

SATURAÇÃO POR BASES PARA O CAFEIRO BASEADA NO pH DO SOLO E NO SUPRIMENTO DE Ca E Mg

André Guarçoni

(Recebido: 19 de agosto de 2016; aceito: 21 de novembro de 2016)

RESUMO: O método da saturação por bases, utilizado para determinação da necessidade de calagem (NC), pode gerar doses inadequadas, uma vez que a saturação por bases esperada (V_e) é fixa, independentemente do tipo de solo. O objetivo do trabalho foi estabelecer valores adequados de saturação por bases esperada (V_e) para os cafeeiros arábica e conilon decorrentes da relação existente entre essa característica, o pH e o suprimento de Ca e Mg para as plantas, em solos com diferentes classes de CTC pH 7,0 (T). Foram analisadas quimicamente 599 amostras de solos sob café, sendo determinadas suas características químicas. Foi realizada análise de correlação linear e selecionadas equações que melhor representassem a relação entre o pH e V. Foram estimadas saturações por bases que estariam relacionadas a valores de pH sugeridos para os cafês arábica e conilon, bem como ao suprimento adequado de Ca e Mg, considerando solos com CTC pH 7,0 classificada como baixa, média ou boa. A relação existente entre pH do solo e V não é linear. Para um mesmo pH, o valor de V varia de acordo com a CTC pH 7,0 do solo. Foram estabelecidas distintas equações que relacionam pH e V, considerando a classe de CTC pH 7,0. Recomendam-se os seguintes valores de saturação por bases esperada (V_e) para o cafeeiro, de acordo com a classe de CTC pH 7,0 do solo (T): $V_e = 90\%$ (T baixa: $TBa \leq 4,30 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), $V_e = 70\%$ (T média: $4,30 < TM \leq 8,60 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) e $V_e = 60\%$ (T boa: $8,60 < TBo \leq 15,00 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$).

Termos para indexação: Calcário, recomendação, cálcio, magnésio.

BASE SATURATION FOR COFFEE PLANTATIONS ESTABLISHED ACCORDING TO SOIL pH AND Ca AND Mg SUPPLY

ABSTRACT: The base saturation method (BSat), used to determining lime requirement (LR), may produce inadequate doses, since the expected base saturation (V_e) is fix, independently of the soil type. The aim of this work was to determine adequate expected base saturation (V_e) for the Arabica and Conilon coffee according to relationship between this characteristic, pH and Ca and Mg supply for the plants, in soils with different classes of cation-exchange capacity at pH 7 (T). Several chemical characteristics of 599 soil samples collected under coffee plantations were analyzed. Linear correlation analysis was performed, and selecting equations that best represent the relationship between pH and V. Base saturations were estimated that would be related to suggested pH values for the arabica and conilon coffees, as well as the adequate supply of Ca and Mg, considering soils with low, medium or good T. The relationship between pH and V was not linear. Take into account the same soil pH, V changing accordingly to T. It was recommended the following V_e values for coffee plantations, according to T classes: $V_e = 90\%$ (for low T: $TL \leq 4,30 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), $V_e = 70\%$ (for medium T: $4,30 < TM \leq 8,60 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) and $V_e = 60\%$ (for good T: $8,60 < TG \leq 15,00 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$).

Index terms: Lime, recommendation, calcium, magnesium.

1 INTRODUÇÃO

Os solos intemperizados, como os presentes na maioria das regiões onde se cultiva o café no Brasil, apresentam, em sua condição natural, elevada acidez e baixas concentrações de nutrientes disponíveis para as plantas. Dessa forma, caso não sejam aplicadas quantidades suficientes de corretivos e fertilizantes ao solo, a obtenção de baixas produtividades é uma consequência mais do que óbvia.

A aplicação de calcário é a técnica mais adequada e econômica para corrigir a acidez dos solos, elevando seu pH, reduzindo a toxidez de elementos químicos como o Al^{3+} e aumentando diretamente os teores no solo dos nutrientes Ca e Mg (ANJOS; SOBRAL; LIMA JÚNIOR, 2011; MACHADO et al., 2014; PREZOTTI; GUARÇONI, 2013; SOUZA; MIRANDA; OLIVEIRA, 2007).

A calagem, que nada mais é do que a ação de aplicar calcário ao solo, seja de forma incorporada ou em superfície, melhora, como consequência da redução na acidez, suas características químicas e propriedades, aumentando a disponibilidade de nitrogênio, de fósforo e de potássio, a CTC efetiva (t), a atividade de microrganismos e a colonização micorrízica (ARANTES; LAVORENTI; TORNISIELO, 2007; BRIEDIS et al., 2012; GUARÇONI; MENDONÇA, 2003; NOGUEIRA et al., 2013; SCHNEIDER et al., 2011; SILVA et al., 2007).

Por outro lado, se aplicado em excesso, o calcário pode ocasionar aumento da densidade do solo e do teor de argila dispersa em água, com conseqüente redução da macro e da microporosidade (SPERA et al., 2008), além de reduzir a disponibilidade de micronutrientes metálicos (MELO et al., 2011).

¹Instituto Capixaba de Pesquisa - Assistência Técnica e Extensão Rural / INCAPER- BR 262, Km 94 - CRDR - Centro Serrano Venda Nova do Imigrante - ES - 29.375-000 guarconi@incaper.es.gov.br

A calagem é, nesse contexto, uma tecnologia fundamental para que as plantas consigam expressar seu potencial produtivo, alcançando produtividades que tornem seu cultivo cada vez mais econômico e rentável (NATALE et al., 2012). Entretanto, a necessidade de calagem (NC), que se traduz na quantidade de calcário (PRNT 100%) a ser aplicada na superfície de um hectare (10.000 m²) e incorporada até 0,20 m de profundidade no solo (SOUZA; MIRANDA; OLIVEIRA, 2007), deve ser estimada de forma criteriosa. Caso o método escolhido para determinação da NC não seja adequado à situação prática em questão, podem ser aplicadas doses insuficientes ou, pior, excessivas, que, de uma forma ou de outra, irão acarretar queda na produtividade das lavouras em relação ao seu potencial produtivo.

