUB_N	CUB_P	CUB_K	CUB_Ca	CUB_Mg	CUB_S
Raízes	70,92	357,14	69,93	400,00	476,19	344,83
Folhas	28,57	222,22	33,10	66,67	222,22	332,23
Caule	67,07	421,94	22,54	174,83	429,18	418,41
Grãos	36,60	256,41	57,70	357,14	495,05	649,35
Micronutrientes						
	----- $mg\ kg^{-1}$ -----					
	CUB_Fe	CUB_Mn	CUB_B	CUB_Cu	CUB_Zn	
Raízes	6,25	4,93	12,20	250,00	31,25	
Folhas	3,33	16,54	36,38	103,09	34,33	
Caule	9,98	55,87	42,52	122,85	48,08	
Grãos	17,69	101,94	87,34	118,48	38,43	

A mMS_{tot} é a massa da matéria seca total produzida pela planta em $kg\ ha^{-1}$ e é obtida matematicamente, a partir da produtividade desejada e os valores de $fpmMS$ obtidos anteriormente ($fpmMS = mMS_j / \Sigma mMS$): $mMS_{tot} = fpmMS * (100 / mMS_g)$. Nesse caso, $fpmMS$ são as frações de partição de mMS e mMS_g é a massa da matéria seca dos grãos. Assim, com estes dois valores, foi calculada a massa da matéria seca dos compartimentos (j) mMS_j em todas as produtividades avaliadas pelo Ferticalc-Feijão (1,0 a 4,0 $t\ ha^{-1}$) (Tabela 4), com a seguinte equação: $mMS_j = mMS_{tot} * fpmMS$.

A demanda da planta (d) é obtida multiplicando-se a mMS_j pelo CUB, sendo que $dNu_{ij} = CUB_{ij} * mMS_j$. Em que, dNu_{ij} = demanda do nutriente i no compartimento j em $kg\ ha^{-1}$; CUB_{ij} = coeficiente de utilização biológica do nutriente i no compartimento j em $kg\ kg^{-1}$ para macronutrientes e $kg\ g^{-1}$ para micronutrientes; mMS_j : massa da matéria seca no compartimento j em $kg\ ha^{-1}$. Depois disto, foi feito o somatório das demandas individuais de todos os compartimentos para obter a demanda total da planta.

Tabela 4 - Produções de massa de matéria seca (mMS) e partições de mMS consideradas para cada um dos compartimentos e produtividades avaliadas no Ferticalc-Feijão.

Prod. $kg\ ha^{-1}$	Teor umidade (%)	mMS_r	mMS_c	mMS_f	mMS_g
1000	13 %	387,05	559,15	215,07	870,00
1500	13 %	572,53	827,10	318,13	1305,00
2000	13 %	752,64	1087,30	418,21	1740,00
2500	13 %	927,39	1339,75	515,31	2175,00
3000	13 %	1096,77	1584,44	609,43	2610,00
3500	13 %	1260,79	1821,39	700,57	3045,00
4000	13 %	1419,45	2050,60	788,72	3480,00

mMS_g = massa de matéria seca de grãos = $Prod * (1 - \text{teor de umidade})$; $RELMSVEGMMSG$ = relação massa de matéria seca de parte vegetativa e massa de matéria seca de grãos = $1.371783 - 0.000037 * Prod$; $MSVEG$ = massa de matéria seca da parte vegetativa = $RELMSVEGMSPTO * mMS_g$; mMS_r = massa da matéria seca de raízes = $0.3333 * MSVEG$; mMS_c = massa da matéria seca de caule = $0.4815 * MSVEG$; mMS_f = massa da matéria seca de folhas = $0.1852 * MSVEG$.

Posteriormente a demanda foi dividida pela taxa de recuperação da planta, que é específica para cada um dos nutrientes: $rqNu_i = dNu_i / trNu_i_PI$, sendo que $rqNu_i$ = requerimento do nutriente i pela planta; dNu_i = demanda do nutriente i e $trNu_i_PI$ é a taxa de recuperação do nutriente i pela planta (Tabela 5). As taxas foram ajustadas de outros modelos Ferticalc, considerando valores finais coerentes com as necessidades do feijão (Tabela 5).

Tabela 5. Taxas de recuperação dos nutrientes pela planta, utilizados no Ferticalc- Feijão, baseadas no P-rem ou produtividade.

Elemento	Equações para estimar a $trNu_i_{PI}$
Rec_N	$= 70,419674e^{-0.0016607*Prod} + (7.6*2)/100$
Rec_P ¹	$= (17,7e^{0,0347*Prem})/100$
Rec_S ¹	$= (66.67 - 0.2678*Prod)/100$
Rec_Zn ²	$= (4.11+0.0775*Prem)/100$
Rec_K ²	$= 24.067 + 0.228*Prem - 0,176*Prod/100$
Rec_Ca ³	$= (85,6955e^{-0.002155*Prod})/100$
Rec_Mg ²	$= (50,0 - 0,2666*Prod)/100$
Rec_B ²	$= 5,282755/(1 - 0,82839397e^{-0.34760374*Prod})/100$
Rec_Fe ²	$= 0,05$
Rec_Mn ²	$= 0,05$
Rec_Cu ²	$= 0,05$

b) Requerimento de sustentabilidade

Dentro das opções proporcionadas para o usuário está adicionar uma dose para o requerimento de sustentabilidade $rqNu_i_{Sust}$, ao requerimento total da planta.

