

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP

CÂMPUS DE JABOTICABAL

DIAGNOSE NUTRICIONAL DA GOIABEIRA

Amanda Hernandez

Engenheira Agrônoma

2012

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP

CÂMPUS DE JABOTICABAL

DIAGNOSE NUTRICIONAL DA GOIABEIRA

Amanda Hernandez

Orientadores: Prof. Dr. William Natale

Prof. Dr. Léon-Etienne Parent

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

2012

H557d Hernandez, Amanda
Diagnose nutricional da goiabeira / Amanda Hernandez. – –
Jaboticabal, 2012
xi, 98 f.: il.; 28 cm

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de
Ciências Agrárias e Veterinárias, 2012

Orientador: William Natale

Co-orientador: Léon-Etienne Parent

Banca examinadora: Antonio Enedi Boaretto, Cássio Hamilton
Abreu Junior, Danilo Eduardo Rozane, Silvia Helena Modenese Gorla
da Silva

Bibliografia

1. Análise composicional de dados. 2. Fertilidade do solo. 3.
Geometria de Aitchison. 4. Nutrição mineral vegetal. 5. *Psidium*
guajava L. 6. Razões log isométricas (*ilr*). I. Título. II. Jaboticabal -
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias.

CDU 634.42:631.8

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e
Tratamento da Informação – Serviço Técnico de Biblioteca e
Documentação - UNESP, Câmpus de Jaboticabal.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE JABOTICABAL
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS DE JABOTICABAL

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

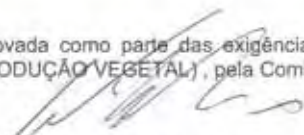
TÍTULO: DIAGNOSE NUTRICIONAL DA GOIABEIRA

AUTORA: AMANDA HERNANDES

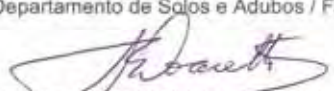
ORIENTADOR: Prof. Dr. WILLIAM NATALE

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. LEON-ÉTIENNE PARENT

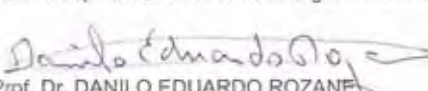
Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de DOUTOR EM AGRONOMIA (PRODUÇÃO VEGETAL), pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. WILLIAM NATALE

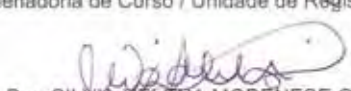
Departamento de Solos e Adubos / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal


Prof. Dr. ANTONIO ENEDI BOARETTO

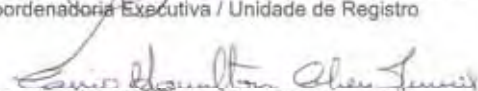
Cena / Usp/ Cena- Centro de Energia Nuclear Na Agricultura


Prof. Dr. DANILO EDUARDO ROZANE

Coordenadoria de Curso / Unidade de Registro


Profa. Dra. SYLVIA HELENA MODENESE GORLA DA SILVA

Coordenadoria Executiva / Unidade de Registro


Prof. Dr. CÁSSIO HAMILTON ABREU JUNIOR

Departamento de Nutrição Mineral de Plantas / Usp/ Cena- Centro de Energia Nuclear Na Agricultura

Data da realização: 27 de setembro de 2012.