Dentre os métodos utilizados no Brasil para determinação da NC, o método da Saturação por Bases (SatB) (RAIJ et al., 1983) é um dos mais difundidos, empregando-se a seguinte fórmula de cálculo: $NC = (Ve - Va) T/100$. Esse método tem seu princípio de recomendação baseado na relação existente entre a saturação por bases (V) e a acidez ativa dos solos, expressa, na maioria das vezes, por meio do pH em água (1:2,5). Essa relação é conhecida há mais de 60 anos, sendo apresentada por Catani e Gallo (1955) e discutida detalhadamente por Raij, Sacchetto e Igue (1968).

Mesmo com a modificação das propriedades dos solos pela agricultura cada vez mais intensiva, trabalhos mais recentes, como o de Batista et al. (2015), continuam demonstrando que a calagem promove aumentos proporcionais nos valores de V e do pH do solo. Todavia, a intensidade de correlação entre essas variáveis pode variar de acordo com o tipo de solo que recebeu a calagem, como descrito por Corrêa et al. (2007), Nicolodi, Anghinoni e Gianello (2008), Raij, Sacchetto e Igue (1968), Silva et al. (2007), Souza et al. (1989) e Vasconcelos, Santana e Ferreira (1994).

No método SatB, ao se propor o alcance de uma definida saturação por bases para o solo (V esperada ou V_e), pretende-se atingir níveis de pH que favoreçam o bom desenvolvimento radicular e a adequada disponibilização de nutrientes, além de fornecer Ca e Mg em quantidades suficientes, visando alcançar elevadas produtividades das culturas de interesse. Entretanto, essa não é uma relação de causa e efeito direta, ou seja, o pH não varia diretamente em função da V, ambos variam proporcionalmente de acordo com a quantidade de calcário aplicada, como reportado por Silva et al. (2007).

Tanto a V quanto o pH são características do solo variáveis e dependentes, nesse contexto, da calagem. Para que se eleve a V do solo de forma consistente, deve-se aplicar, além dos cátions básicos (Ca, Mg, K e até mesmo Na), uma fonte geradora de hidroxila para o meio, como carbonato ou silicato. Portanto, para que sejam recomendadas doses adequadas de calcário, utilizando-se o método SatB, deve-se conhecer a estimativa da relação existente entre esta característica e o pH, que, indubitavelmente, não é a mesma para todos os tipos de solo.

Os valores de V a serem alcançados com a calagem são definidos pela pesquisa para diversas culturas, denominando-os como V_2 ou mais explicitamente como V_e , ou seja, a saturação por bases esperada para as culturas de interesse. Como são variáveis positivamente correlacionadas, dependentes da calagem, espera-se que o pH dos solos aumentem proporcionalmente e concomitantemente à V. O problema é que, para determinada V_e , o valor de pH alcançado a partir da calagem é muito variável em função do tipo de solo, como reportado por diversos autores que elaboraram equações que correlacionavam pH e V, partindo de Catani e Gallo (1955) e prosseguindo, dentre outros, com Faquin et al. (1998), Nicolodi, Anghinoni e Gianello (2008), Raij, Sacchetto e Igue (1968), Silva et al. (2007), Souza et al. (1989) e Vasconcelos, Santana e Ferreira (1994). Todas essas estimativas, que geraram diferentes equações para a relação existente entre pH e V, revelam a dificuldade em se definir um valor único de V_e para uma mesma cultura em diferentes tipos de solo.

Para o café, o valor de V_e mais aceito é o de 60 % (ALVAREZ V.; RIBEIRO, 1999), mas este pode ser adequado ou não, de acordo com o solo no qual a cultura é implantada. Há, portanto, necessidade de se avançar ainda mais neste pormenor, uma vez que, apesar de um pouco esquecido atualmente, este é um tema que ainda carece de respostas mais abrangentes.

O objetivo do presente trabalho foi estabelecer valores adequados de saturação por bases esperada (V_e) para os cafeeiros arábica e conilon decorrentes da relação existente entre essa característica, o pH e o suprimento de Ca e Mg para as plantas, em solos com diferentes classes de CTC pH 7,0 (T).

2 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi desenvolvido utilizando-se banco de dados com resultados de análises químicas de 599 amostras de solos sob café, localizados

em diversas regiões do estado de Minas Gerais. Foram determinadas características de acidez, formas disponíveis e trocáveis de nutrientes, teor de matéria orgânica (MO) e propriedades derivadas, sendo utilizados os seguintes métodos de análise descritos por Defelipo e Ribeiro (1997): pH (H₂O) 1:2,5; Matéria Orgânica, oxidação com dicromato de potássio, Walkley-Black; P e K, Mehlich-1; Ca²⁺, Mg²⁺ e Al³⁺, KCl 1,0 mol L⁻¹; H+Al e CTC pH 7 (T), extrator Ca(OAc)₂ 0,5 mol L⁻¹pH 7,0.

Foram calculados os limites mínimo e máximo, a média, a mediana, o desvio padrão e o coeficiente de variação das características químicas determinadas nas 599 amostras de solos sob café. Foi realizada análise de correlação linear simples (Pearson) entre os valores das características químicas dos solos. Posteriormente, foram selecionadas equações que melhor representassem as correlações significativas de elevada magnitude ($r \geq 0,75$) entre o pH e as demais características químicas determinadas.