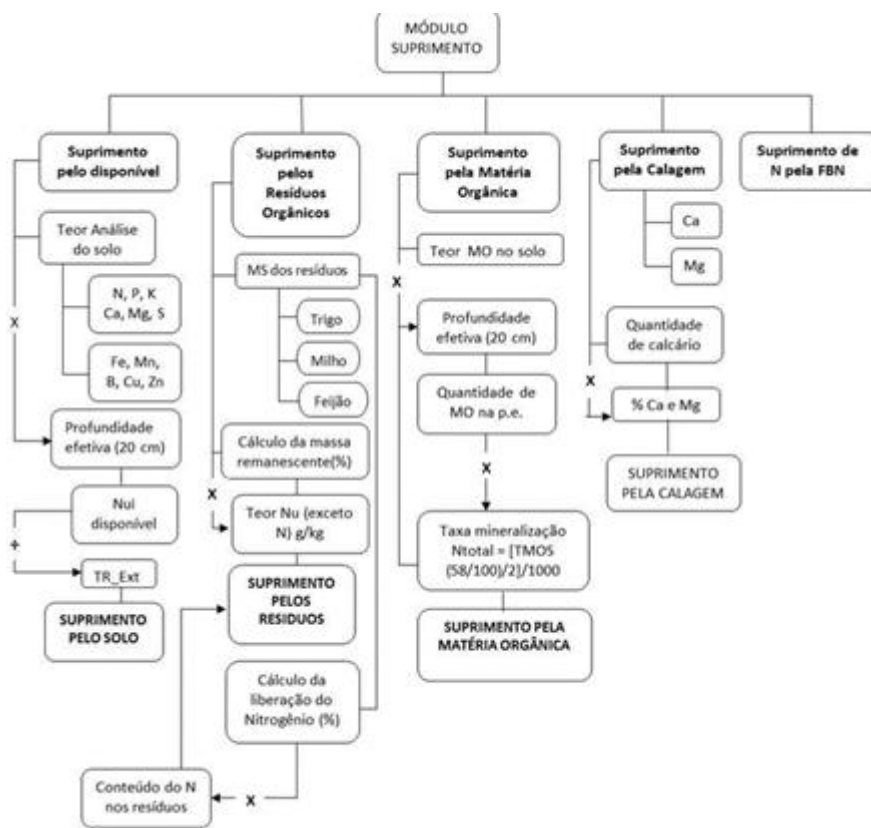
Nesta versão do Ferticalc-Feijão esta dose adicional foi determinada para P, K e S, pois de acordo com a dinâmica desses nutrientes no solo, o fato de ficar disponíveis para o futuro, acrescentando a fertilidade atual do solo, é viável.

O critério utilizado como sustentabilidade foi acrescentar à dose recomendada, uma quantidade de nutrientes no solo, suficiente para obter uma produtividade mínima, de 1000 kg ha⁻¹, sendo, $rqSus_Nui = dNui/trNui_{PI}$. Nessa caso, $rqSus_Nui$ = requerimento de sustentabilidade do nutriente i (P, K e S); $dNui_t$ = demanda do nutriente i pela planta para produzir 1000 kg ha⁻¹ de grãos e $trNui_{PI}$ = taxa de recuperação do nutriente i pela planta.

3.2.2 Módulo Suprimento

Este módulo compreende os nutrientes que serão disponibilizados para ser absorvidos pela cultura durante o ciclo de desenvolvimento (Figura 2).

Figura 2. Diagrama: cálculos do módulo suprimento para o desenvolvimento do Ferticalc-Feijão.



Consideraram-se cinco tipos de fontes e matematicamente pode ser expresso como segue: $SuN_{ui} = suSol + suROrg + suMOS + suCal + SuFBN$. Considera-se suN_{ui} = suprimento do nutriente i em $kg\ ha^{-1}$; $suSol$ = suprimento pelas formas disponíveis dos elementos no solo; $suROrg$ = suprimento pelos resíduos orgânicos do feijão ou de outras culturas que sejam utilizadas para fazer rotação/sucessão com o feijão; $suMOS$ = suprimento do N pela matéria orgânica do solo; $suCal$ = suprimento de Ca e Mg pela calagem e $SuFBN$ = suprimento de N pela fixação biológica do N.

Foram considerados todos os tipos de suprimentos que podem ser contabilizados dentro do sistema solo-planta. Dentro dos resíduos orgânicos foram avaliados os do milho, que é cultura mais comumente utilizada para fazer rotação/sucessão com feijão. No caso do suN_{ui_MOS} foi contabilizado como suprimento só para N, tendo em vista que apenas a estimativa da quantidade disponível desse nutriente que está disponível na literatura.

a) Suprimento pelo solo

Para determinar a capacidade de suprimento disponível no solo (suN_{ui_Sol}), foram utilizados dados de análises do solo para cada um dos macro e micronutrientes, que divididos pelas respectivas trN_{ui_Ext} , fornecem informação da quantidade do elemento disponível em $kg\ ha^{-1}$. Foram utilizadas

análises de um banco de dados do IDR-Paraná de áreas produtoras de feijão, com características diferenciais.

No suprimento dos nutrientes pelo solo para o Ferticalc-Feijão, foi considerada a camada 0–20 cm, que corresponde à profundidade efetiva para a cultura. O fornecimento foi expresso pela equação: $suSol = (tNu_i/trNu_i_Ext)*PER$, sendo que $suSol$ = suprimento pelo solo, que é o teor do nutriente i determinado pelo análise de solo, exceto para o N; tNu_i = teor do nutriente i no solo na camada 0-20 cm em $mg\ dm^{-3}$; $trNu_i_Ext$ = taxa de recuperação do nutriente pelo extrator e PER = profundidade radicular efetiva do feijão, em dm. Foram utilizadas as taxas de recuperação dos extratores propostas por Possamai (2003) e Santos et al. (2008)

O suprimento de nutrientes obtido da análise precisa de ser dividido pela $trNui_Ext$, pois para extrair do solo a quantidade disponível de um nutriente, cada extrator possui uma taxa específica nos métodos analíticos.

No Ferticalc-Feijão foi utilizado o extrator Mehlich-1 para P, K, Fe, Mn, Cu e Zn. Para o Ca, Mg, e B foram utilizadas taxas fixas, seguindo o critério de que os mesmos, sofrem baixa influência do poder tampão, conforme Deus (2012).

b) Suprimento pelos resíduos orgânicos

O suprimento pelos resíduos orgânicos $suNu_i_ROrg$, foi feito para milho (*Zea mays*), considerando como possibilidades de rotação/sucessão da cultura. Utilizou-se como referência o teor de nutrientes e a mMS de milho (COSTA et al., 2008). Para isto, a massa da matéria seca dos restos culturais ficam na área avaliada (mMS_Res) são contabilizadas, e utilizando a taxa de mineralização ($txMin_Nu_i$) foi calculada a quantidade de massa que vai ser decomposta após 50 d, que é o tempo aproximado médio de finalização da floração do feijoeiro, com a equação: $suNu_i_ROrg = mMS_Res \times tNu_i_MS \times txMin_Rorg$. Após esse período a absorção da maioria dos nutrientes diminui na cultura do feijão, conforme Vieira (2006). Esse resultado foi multiplicando pelo teor do nutriente no resíduo decomposto (tNu_i_MS), obtendo-se o suprimento pelos resíduos orgânicos e a taxa de mineralização ($txMin_Rorg$).

c) Suprimento pela matéria orgânica

O suprimento pela matéria orgânica $suNu_i_MOS$, foi considerado só para nitrogênio, para obtê-lo se multiplica o teor de MOS, pela profundidade efetiva (20 cm para feijão). Isso representa a quantidade de matéria orgânica disponível na profundidade considerada, que multiplicada pela taxa

de mineralização do N para 50 d, proporcionou a quantidade de N que estaria disponível.

Assim, de acordo com o critério utilizado no Ferticalc-Abacaxi (Silva, 2006), foi calculado o suprimento de N pelo solo, baseado na equação de cinética adaptada para os solos brasileiros (PARENTONI et al., 1988): $\text{suMOS} = (\text{mSol} * \text{Ntot} * 1,48/100) * e^{0,006t}$. Considera-se suMOS = suprimento de N pela matéria orgânica do solo durante o ciclo do feijão, em kg ha^{-1} ; mSol = massa de solo na camada delimitada pela profundidade efetiva do sistema radicular do feijão em kg ha^{-1} (considerando um hectare, com profundidade de 20 cm e a densidade atual do solo); 1,48 = fração do N potencialmente mineralizável a partir do N total, em %; t = tempo de absorção de N pela cultura, em dias (50 dias) e Ntot = N total do solo, em kg kg^{-1} de solo. Esse N total foi calculado pela seguinte equação: $\text{Ntot} = [\text{tMOS} (58/100)/2]/1000$. Considera-se que tMOS é o teor de matéria orgânica do solo, em %; 58/100 = assumindo 58 % da matéria orgânica são compostos de carbono (Tomé e Novais, 2000) e 2 = profundidade efetiva em dm; 1000: fator de conversão para kg ha^{-1} .

d) Suprimento pela Calagem

Foi considerada também a calagem para o suprimento de Ca e Mg (suNu_iCal), que é obtido multiplicando as percentagens de Ca e Mg na quantidade de calcário da que o solo precisa, da forma como foi mencionada no item da calagem. Foi considerado como exemplo um calcário com 380 g kg^{-1} de CaO e 120 g kg^{-1} de MgO e PRNT de 85 %.

e) Suprimento de N pela fixação biológica do nitrogênio (FBN)

Segundo Tsai et al. (1993), o feijoeiro é capaz de fixar de 20 a 60 kg ha^{-1} N por ciclo cultural. Assim, como suprimento da N pela FBN foi considerada a quantidade média de 40 kg ha^{-1} .

3.3. DOSE RECOMENDADA

Para o cálculo da dose recomendada, o modelo faz um cálculo do balanço para cada um dos elementos, se o balanço do requerimento menos o suprimento for positivo, as fontes dos nutrientes não são suficientes para obter a produtividade desejada, caso seja negativo, o sistema está suprindo uma quantidade maior do que a cultura precisa para seu ciclo de produção. Assim, $\text{drNu}_i = \text{rqNu}_i - \text{suNu}_i$ e drNu_i = dose recomendada do nutriente i para um ciclo de cultivo em kg ha^{-1} ; rqNu_i = requerimento do nutriente i em kg ha^{-1} e suNu_i = suprimento do nutriente i em kg ha^{-1} .

3.4 SIMULAÇÕES NO MODELO

Foram realizadas simulações no modelo Ferticalc-feijão, para três solos com o teor de P-remanescente como característica para diferenciá-los (4, 24 e 40 mg L⁻¹), sendo classificados como textura argilosa, média e arenosa.