Os solos foram agrupados, então, de acordo com a classe de CTC pH 7,0 (T), sendo calculadas novas correlações, mas desta feita apenas entre o pH e a saturação por bases (V). Foram selecionadas, novamente, equações que representassem as correlações significativas e de elevada magnitude ($r \geq 0,75$). Estas foram comparadas com as equações obtidas por outros autores, para solos com as mesmas faixas de CTC pH 7,0; visando aferir as relações existentes entre os valores de pH e de V para cada situação.

Considerando os valores de pH do solo sugeridos para a cultura do café (entre 5,8 e 6,0), definidos em manuais de recomendação para os cafés arábica e conilon (GUIMARÃES et al., 1999; PREZOTTI et al., 2007) e corroborados em trabalhos de campo (EFFGEN et al., 2008; SILVA et al., 2004), foram estimados valores de V esperada (Ve) a serem utilizados no método SatB[NC = (Ve - Va) T/100] (RAIJ et al., 1983), para solos agrupados de acordo com a classe de T. Com estes valores, foi determinada a necessidade de calagem pelo método SatB para cada uma das 599 amostras de solos, comparando as doses recomendadas com a necessidade de Ca+Mg proposta por Alvarez e Ribeiro (1999) para a cultura do café.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise estatística das características químicas determinadas nas 599 amostras de solos demonstrou a amplitude do banco de dados

utilizado, explicitada pelos valores mínimos e máximos e pelos coeficientes de variação (CV) (Tabela 1).

A variabilidade das características químicas é uma consequência dos diferentes solos e dos diversos tipos de manejo representados por estas amostras, demonstrando que a cafeicultura é realizada em situações completamente heterogêneas, mesmo considerando a amostra irrisória em relação ao número total de lavouras produtivas.

A única característica química dos solos que apresentou correlação significativa e de elevada magnitude ($\geq 0,75$) com o pH foi a saturação por bases (V), com coeficiente de correlação igual a 0,80; significativo a 0,1% de probabilidade ($r = 0,80^{***}$). Esta relação já foi observada em diversos trabalhos, como os de Corrêa et al. (2007), Faquin et al. (1998), Nicolodi, Anghinoni e Gianello (2008), Raij, Sacchetto e Igue (1968), Silva et al. (2007), Souza et al. (1989) e Vasconcelos, Santana e Ferreira (1994), mas com magnitudes diferentes, e maior intensidade de correlação em algumas situações específicas.

Foram testados outros modelos preditivos para esta relação, via regressão, além do modelo linear. O modelo que mais se ajustou aos dados foi o modelo raiz quadrático (Figura 1). Por este modelo, pode-se afirmar que a relação entre pH e V não é linear, fato este também observado por Faquin et al. (1998) e Nicolodi, Anghinoni e Gianello (2008).

Utilizando o modelo selecionado para prever as consequências de diversos cenários, foi observado que até V = 78% os acréscimos correspondentes no pH, para cada 1% de incremento em V, eram elevados. Contudo, a partir de V = 78%, o valor do pH aumentou de apenas 0,01 para cada 1% de acréscimo em V, demonstrando que a intensidade de correlação tende a diferir entre dois patamares de V, um menor ou igual a 78% e outro maior do que este valor. Isso se deve ao fato do pH do solo variar de forma quadrática a partir de doses crescentes de CaCO₃ (FRADE JÚNIOR et al., 2013; SOUSA et al., 2013), ou seja, quando o pH do solo é baixo, a aplicação de calcário promove maior incremento nesta característica, diminuindo o efeito da calagem sobre o pH à medida em que a acidez do solo vai sendo reduzida. Mas o aumento na V a partir da aplicação de calcário é linear (CORRÊA et al., 2007), o que bem explica o modelo de resposta selecionado para a relação pH x V.

TABELA 1 - Limites máximo e mínimo, média, mediana, desvio padrão (s) e coeficiente de variação (CV) de características químicas determinadas em 599 amostras de solos sob lavouras de café.

Estatísticas	Características da fertilidade do solo						
	pH	P	K	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H+Al
		-----mgdm ⁻³ -----			-----cmol _c dm ⁻³ -----		
Mínimo	3,86	0,10	1,00	0,02	0,01	0,00	0,20
Máximo	6,67	81,50	210,00	9,93	2,73	2,60	15,00
Média	5,02	1,79	24,30	1,13	0,29	0,28	3,74
Mediana	4,97	0,80	15,00	0,85	0,22	0,20	3,40
s	0,47	4,84	28,54	1,11	0,29	0,37	1,91
CV (%)	9,44	271,14	117,46	98,85	99,74	132,07	50,98
	SB	t	T	V	m	P-rem	MO
		-----cmol _c dm ⁻³ -----		-----%-----		mgL ⁻¹	g kg ⁻¹
Mínimo	0,06	0,16	1,05	1,50	0,00	0,38	1,60
Máximo	12,38	12,48	17,58	90,80	90,60	11,17	52,70
Média	1,48	1,76	5,22	28,49	21,07	2,15	34,03
Mediana	1,14	1,53	4,80	25,10	13,90	1,77	35,20
s	1,40	1,33	2,34	18,54	21,94	1,43	8,96
CV (%)	94,67	75,51	44,79	65,07	104,14	66,45	26,32

1/pH (H₂O), P e K: Mehlich-1, Ca²⁺, Mg²⁺ e Al³⁺: KCl 1 mol L⁻¹, H+Al e T: Ca(OAc)₂ 0,5 mol L⁻¹ pH 7,0, P-rem: P em solução após agitação por 1 h de 60 mol L⁻¹ de P em CaCl₂ 10 mmolL⁻¹, na relação solo:solução de 1:10 (ALVAREZ et al., 2000), Matéria orgânica (MO): oxidação com dicromato de potássio, Walkley-Black.