Os resultados da recomendação pelo Ferticalc-Feijão foram comparados àqueles do Manual de Adubação e Calagem para o estado do Paraná (SBCS/NEPAR, 2017).

4. ANÁLISES E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 CALAGEM

O cálculo da necessidade de calagem foi realizado para dez solos propostos na Tabela 1 e os resultados encontram-se na Tabela 6. As NCs calculadas variaram de 0 a 6,73 t ha⁻¹ de calcário e a doses recomendadas de calcário variaram de 1,4 a 6,73 t ha⁻¹.

O feijão tem tolerância média à saturação por Al ($m_t = 15\%$). Culturas mais sensíveis suportam somente 5 % e mais tolerantes como o eucalipto até 45 %. Apesar de o feijão ser medianamente tolerante à acidez, os solos do Paraná são predominantemente ácidos e a realização da calagem torna-se uma prática que apresenta uma alta relação custo benefício. Uma das razões da baixa produtividade dessa leguminosa é seu cultivo sem uma adequada correção da acidez do solo.

O modelo está programado para o cálculo pelos dois métodos de recomendação de calagem mais comuns utilizados no Brasil, mas a escolha está sujeita ao critério do usuário. São observados três passos que podem ajudar na tomada da decisão. No primeiro caso, o valor obtido da NC, é comparado com o valor X para o feijão que está em função dos requerimentos pela cultura por Ca e Mg. Ao serem analisados os dados, o método da Neutralização do Al e elevação dos teores Ca e Mg não recomendou calagem para 7 dos 10 solos trabalhados e recomendou pouca quantidade de calcário ($< 1\text{ t ha}^{-1}$), para os outros 3.

Tabela 6. Necessidades de calagem (NC) por dois métodos, necessidade de calagem recomendada, quantidade de calagem (QC) e resultados do cálculo para pH (Δ pH) com a equação de Mello (2000) e pH_{pc} estimada após a aplicação do calcário.

Solo	H+Al			NC (MG) ¹		NC (SP) ²		NCR ³	QC ⁴
	pH _{in.}	cmol _c dm ⁻³	Δ pH	t ha ⁻¹	pH _{pc}	t ha ⁻¹	pH _{pc}	t ha ⁻¹	t ha ⁻¹
1	5,1	4,1	0,34	0,60	5,30	2,42	5,93	2,42	2,69
2	5,3	4,9	0,28	0,00	5,30	2,09	5,89	2,09	2,32
3	5,3	5,0	0,28	0,00	5,30	1,71	5,77	1,71	1,90
4	4,4	14,1	0,10	0,00	4,50	6,73	6,17	6,73	7,47
5	4,9	9,7	0,13	0,94	5,02	6,07	5,69	6,07	6,75
6	5,0	9,7	0,13	0,99	5,13	6,10	5,80	6,10	6,77
7	5,3	8,4	0,15	0,00	5,30	4,21	5,95	4,21	4,68
8	5,2	6,0	0,23	0,00	5,20	2,98	5,87	2,98	3,31
9	5,5	5,0	0,28	0,00	5,50	1,42	5,89	1,42	1,57
10	5,2	6,4	0,21	0,00	5,20	3,66	5,97	3,66	4,06

¹Método da neutralização do Al e elevação dos teores de Ca+Mg do solo; ²Método da saturação por bases; ³ Necessidade de calagem recomendada (NCR), segundo o algoritmo proposto por Stahringer (2013); ⁴ Quantidade de calagem calculada considerando PRNT de 90 %.

Em todos os solos, com excessão do primeiro, os teores de Ca e Mg do solo foram superiores a $X = 2 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ (Ca+Mg). Isso quer dizer que a necessidade desses dois elementos já estava suprida. No caso do solo, teoricamente havia falta de Ca e Mg para o feijão. Segundo o critério I de seleção exposto na metodologia, para esse solo, escolheu-se a necessidade da cultura, ou seja, maior valor de NC.

Para a tomada da decisão entre qual NC utilizar, adicionalmente se considera a elevação do pH obtida em ambos casos (Tabela 6), procurando que o pH_{fn} esteja na faixa adequada para a cultura, que é entre 5,5 a 6. Esse requerimento foi alcançado em todos os solos somente quando utilizado o método da saturação por bases, verificando-se assim a validade das recomendações.

No Paraná, recomenda-se a elevação do índice de saturação em bases para 70 % sempre que esse valor estiver abaixo de 60 % (SBCS/NEPAR, 2017).

4.2. MODELO FERTICALC-FEIJÃO

Requerimento dos nutrientes pela planta

O sistema Ferticalc-Feijão estimou o requerimento rq_{Nui} para a cultura apresentado na Tabela 7. No entanto, os requerimentos não são fixos, pois são o resultado da divisão entre a demanda e o tr_{Nui_Pl} , sendo que estas taxas são igualmente dependentes do valor de P-rem da análise do solo para

os elementos P, K e Zn, ou da produtividade, para os elementos N, Ca, Mg, S e B e para Fe, Mn e Cu são fixas. Para obtê-las, as equações foram obtidas e/ou adaptadas dos outros modelos Ferticalc (Tabela 7).

Tabela 7. Requerimento total de nutrientes pela planta, utilizados no Ferticalc-Feijão, utilizando-se taxas $trNu_i_{Pl}$, calculadas com P-rem de 24 mg L⁻¹.

Prod kg ha ⁻¹	Requerimento										
	rqN	rqP	rqK	rqCa	rqMg	rqS	rqB	rqZn	rqCu	rqMn	rqFe
	kg ha ⁻¹										
1000	55,99	16,63	67,75	20,74	7,41	15,46	0,22	0,89	0,31	2,20	4,28
1500	85,94	24,77	106,23	31,64	11,12	23,27	0,34	1,32	0,46	3,26	6,34
2000	117,19	32,80	147,90	42,89	14,84	31,14	0,46	1,74	0,61	4,29	8,35
2500	149,71	40,71	192,80	54,52	18,56	39,05	0,59	2,16	0,76	5,29	10,31
3000	183,50	48,51	240,99	66,53	22,27	46,99	0,72	2,57	0,90	6,27	12,22
3500	218,53	56,20	292,52	78,93	25,99	54,98	0,86	2,98	1,05	7,22	14,08
4000	254,76	63,76	347,39	91,73	29,70	62,99	1,00	3,38	1,19	8,13	15,89

Suprimento de nutrientes

Pelo Ferticalc-Feijão foram calculados os suprimentos ($suNu_i$) para todas as fontes avaliadas (Tabela 8). Os dados apresentados na tabela 8 foram elaborados considerando-se o suprimento pelos resíduos orgânicos da cultura do milho, devido a que é comum essa sucessão e não são recomendadas sucessões de feijão-feijão e soja-feijão. Os suprimentos foram contabilizados obtendo um valor único, para uma produtividade média da cultura do milho, mas o modelo é aberto a dados reais e específicos.

Tabela 8. Suprimento total dos nutrientes calculado para o solo 2, pelo Ferticalc-Feijão.

Módulo Suprimento											
Prod. t ha ⁻¹	Macronutrientes						Micronutrientes				
	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Zn	Cu	Mn	Fe
	kg ha ⁻¹						kg ha ⁻¹				
suNu _i _ROrg	78,8	11,3	152,7	81,0	13,9	1,1	0,2	0,2	0,1	0,3	2,9
suNu _i _MOS	85,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
suNu _i _Sol	-	78,6	260,7	1660,3	482,9	82,7	1,9	7,5	3,2	240,9	126,4
suNu _i _Cal	-	-	-	494,8	224,7	-	-	-	-	-	-
SuNu _i _FBN	40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	204,3	89,8	413,4	2236,1	721,4	83,9	2,1	7,7	3,4	241,2	129,3

O suprimento de N pela matéria orgânica suN_{MOS} foi de 85,6 kg ha⁻¹ para o solo com P-rem de 24 mg L⁻¹ (muito argiloso). Este valor tem estreita relação com o potencial de mineralização do

solo, assim que quanto maior o aporte de biomassa ao sistema solo, maior será a disponibilidade de N. No caso do feijão, esse aporte do N, não é suficiente para sustentar a cultura com sua respectiva expectativa de produtividade, pois a demanda é alta. Segundo Tsai et al. (1993), o feijoeiro é capaz de fixar de 20 a 60 kg ha⁻¹ N por ciclo cultural. Assim, como suprimento da N pela FBN foi considerada a quantidade média de 40 kg ha⁻¹. Mas, se houver informação mais específica, pode ser utilizada, pois o sistema é aberto.

O solo suNu_i_Sol, supriu uma quantidade boa de nutrientes, comparado com as necessidades da cultura, para todos os nutrientes modelados. Isto é razoável, já que, os teores da análise química do solo utilizado na modelagem apresentar uma fertilidade construída (Solo 2, Tabela 9).

Tabela 9. Características químicas dos solos utilizados para fazer as simulações no Ferticalc- Feijão.

Amostra	P-rem mg L ⁻¹	MO g kg ⁻¹	P mg dm ⁻³	K mg dm ⁻³	Ca cmol _c dm ⁻³	Mg cmol _c dm ⁻³	B -----	Zn -----	Cu -----	Mn -----	Fe -----
1	8	44,1	8,0	0,45	3,1	1,9	0,30	6,8	9,0	99,3	52,4
2	24	35,6	15,6	0,31	3,2	1,6	0,40	1,6	1,3	60,5	31,2
3	40	30,3	28,3	0,29	3,6	2,0	0,20	1,1	7,1	50,3	22,9

Ca, Mg: extrator KCl 1,0 mol L⁻¹; P, K, Cu, Fe, Mn e Zn: extrator Mehlich-1. C: Walkey-Black.

O suprimento pela calagem suNu_i_Cal, forneceu para o solo 2 (Tabela 9), 494,8 kg ha⁻¹ de Ca e 224,7 kg ha⁻¹ de Mg. Assim, a calagem não só age como corretivo da acidez do solo, mas também como fonte destes dois nutrientes. O sistema também leva em consideração a quantidade de CaO e MgO do calcário a ser utilizado. No presente caso, para o solo 2, foi utilizado calcário 380 g kg⁻¹ de CaO e 120 g kg⁻¹ de MgO e PRNT de 85 %.

Balanço nutricional pelo Ferticalc-Feijão

Depois de analisar o sistema solo e planta, foram registradas, e matematicamente obtidas, as quantidades que eventualmente podem ser requeridas ou supridas. Estes dados são necessários para calcular o balanço nutricional para a cultura do feijão em qualquer uma das produtividades avaliadas de 1000 até 4000 kg ha⁻¹ (Tabela 10).