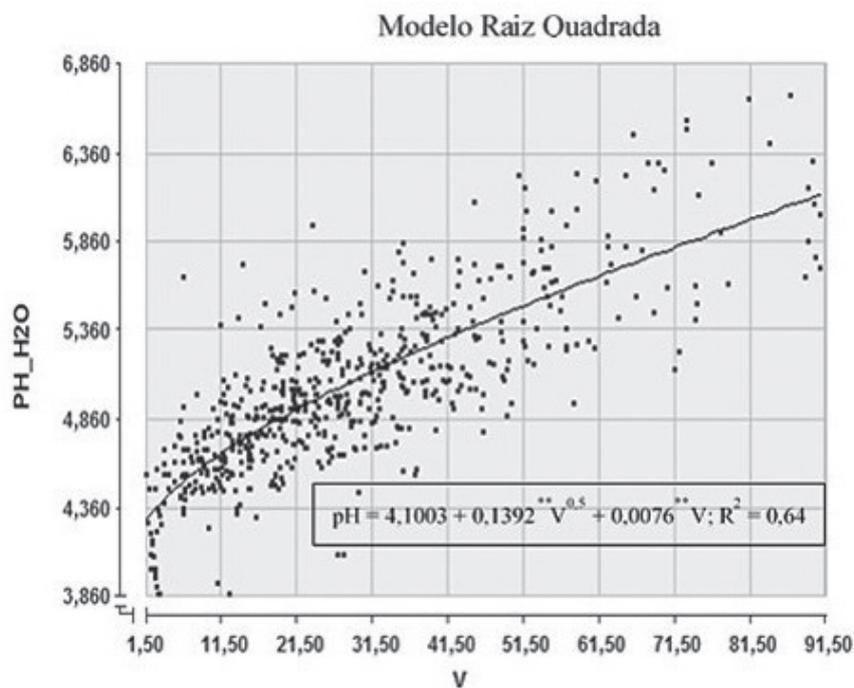


FIGURA 1 - Modelo preditivo para a relação entre pH e V (%) considerando 599 amostras de solos sob lavouras de café.

Devido ao baixo valor do coeficiente de determinação (R^2) do modelo selecionado (Figura 1), pode-se inferir que uma única equação não seja suficiente para traduzir esta relação em todas as situações. Nesse sentido, Nicolodi, Anghinoni e Gianello (2008) observaram relações não lineares entre indicadores da acidez dos solos, inclusive entre pH e V, e sugeriram que a separação dos solos em pelo menos dois grupos, um menos argiloso, com menor teor de matéria orgânica, e outro mais argiloso, com maior teor de matéria orgânica, proporcionaria maior grau de associação entre as variáveis. Inferindo diretamente sobre o que sugerem esses autores, pode-se dizer que haveria maior grau de associação entre pH e V se os solos fossem agrupados de acordo com sua classe de CTC pH 7,0 (T). Não obstante, deve-se partir da premissa de que tanto pH quanto V são variáveis dependentes, nesse contexto, da quantidade de calcário aplicada.

A característica química do solo que mais influencia a determinação da necessidade de calagem pelo método SatB, devido a forma de cálculo, é a CTC pH 7,0 (T). Além disso, a T apresentou elevada correlação com a acidez potencial (H+Al) ($r = 0,80^{***}$) e com o teor de matéria orgânica dos solos ($r = 0,89^{***}$), ambas significativas a 0,1% de probabilidade, o que reafirma a inferência realizada. Dessa forma, optou-se por agrupar os solos de acordo, unicamente, com a classificação de T, uma vez que esta é uma característica de grande influência sobre o fenômeno.

As amostras de solos do banco de dados (599 amostras) foram agrupadas, então, em quatro grupos: solos com T classificada como baixa ($TBa \leq 4,30 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, grupo composto por 223 amostras), média ($4,30 < TM \leq 8,60 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, grupo composto por 337 amostras), boa ($8,60 < TBo \leq 15,00 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, grupo composto por 32 amostras) e muito boa ($TMBo > 15,00 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, grupo composto por sete amostras), de acordo com classificação proposta por Alvarez V. e Ribeiro. Todavia, o grupo formado pelos solos com T classificada como muito boa (TMBo) foi composto por apenas sete amostras, sendo que apenas duas delas apresentaram pH abaixo de 6,0. Então, partindo do princípio de que este grupo não seria adequadamente representado, resolveu-se por descartá-lo. Ademais, solos com valores de T maiores do que $15,00 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ geralmente apresentam capacidade tampão de pH muito elevada, como observado por Faquin et al. (1998) e Silva et al. (2008), o que tenderia a provocar um viés na tese levantada.

Mantendo-se apenas os solos com T classificada como baixa ($TBa \leq 4,30 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), média ($4,30 < TM \leq 8,60 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) e boa ($8,60 < TBo \leq 15,00 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), foram calculadas novas correlações entre pH e V, obtendo-se equações lineares para as mesmas (Tabela 2).

As equações apresentadas na Tabela 2 foram comparadas com equações estabelecidas por outros autores, usando como referência a classe de T dos solos utilizados nos diversos trabalhos, de forma que a comparação entre equações fosse realizada para solos com a mesma classe ou com a classe de T mais próxima possível. É importante ressaltar que todos os autores apresentados a seguir determinaram H+Al pelo método do acetato de cálcio (Ca(OAc)_2 0,5 mol L⁻¹ pH 7,0).

A equação estabelecida para o grupo de solos com T classificada como baixa ($TBa \leq 4,30 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) foi comparada com a equação sugerida por Silva et al. (2007). Estes autores trabalharam com um Latossolo Vermelho distrófico típico de textura média, no qual aplicaram cinco doses crescentes de calcário em cobertura, avaliando seu efeito em quatro profundidades na linha de plantio e na entrelinha. Apesar de nem todas as amostras apresentarem T classificada como baixa, todas ficaram bem próximas do valor limite de $4,30 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$. Equação de Silva et al. (2007): $\text{pH} = 3,630 + 0,0276 V$.

A equação proposta para o grupo de amostras com T classificada como média ($4,30 < TM \leq 8,60 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) foi comparada com a equação definida por Corrêa et al. (2007). Estes autores trabalharam num Latossolo Vermelho-Amarelo argiloso, com T de $8,60 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, onde aplicaram doses crescentes de calcário e avaliaram os efeitos da calagem e a produtividade do café. Equação de Corrêa et al. (2007): $\text{pH} = 2,698 + 0,0490 V$.

Para o grupo de solos com T classificada como boa ($8,60 < TBo \leq 15,00 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), utilizou-se como fonte de comparação a equação sugerida por Raij, Cantarella e Zullo (1979). Esta equação é, na verdade, baseada num grupo de equações estabelecidas por Raij, Sacchetto e Igue (1968) para diversas amostras superficiais e subsuperficiais de solos com B Textural ou B Latossólico do estado de São Paulo. A equação de Raij, Cantarella e Zullo (1979) é, devido à forma com que foi elaborada, mais um modelo teórico do que a expressão de uma situação prática, sendo considerada como o símbolo da relação existente entre pH e V. Equação de Raij, Cantarella e Zullo (1979): $\text{pH} = 4,50 + 0,025 V$.

TABELA 2 - Modelos de correlação linear entre pH e saturação por bases (V%), para solos agrupados de acordo com a classe da CTC a pH 7,0 (T).

Classe de T ^{1/}	Equação	Coefficiente de correlação (r)
T Baixa (TBa)	pH = 4,495 + 0,0162**V	0,76***
T Média (TM)	pH = 4,412 + 0,0223**V	0,83***
T Boa (TBo)	pH = 4,260 + 0,0292**V	0,86***

^{1/}T classificada como baixa (TBa ≤ 4,30 cmol_c dm⁻³), média (4,30 < TM ≤ 8,60 cmol_c dm⁻³) e boa (8,60 < TBo ≤ 15,00 cmol_c dm⁻³); *** e ** significativo aos níveis de 0,1 e 1% de probabilidade, respectivamente.

Com as equações estabelecidas no presente trabalho e com as equações definidas pelos autores citados, foram calculadas as saturações por bases que estariam relacionadas aos valores de pH do solo sugeridos para os cafeeiros arábica e conilon (5,8 a 6,0) (EFFGEN et al., 2008; GUIMARÃES et al., 1999; PREZOTTI et al., 2007; SILVA et al., 2004). A partir dos resultados, ficou evidente a equivalência entre as equações selecionadas para os grupos de solos organizados de acordo com a classificação de T e as equações sugeridas por outros autores, para solos com as mesmas classes de T utilizadas no presente trabalho (Tabela 3).

Foi também observado que à medida em que se aumentaram os valores de T dos solos ocorreu redução nos valores de V associados a valores de pH sugeridos para o cafeeiro (Tabela 3). É interessante ressaltar que a clássica equação proposta por Raij, Cantarella e Zullo (1979) representa muito bem a relação entre pH e V em solos com T classificada como boa, não sendo adequada para representá-la em todas as classes de T, como poder-se-ia equivocadamente pensar.

No método SatB de recomendação da NC, para cada 10% que se aumenta na V esperada (Ve), a dose de calcário recomendada, em t ha⁻¹, aumenta 1/10 da T do solo em cmol_c dm⁻³, ou seja, num solo com T de 3,5 cmol_c dm⁻³, para cada aumento de 10% em Ve, seriam aplicados 0,35 t ha⁻¹ de calcário. Já em um solo com T de 15 cmol_c dm⁻³, para cada 10% de aumento em Ve, seriam aplicados 1,5 t ha⁻¹ de calcário. Nos dois casos, esses acréscimos independem, matematicamente, da saturação por bases apresentada pelo solo no momento da amostragem (Va). Essa diferença, relativizada pela magnitude da T do solo, pode levar à distinta relação entre pH e V existente nos solos com diferentes classificações de T, e explica por que um mesmo valor de pH se relaciona a valores de V mais elevados em solos com T classificada como baixa, e a menores valores de V em solos com T classificada como boa (Tabela 3), mesmo se for considerado o efeito da capacidade tampão, que não tende a ser tão acentuado em solos com esta última classificação.

A relação existente entre pH e V determinados nos solos, pode ser extrapolada para a relação entre pH e a V esperada (Ve) do método SatB de determinação da necessidade de calagem, pois autores como Corrêa et al. (2007) e Faquin et al. (1998) demonstraram haver estreita correlação entre a Ve utilizada nos cálculos da NC e a V apresentada pelos solos após período adequado de reação do calcário aplicado.

Para se atingir valores adequados de pH do solo para as diversas culturas, diferentes valores de Ve devem ser, então, utilizados, de modo que estes sejam maiores em solos com baixa T e menores em solos com T mais elevada (Tabela 3). Portanto, não se deve utilizar apenas um único valor de Ve para cada cultura, independentemente da T do solo, como é atualmente recomendado.

Considerando especificamente a cultura do café, para a qual é recomendada, usualmente, uma V esperada (Ve) de 60%, valores de pH completamente distintos seriam alcançados após se proceder a calagem utilizando Ve = 60%, em solos com diferentes classificações de T, como se pode verificar utilizando as equações apresentadas na Tabela 2.

Se o pH do solo ficar abaixo do adequado, como seria o caso de solos com baixa T, poderia ocorrer toxidez de elementos como Al³⁺ e menor disponibilidade de macronutrientes, como sustentado por Melo et al. (2011). Por outro lado, em solos com T classificada como boa, o pH tenderia a atingir valores acima do adequado, reduzindo, segundo Melo et al. (2011), a disponibilidade de micronutrientes metálicos, especialmente de Zn, que, de acordo com Menezes et al. (2010), teria sua absorção diminuída devido ao aumento da adsorção deste nutriente ao solo e à redução em sua solubilidade. Essa pode ser uma das causas de relatos sobre a ineficácia da calagem, que, segundo Silva et al. (2007), nem sempre é realizada de forma adequada.