Comparações com outro método de recomendação

Quando a aplicação do nutriente como fertilizante for requerida pela cultura o balanço terá sinal positivo, caso contrário, o resultado é negativo, e consequentemente não é necessário adicionar fertilizantes no solo para sustentar a produtividade.

Tabela 10. Balanço nutricional para a cultura do feijão feito pelo Ferticalc-Feijão para produtividade de 1000 até 4000 kg há⁻¹, num solo com P-rem = 24 mg L⁻¹. Embaixo se apresenta o balanço que inclui o requerimento de sustentabilidade.

Balanço nutricional											
Prod. t ha ⁻¹	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Zn	Cu	Mn	Fe
	kg ha ⁻¹										
1000	-197,8	-101,3	-478,0	-2958,6	-954,0	-93,2	-2,6	-9,3	-4,1	-319,1	-162,8
1500	-157,8	-86,8	-409,6	-2939,2	-947,0	-79,3	-2,4	-8,6	-3,8	-317,2	-159,1
2000	-116,2	-72,5	-335,5	-2919,2	-940,0	-65,3	-2,2	-7,8	-3,6	-315,4	-155,5
2500	-72,8	-58,4	-255,7	-2898,5	-934,0	-51,3	-1,9	-7,1	-3,3	-313,6	-152,0
3000	-27,8	-44,6	-170,0	-2877,2	-927,0	-37,1	-1,7	-6,3	-3,1	-311,9	-148,7
3500	18,9	-30,9	-78,4	-2855,1	-921,0	-22,9	-1,5	-5,6	-2,8	-310,2	-145,3
4000	67,3	-17,5	19,1	-2832,4	-914,0	-8,7	-1,2	-4,9	-2,6	-308,6	-142,1
Balanço Nutricional: Produção + Dose de Sustentabilidade											
Prod. t ha ⁻¹	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Zn	Cu	Mn	Fe
	kg ha ⁻¹										
1000	6,5	-8,7	-51,8	-718,9	-231,0	-7,8	-0,4	-1,4	-0,7	-77,6	-36,4
1500	46,5	3,1	3,8	-703,2	-225,6	3,5	-0,3	-0,8	-0,5	-76,0	-33,4
2000	88,1	14,7	64,0	-686,9	-220,3	14,8	-0,1	-0,2	-0,3	-74,6	-30,5
2500	131,5	26,1	128,9	-670,1	-214,9	26,2	0,1	0,4	-0,1	-73,1	-27,7
3000	176,6	37,4	198,5	-652,8	-209,5	37,7	0,3	1,0	0,1	-71,7	-24,9
3500	223,3	48,5	272,9	-634,9	-204,2	49,3	0,5	1,6	0,4	-70,3	-22,3
4000	271,6	59,4	352,2	-616,4	-198,8	60,8	0,7	2,2	0,6	-69,0	-19,6
Dose recomendada											
Prod. t ha ⁻¹	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Zn	Cu	Mn	Fe
	kg ha ⁻¹										
1000	-197,8	-231,9	-576,1	-2958,6	-954,0	-93,2	-2,6	-9,3	-4,1	-319,1	-162,8
1500	-157,8	-198,7	-493,6	-2939,2	-947,0	-79,3	-2,4	-8,6	-3,8	-317,2	-159,1
2000	-116,2	-166,1	-404,4	-2919,2	-940,0	-65,3	-2,2	-7,8	-3,6	-315,4	-155,5
2500	-72,8	-133,8	-308,2	-2898,5	-934,0	-51,3	-1,9	-7,1	-3,3	-313,6	-152,0
3000	-27,8	-102,1	-204,9	-2877,2	-927,0	-37,1	-1,7	-6,3	-3,1	-311,9	-148,7
3500	18,9	-70,8	-94,5	-2855,1	-921,0	-22,9	-1,5	-5,6	-2,8	-310,2	-145,3
4000	67,3	-40,0	23,0	-2832,4	-914,0	-8,7	-1,2	-4,9	-2,6	-308,6	-142,1

Recomendações de adubação do Ferticalc-Feijão

Para o caso do solo 2, com P-rem = 24 mg L⁻¹, representativo da região Oeste do Paraná o balanço ficou positivo apenas para N, nas produtividades de 3500 e 4000 kg ha⁻¹ de grãos e P apenas na produtividade de 4000 kg ha⁻¹ de grãos, indicando a necessidade de aplicação destes elementos (Tabela 10).

O Manual de Adubação e Calagem para o estado do Paraná (2017) já considera quatro níveis de produtividade esperadas de feijão, divididas de 1000 em 1000 kg ha⁻¹, para definição da dose dos nutrientes. Além disso, obviamente, também leva em consideração os teores de nutrientes no solo, com exceção do N.

Foram calculadas então, as doses de N, P₂O₅ e K₂O, para três solos hipotéticos, variando em função principalmente do P-rem (4, 24 e 40 mg L⁻¹). As características químicas dos solos são apresentadas na Tabela 09 e os resultados dos cálculos de recomendação de adubação são expostos na Tabela 11. Utilizou-se a expectativa de produtividade de 3000 kg ha⁻¹ de grãos de feijão.

Tabela 11. Resultados da recomendação de adubação para três solos utilizando o modelo Ferticalc-Feijão e o Manual de Adubação e Calagem para o estado do Paraná (2017), para uma produção de 3.000 kg ha⁻¹ de grãos.