TABELA 3 - Saturações por bases (V) associadas a valores ideais de pH para os cafés arábica e conilon considerando modelos estabelecidos para solos com diferentes classes de CTC pH 7,0 (T).

pH solo (Café)	T baixa ^{1/}		T média ^{2/}		T boa ^{3/}	
	TBa	Silva et al. (2007)	TM	Corrêa et al. (2007)	TBo	Raij et al. (1979)
	----- % -----					
5,80	80	79	62	63	53	52
5,90	87	82	67	65	56	56
6,00	93	86	71	67	59	60

^{1/}pH = 4,50 + 0,0162V e pH = 3,63 + 0,0276V, T classificada como baixa: ($T \leq 4,30 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$); ^{2/} pH = 4,41 + 0,0223V e pH = 2,70 + 0,0490V, T classificada como média ($4,30 < T \leq 8,60 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$); ^{3/} pH = 4,30 + 0,0292V e pH = 4,50 + 0,0250V, T classificada como boa ($8,60 < T \leq 15,00 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$); respectivamente.

A partir das constatações apresentadas, podem ser sugeridos novos valores de Ve para a fórmula do método SatB: $NC = (Ve - Va)T/100$ pois a saturação por bases comumente recomendada para o café (Ve = 60%) claramente não surtiria o efeito desejado em todos os casos (Tabela 3). Assim, de acordo com as equações apresentadas na Tabela 3, pode-se sugerir: Ve = 90% (solos com T classificada como baixa), Ve = 70% (solos com T classificada como média) e Ve = 60% (solos com T classificada como boa), para que o pH dos solos alcance valores próximos dos recomendados para os cafeeiros arábica e conilon (5,8 a 6,0).

As relações entre pH e V estabelecidas no presente estudo, nas quais se consideram as classes de T, não seriam adequadas para solos com característica de hidromorfismo ou com teores de matéria orgânica muito elevados, como os estudados por Faquin et al. (1998). Esses autores demonstraram que estes tipos de solos tendem a apresentar comportamento distinto, devido à elevada capacidade tampão de pH, havendo necessidade de maiores doses de calcário para que valores mais adequados de pH do solo sejam alcançados. Outros fatores, como a mineralogia da fração argila (SILVA et al., 2008), podem também reduzir a capacidade preditiva das equações ora apresentadas, mas, por serem definidas de acordo com a classe de T, certamente são muito menos sensíveis a essas variações do que modelos únicos para qualquer situação, como utilizado atualmente.

Quando se utiliza o método da saturação por bases para recomendar a necessidade de calagem, é possível estimar os valores de pH do solo que seriam alcançados de acordo com o valor preestabelecido da saturação por bases esperada (Ve), caso exista um modelo preditivo que bem represente a relação pH x V. Contudo, utilizando o mesmo método, não se pode estimar se quantidades suficientes de Ca e Mg seriam fornecidas via calagem.

Utilizando os valores de V esperada (Ve) para a cultura do café, aqui sugeridos, foram calculadas frequências de distribuição das doses de necessidade de calagem (NC) determinadas pelo método SatB, para as 592 amostras de solo estudadas (599 menos as sete amostras do grupo TMBa, que foram retiradas do trabalho), em relação à necessidade de Ca+Mg para o cafeeiro estipulada por Alvarez V. e Ribeiro (Tabela 4).

Para o grupo de solos com T classificada como baixa, mesmo utilizando uma Ve = 90%, maior do que o recomendado para o cafeeiro (Ve = 60%), em apenas 28% dos casos as doses de calcário seriam suficientes para suprir as plantas com Ca e Mg. Considerando o grupo de solos com T classificada como média (Ve = 70%), em 64% dos casos seria recomendada quantidade suficiente de calcário para suprir as plantas adequadamente com Ca e Mg.

Os resultados do presente trabalho demonstram claramente que o valor da V esperada (Ve), para uma mesma cultura, não deve ser fixo para solos com diferentes classes de T, considerando não só as variações no pH, mas também as quantidades de Ca e Mg adicionadas via calagem.

A porcentagem de T a ser preenchida pela soma de bases pode acarretar quantidades muito baixas de Ca e Mg disponíveis para as culturas, como ficou demonstrado. Nesse caso, mesmo que o pH atinja nível adequado, as plantas podem apresentar deficiência de Ca e Mg. Portanto, avaliar a disponibilidade de nutrientes para as plantas, utilizando porcentagens preenchidas de T não é adequado, a não ser que se defina previamente a magnitude de T.

TABELA 4 - Necessidades de calagem calculadas com as saturações por bases esperadas (Ve) sugeridas para grupos de solos com diferentes classificações de CTC pH 7,0 (T), e frequência de distribuição em que essas doses supririam adequadamente as plantas de café com cálcio e magnésio.

Estatísticas	Classificação de T		
	Baixa (Ve = 90%)	Média (Ve = 70%)	Boa (Ve = 60%)
	NC (t ha ⁻¹)		
Mínimo	0,00	0,00	0,00
Máximo	3,77	5,74	8,06
Média	2,10	2,39	4,03
Mediana	2,27	2,44	4,60
S	0,86	1,01	2,45
CV (%)	40,89	42,32	60,82
Suprimento (Ca+Mg) ^{1/}	----- % -----		
NC ≥ X-(Ca+Mg) ^{2/}	28	64	100

^{1/} Valor sugerido por Alvarez e Ribeiro (1999) X = 3,5 cmol_c dm⁻³ de Ca+Mg; ^{2/} Necessidade de suprimento, via calagem, de Ca+Mg para o cafeeiro, ou seja, o que a planta precisa (X), menos o que o solo pode suprir (Ca+Mg), sendo especificamente a segunda parte da fórmula do método de neutralização do Al³⁺ e elevação dos teores de Ca²⁺ e Mg²⁺ para cálculo da necessidade de calagem.