Nutriente	Solo 1 (P-rem 8)		Solo 2 (P-rem 24)		Solo 3 (P-rem 40)	
	Manual	Ferticalc	Manual	Ferticalc	Manual	Ferticalc
N, kg ha ⁻¹	90	0	90	0	90	0
P ₂ O ₅ , kg ha ⁻¹	110	13	50	0	30	0
K ₂ O, kg ha ⁻¹	30	0	30	0	40	0

Nas situações simuladas, a necessidade de aplicação do N, pelo Manual de Recomendação de Calagem e Adubação para o estado do Paraná foi de 90 kg ha⁻¹. Pelo Ferticalc-Feijão, não houve necessidade de aplicação de N. É razoável que seja diferenciada a dose recomendada pelo Ferticalc-Feijão, pois ele considera fontes adicionais de suprimento, que estão variam de acordo com as características do sistema analisado, em comparação com as tabelas do Manual.

A consideração do teor de matéria orgânica do solo, da ciclagem de restos culturais e da fixação biológica do N (FBN) explica essas diferenças na recomendação. Todos os três solos testados apresentam altos teores de matéria orgânica. Isto significa que, com maior teor de compostos orgânicos mineralizáveis, o suN_MOS é maior.

Adicionalmente, também é possível diferenciar a importância de que as recomendações sejam feitas variando de acordo com a produtividade esperada, pois em todos os casos contemplados, para baixas produtividades a recomendação é menor, e aumenta na faixa 2500 a 4000 kg ha⁻¹. Isto provavelmente porque as trNu_iPI, diminuem com o aumento da produtividade.

O sistema estimou, utilizando os teores de P no solo de 8; 15 e 28 mg dm⁻³, resultando na recomendação de fósforo (Tabela 13). Quando a disponibilidade é muito boa, o Ferticalc-Feijão sugeriu não fazer aplicação de P, o que é discutível desde o ponto de vista da disponibilidade do nutriente para a cultura. No caso do solo com menores teores de P, o manual recomendou 110 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e o Ferticalc-Feijão sugeriu 13 kg ha⁻¹ de P₂O₅.

Para o K, a recomendação em todos os casos analisados é de que não há necessidade de aplicação desse elemento pelo Ferticalc-Feijão e pelo Manual, de 30 a 40 kg ha⁻¹ de K₂O. Foram utilizados os teores no solo de 113, 121 e 176 mg dm⁻³, obtendo recomendações variando de acordo com estes valores. Segundo os dados fornecidos pelo Ferticalc-Feijão, o nível crítico no solo para produtividade de 3000 kg ha⁻¹, deve ser de 98,7 mg dm⁻³. Dessa forma, verifica-se que em todos os solos avaliados o teor de K estava acima do nível crítico.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O modelo Ferticalc-Feijão, pode ser considerado como uma aproximação que melhora a exatidão das doses recomendações de adubos para esta cultura. A maior exatidão no cálculo das doses aumenta a eficiência do investimento feito pelo usuário, utilizando as quantidades de fertilizante que a cultura realmente precisa.

O Ferticalc-Feijão está baseado no uso de múltiplas informações do sistema solo-planta, como as quantidades de micronutrientes, ou o cálculo de fontes de suprimento diferentes aos teores no solo, porém, o sistema tradicional é o produto de anos de pesquisa, mas com maior utilização e validação, o modelo proposto poderá substituir totalmente o uso de tabelas.

Em todos os casos analisados o Ferticalc-Feijão recomendou doses menores, possivelmente as tabelas do Manual de Recomendação de Calagem e Adubação para o estado do Paraná estejam superestimando as quantidades que devem ser aplicadas, no entanto, esta hipótese deve ser confirmada em futuras pesquisas.

O desenvolvimento do Ferticalc-Feijão, permitiu conhecer vazios na pesquisa dirigida para o feijão, pois não foi possível fazer estratificação nenhuma das recomendações do modelo, pela carência de informações.

Após as simulações, experimentos estão sendo conduzidos no campo para validação do modelo para desenvolvimento de um aplicativo Ferticalc-Feijão para recomendação de calagem e adubação para a cultura do feijão.

REFERÊNCIAS

ALVAREZ V., V. H.; RIBEIRO, A. C. Calagem. *In*: GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V., V. H. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**: 5.a. aproximação. Viçosa, MG: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais. 1999. p.43-60.

ALVAREZ V., V. H.; SANTOS, A. F.; SANTOS, G. L.; MATTA, P. M. Fertilização de plantas ornamentais: método requerimento-suprimento: proposição de técnica experimental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa - MG, v. 38, p. 532-543, 2014.

BEEGLE, D. Assesing soil phosphorus for crop production by soil testing. *In*: SIMS, J. T.; SHARPLEY, A. N. **Phosphorus: Agriculture and the environment**. Modison: Soil Science Society of America, 2005. p.123-144.

CANTARUTTI, R. B.; BARROS, N. F.; MARTINEZ, H. E. P.; NOVAIS, R. F. Avaliação da fertilidade do solo e recomendação de fertilizantes. *In*: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V., V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. L. C. **Fertilidade do solo**. Viçosa - MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 2007. p .645-737.

CARVALHO, F. T. **Sistema de interpretação de análise de solo para recomendação de corretivos e fertilizantes para a cultura do milho**. 2000. 93 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2000.