Pode-se questionar a adequação do teor de 3,5 cmol_c dm⁻³ de Ca+Mg proposto por Alvarez V. e Ribeiro (1999), alegando-se ser este elevado. No entanto, é muito difícil, considerando as necessidades do cafeeiro em Ca e Mg, que este valor seja menor do que 3,0 cmol_c dm⁻³ de Ca+Mg, gerando praticamente o mesmo impacto sobre a necessidade de suprimento de Ca e Mg via calagem. Além disso, 3,5 cmol_c dm⁻³ de Ca+Mg é o valor utilizado no método da neutralização do Al³⁺ e elevação dos teores de Ca²⁺ e Mg²⁺, empregado em Minas Gerais, maior produtor de café do Brasil, o que torna sua aplicabilidade prática pouco duvidosa. Deve-se ressaltar que este é, até o momento, o mesmo valor recomendado para o café conilon, ou seja, para as duas espécies de café se recomendam Ve = 60 % e X = 3,5 cmol_c dm⁻³.

Novas alternativas devem ser utilizadas, portanto, para melhor ajustar as doses de calcário determinadas pelo método SatB nas condições onde o suprimento de Ca e Mg seria deficitário. Uma dessas alternativas pode ser fundamentada no cálculo da dose de calcário utilizando-se, em conjunto, a V esperada (Ve) e a necessidade de Ca+Mg da cultura. Se a dose calculada dessa forma for maior do que a suportada pelo solo (NC ≥ H+Al), o que não ocorre quando se utiliza exclusivamente o método SatB, pode-se pensar no parcelamento da calagem, sendo este o único caso de parcelamento aceitável.

Nos solos com T classificada como boa, mesmo utilizando-se o valor de Ve = 60%, as

quantidades de Ca e Mg fornecidas via calagem seriam suficientes para suprir as plantas em 100% dos casos (Tabela 4). Um menor percentual de bases preenchendo elevada T corresponde a concentrações de Ca²⁺ e Mg²⁺ no solo de maior amplitude, como seria de esperar, suprimindo as plantas de forma satisfatória.

Esses fatores relacionados à calagem têm grande influência sobre a produtividade do cafeeiro, e claramente explicam alguns resultados de pesquisa à primeira vista surpreendentes, como os de Raij et al. (1996). Num solo com T de 2,8 cmol_c dm⁻³, esses autores obtiveram a maior produtividade de café quando utilizaram a dose de 4 t ha⁻¹ de calcário dolomítico. Todavia, segundo os mesmos, se fosse utilizada V esperada (Ve) de 70% para cálculo da necessidade de calagem pelo método da SatB, seria recomendada para esta situação a dose de 2 t ha⁻¹ de calcário dolomítico. Então, embora maiores Ve permitam alcances de valores de pH mais adequados em solos com baixa T, ainda assim a dose recomendada pode não ser suficiente para suprir as plantas com Ca e Mg, o que parece ter sido o caso do trabalho citado.

Na definição da V esperada (Ve) para cálculo da necessidade de calagem, utilizando o método da Saturação por Bases, deve ser considerada a classe da CTC pH 7,0 (T) do solo, pois esta influencia diretamente a dose e conseqüentemente os valores de pH alcançados após a calagem, bem como as quantidades de Ca e Mg disponíveis para as plantas.

4 CONCLUSÕES

A relação existente entre pH do solo e V não é linear.

Para um mesmo pH do solo, os correspondentes valores de V variam de acordo com a CTC pH 7,0.

Recomendam-se os seguintes valores de Ve para o cafeeiro, de acordo com a classificação da CTC pH 7,0 do solo (T): Ve = 90% (T baixa: $T \leq 4,30 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), Ve = 70% (T média: $4,30 < T \leq 8,60 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) e Ve = 60% (T boa: $8,60 < T \leq 15,00 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$).

Na grande maioria das situações, para solos com CTC pH 7,0 classificada como baixa ou média, as doses da necessidade de calagem calculadas pelo método da Saturação por Bases não são suficientes para suprir as plantas de café com Ca e Mg, mesmo utilizando os valores de Ve mais elevados preconizados neste trabalho.

5 REFERÊNCIAS

- ALVAREZ V., V.H. et al. Determinação e uso do fósforo remanescente. **Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 1, p. 27-32, 2000.
- ALVAREZ, V.H.; RIBEIRO, A.C. Calagem. In: RIBEIRO, A.C.; GUIMARÃES, P.T.G.; ALVAREZ, V.H. (Ed.). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa, MG: CFSEMG, 1999. cap. 8, p. 43-60.
- ANJOS, J.L.; SOBRAL, L.F.; LIMA JUNIOR, M.A. Efeito da calagem em atributos químicos do solo e na produção da laranjeira. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.15, n.11, p.1138-1142, nov. 2011.
- ARANTES, S.A.C.M.; LAVORENTI, A.; TORNISIELO, V.L. Efeito da calagem e do glifosato na atividade microbiana de diferentes classes de solos. **Pesticidas: Revista de Ecotoxicologia e Meio Ambiente**, Curitiba, v. 17, p. 19-28, jan./dez. 2007.
- BATISTA, A. H. et al. Liming and fertilisation in Pinus taeda plantations with severe nutrient deficiency in savanna soils. **Acta Scientiarum**, Maringá, v. 37, n. 1, p. 117-125, jan./mar. 2015.
- BRIEDIS, C. et al. Carbono do solo e atributos de fertilidade em resposta à calagem superficial em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, n. 7, p.1007-1014, jul. 2012.
- CATANI, R.A.; GALLO, J.R. Avaliação da exigência de calcário dos solos do Estado de São Paulo mediante a correlação entre o pH e a porcentagem de saturação por bases. **Revista de Agricultura**, Piracicaba, v. 30, n. 1, p. 49-60, 1955.
- CORRÊA, J.B. et al. Índice de saturação por bases na nutrição e na produtividade de cafeeiros catuaí vermelho (*Coffea arabica* L.). **Coffee Science**, Lavras, v. 2, n. 2, p. 159-167, jul./dez. 2007.
- DEFELIPO, B.V.; RIBEIRO, A.C. **Análise química do solo: metodologia**. 2. ed. Viçosa, MG: Ed. UFV, 1997. 26p.
- EFFGEN, T.A.M. et al. Atributos químicos do solo e produtividade de lavouras de cafeeiro conilon submetidas a diferentes tratos culturais no sul do estado do Espírito Santo. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 24, n. 2, p. 7-18, abr./jun. 2008.
- FAQUIN, V. et al. Resposta do feijoeiro à aplicação de calcário em solos de várzea do sul de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, n. 4, p.651-660, out./dez. 1998.
- FRADE JUNIOR, E. F. et al. Neutralização química de acidez em solos sedimentares da Amazônia Ocidental, Acre. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 9, n. 16, p. 1566-1572, 2013.
- GUARÇONI, A., MENDONÇA, E.S. Capacidade tampão de pH do solo e disponibilidade de fósforo pela adição de composto orgânico. **Magistra**, Cruz das Almas, v. 15, n. 2, p. 141-145, jul./dez. 2003.
- GUIMARÃES, P. T. G. et al. Cafeeiro. In:RIBEIRO, A.C.; GUIMARÃES, P.T.G.; ALVAREZ, V.H. (Ed.). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa, MG: CFSEMG, 1999. p. 289-302.
- MACHADO, L.V. et al. Fertilidade e compartimentos da matéria orgânica do solo sob diferentes sistemas de manejo. **Coffee Science**, Lavras, v. 9, n. 3, p. 289-299, jul./set. 2014.
- MELO, L.C.A. et al. Nutrição e produção de matéria seca de milho submetido a calagem e adubação sulfatada. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 41, n. 2, p. 193-199, abr./jun. 2011.

- MENEZES, A.A. et al. Disponibilidade de zinco para milho pelos extratores Mehlich-1, Mehlich-3 e DTPA em solos de Minas Gerais, na presença e ausência de calagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 2, p.417-424, 2010.
- NATALE, W. et al. Acidez do solo e calagem em pomares de frutíferas tropicais. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 34, n. 4, p. 1294-1306, dez. 2012.
- NICOLODI, M.; ANGHINONI, I.; GIANELLO, C. Relações entre os tipos e indicadores de acidez do solo em lavouras no sistema plantio direto na região do planalto do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 3, p. 1217-1226, maio/jun. 2008.
- NOGUEIRA, N. O. et al. Teor de nitrogênio, clorofila e relação clorofila-carotenoide em café arábica em solo submetido a diferentes corretivos de acidez. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v.8, n.3, p.390-395, 2013.
- PREZOTTI, L. C. et al. **Manual de recomendação de calagem e adubação para o estado do Espírito Santo: 5ª aproximação**. Vitória: SEEA/INCAPER/CEDEAGRO, 2007. 305p.
- PREZOTTI, L.C.; GUARÇONI, A. **Guia de interpretação de análise de solo e foliar**. Vitória: INCAPER, 2013. 104 p.
- RAIJ, B.V. et al. Alumínio trocável e saturação em bases como critérios para recomendação de calagem. **Bragantia**, Campinas, v. 42, n. 1, p. 149-156, 1983.
- _____. Calagem e adubação nitrogenada e potássica para o cafeeiro. **Bragantia**, Campinas, v. 55, n. 2, p. 347-355, 1996.
- RAIJ, B. V.; CANTARELLA, H.; ZULLO, M. A. T. Método tampão SMP para determinação da necessidade de calagem de solos do estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v. 38, n. 7, p. 57-69, 1979.
- RAIJ, B. V.; SACCHETTO, T. D.; IGUE, T. Correlações entre o pH e o grau de saturação em bases nos solos com horizonte B textural e horizonte B latossólico. **Bragantia**, Campinas, v. 27, n. 17, p. 193-200, 1968.
- SCHNEIDER, J. et al. Influência de diferentes sistemas de manejo e calagem em experimento de longa duração sobre fungos micorrízicos arbusculares. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 4, p. 701-709, jul./ago. 2011.
- SILVA, C.A. et al. Produtividade do cafeeiro e atributos de fertilidade de Latossolo sob influência de adensamento da lavoura e manejo da calagem. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 28, n. 5, p. 1066-1076, set./out. 2004.
- SILVA, M. A. C. et al. Aplicação superficial de calcário em pomar de laranja pêra em produção. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 29, n. 3, p. 606-612, dez. 2007.
- SILVA, V. et al. Variáveis de acidez em função da mineralogia da fração argila do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 2, p. 551-559, mar./abr. 2008.
- SOUSA, D.M.G.; MIRANDA, L.N.; OLIVEIRA, S.A. Acidez do solo e sua correção. In: NOVAIS, R. F. et al. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: SBCS, 2007. cap. 5, p. 205-274.
- SOUSA, L.F.R. et al. Determinação do pH de um Argissolo Vermelho Amarelo distrófico incubado com aplicação de doses crescentes de CaCO₃ por diferentes métodos. **Revista Agroecossistemas**, Belém, v. 5, n. 2, p. 58-63, 2013.
- SPERA, S.T. et al. Dispersão de argila em microagregados de solo incubado com calcário. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 2613-2620, 2008. Número especial.
- VASCONCELLOS, C.A.; SANTANA, D.P.; FERREIRA, L. Métodos de determinação da necessidade de calagem e características físico-químicas de alguns solos de Minas Gerais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 29, n. 8, p. 1253-1263, ago. 1994.