COMISSÃO TÉCNICA SUL-BRASILEIRA DE FEIJÃO. **Informações técnicas para o cultivo de feijão na Região Sul brasileira**. Florianópolis: EPAGRI, 2010. 164p.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. In: **Acompanhamento da safra brasileira grãos safra 2024/25**: 11º levantamento. Brasília, DF, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/informacoes-agropecuarias/safras/safra-de-graos/boletim-da-safra-de-graos/11o-levantamento-safra-2024-25/e-book_boletim-de-safras-11o-levantamento-2025.pdf>. Acesso em: 15 set. 2025.

DEUS, J. A. **Sistema de recomendação de adubos e fertilizantes para o meloeiro com base no balanço nutricional**. 2012. 123 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.

GALLO, J. R.; MIYASAKA, S. Composição química do feijoeiro e absorção de elementos nutritivos, do florescimento à maturação. **Bragantia**, v.20, p.867-884, 1961.

HAAG, H. P.; MALAVOLTA, E.; GARGANTINI, H.; BLANCO, H. G. Absorção de nutrientes pela cultura do feijoeiro. **Bragantia**, v.26, p. 381-391, 1967.

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

MAPA – Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento. In: **PORTARIA SPA/MAPA Nº 15, DE 01 DE ABRIL DE 2024**. Brasília, DF, 2024. Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/riscos-seguro/programa-nacional-de-zoneamento-agricola-de-risco-climatico/portarias/2024-2025/para-pa/PORTN15FEIJO1SAFRAPA.ret.pdf>>. Acessado em: 10 set. 2025.

MORAES, J. F. V. Calagem e adubação. In: ZIMMERMANN, M. J. O.; ROCHA, M.; YAMADA, T. **Cultura do feijoeiro**: fatores que afetam produtividade. Piracicaba: Potafos, 1988. p.260-301.

OLIVEIRA, F. H. T.; NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; CANTARUTTI, R. B. Desenvolvimento de um sistema para recomendação de adubação para a cultura da bananeira. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa - MG, v.29, p.131-143, 2005.

OLIVEIRA, E. L. **Sugestão de adubação e calagem para culturas de interesse econômico no Estado do Paraná**. Londrina: IAPAR, 2003. 30p.

PARENTONI, S. N.; FRANÇA, G. E.; BAHIA FILHO, A. F. C. Avaliação dos conceitos de quantidade e intensidade de mineralização de nitrogênio para trinta solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa - MG, v.12, p.225- 229, 1988.

PARRA, M. S.; HOEPFNER, M. A; VOSS, M. Adubação do feijão no Estado do Paraná. In: **Cultura do feijão no estado do Paraná**. Londrina: IAPAR, 1980. p.33-45. (Circular, 18).

POSSAMAI, J. M. **Sistema de recomendação de corretivos e fertilizantes para o cultivo do algodoeiro**. 2003. 91 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2003.

RAFAELLI, V. **Sistema de interpretação de análise de solo e de recomendação de nutrientes para arroz Irrigado**. 2000. 76 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2000.

RAIJ, V. B.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. **Recomendações de Adubação e Calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: Instituto Agrônomo, 1996. 285p. (IAC. Boletim Técnico, 100).

RAMIREZ, D. P. U. **Modelo para recomendação de corretivos e fertilizantes para a cultura da batata (*Solanum tuberosum*) com base no balanço nutricional**. 2015. 79 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2015.

ROSA, G. N. **Sistema de recomendação de corretivos e fertilizantes para a cultura do coqueiro**. 2002. 76 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2002.

SANTOS F. C.; NEVES, J. C. L.; NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; SEDIYAMA, C. S. Modelagem da recomendação de corretivos e fertilizantes para a cultura da soja. **Revista Brasileira da Ciência do Solo**, v. 32, p. 1661-1674, 2008.

SANTOS, A. F. **Nutrição e fertilização de orquídeas in vitro e em vaso**. 2014. 133 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2014.

SANTOS, F.C. **Sistema de recomendação de corretivos e fertilizantes para a cultura da soja**. 2002. 100 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2002.

SANTOS, H. Q. **Sistema para cálculo do balanço de nutrientes e recomendação de calagem e adubação de pastagem para bovinos de corte**. 2003. 138 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2003.

SILVA, A. P. **Sistema de recomendação de fertilidade e corretivos para a cultura do abacaxizeiro**. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006. 169 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO / NÚCLEO PARANAENSE DE CIÊNCIA DO SOLO. **Manual de adubação e calagem para o Estado do Paraná**. 1. ed. Curitiba: SBCS/NEPAR, 2017. v. 1. 482p.

STAHRRINGER, N. I. **Sistema de recomendação de corretivos e fertilizantes para a cultura da laranja (Ferticalc-Laranja) com base no balanço nutricional**. 2013. 135 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013.

TOMÉ, J. B.; NOVAIS, R.F. **Utilização de modelos como alternativas às tabelas de recomendação de adubação.** Boletim informativo da Sociedade Brasileira da Ciência do Solo, Viçosa - MG, v. 25, p.8-11,2000.

TSAI, S. M.; BONETTI, R.; AGBALA, S. M.; ROSSETO, R. Minimizing the effect of mineral nitrogen on biological nitrogen fixation in common bean by increasing nutrient levels. **Plant Soil**, v.152, p.131-138, 1993.

VIEIRA, N. M. B. **Crescimento e marcha de absorção de nutrientes no feijoeiro cvs. BRS MG Talismã e Ouro Negro, em plantio direto e convencional.** 2006. 151 f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2006.