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

AMANDA HERNANDES – Nascida em Pitangueiras – SP, em 17 de Fevereiro de 1983, graduou-se Engenheira Agrônoma em Julho de 2007 pela Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Unesp, Câmpus de Ilha Solteira, Ilha Solteira – SP. Durante o curso de graduação realizou diversos estágios, foi monitora de duas disciplinas, participou de diversos eventos, foi bolsista de Iniciação Científica (PIBIC/CNPq) por dois anos, dentre outras atividades realizadas. Em Julho de 2009, obteve o título de Mestre em Agronomia (Ciência do Solo) pela Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Unesp, Câmpus de Jaboticabal – SP. Durante o mestrado, foi bolsista da CAPES, nos primeiros doze meses, e, até o final do curso, do CNPq. Em Agosto de 2009, iniciou o Doutorado em Agronomia (Produção Vegetal) na Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Unesp, Câmpus de Jaboticabal – SP. Durante o doutorado, foi bolsista da CAPES. De Outubro de 2009 à Março de 2010 e de Julho de 2011 à Dezembro de 2011, cursou seu doutorado sanduíche na *Université Laval*, em Québec no Canadá, junto ao *Département des Sols et de Génie Agroalimentaire*. Realizou diversas atividades como estágio docência, participação em simpósios e congressos, participação em grupos de pesquisa, condução de experimentos e organização de evento. Na vida acadêmica publicou diversos resumos em anais de eventos, além de artigos científicos em periódicos com corpo editorial, tanto nacionais quanto internacionais. Atualmente trabalha com Extensão Rural na Coordenadoria de Assistência Técnica Integral – CATI, da Secretaria de Agricultura e Abastecimento – SAA, do Governo do Estado de São Paulo.

*“Ninguém é tão grande que não possa aprender,
nem tão pequeno que não possa ensinar.” (Esopo)*

Aos meus amados pais, Antonio Martins Hernandez Filho e Marta Célia de Agostini Hernandez, e ao meu irmão Antonio Martins Hernandez Neto, por sempre me apoiarem e incentivarem em todas as etapas da minha vida,

DEDICO

Ao meu noivo, Lucas Bottino Vizzotto Stéfani, pelo amor incondicional e por estar sempre presente em minha vida,

OFEREÇO

A Deus

AGRADEÇO E LOUVO SEMPRE

AGRADECIMENTOS

A Deus, agradeço a tudo na vida;

A Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Câmpus de Jaboticabal, em especial ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Produção Vegetal, pela oportunidade oferecida;

A CAPES, pela concessão da bolsa durante o doutorado e o doutorado sanduíche, sem as quais seria impossível a realização do projeto e do curso de doutorado, assim como a obtenção de toda a experiência e os conhecimentos adquiridos na vivência no exterior;

Ao professor Dr. William Natale, pela orientação, oportunidade, compreensão, paciência, incentivo, empenho pessoal e, sobretudo amizade, que tanto contribuíram para a minha formação profissional;

Au Dr. Léon Etienne Parent pour tout ce qu’il m’a appris au cours de mon PhD sandwich. Encore plus important pour moi, je veux lui remercier l’opportunité, l’attention et l’accueil très chaleureux à l’Université Laval;

A Sra. Marisa Natale, pelo apoio, incentivo, compreensão e paciência em todos os momentos, especialmente durante o Curso de Francês que foi imprescindível para a realização do Doutorado Sanduíche;

Aos professores Dr. Arthur Bernardes Cecílio Filho, Dr. José Frederico Centurion, Dr. Itamar Andrioli e Dra. Renata Aparecida de Andrade pela participação no Exame Geral de Qualificação e pelas sugestões, conselhos, ensinamentos e valiosas contribuições no aprimoramento deste trabalho;

A todos os docentes do Curso de Pós-graduação em Agronomia da FCAV/Unesp, pela atenção e pelos conhecimentos transmitidos, os quais contribuíram para a minha formação profissional;

A todos meus familiares, em especial meus pais, Antonio Martins Hernandez Filho e Marta Célia de Agostini Hernandez, pelo exemplo de luta, carinho e apoio nesta caminhada;

Ao meu noivo Lucas Bottino Vizzotto Stéfani, por todo carinho, compreensão, paciência, apoio e companheirismo em todos os momentos;

As minhas grandes amigas Fabiana de Souza Pereira, Cinara Xavier de Almeida e Liliam Silva Cândido que, juntas, superamos muitos obstáculos (Quarteto Fantástico!) e por todo carinho, companheirismo e, sobretudo à imensa amizade;

A todos os amigos e colegas de Pós-Graduação, em especial ao Dr. Danilo Eduardo Rozane, Msc. Liliane Maria Romualdo, Dr. Henrique Antunes de Souza e MsC. Daniel Angeluci Amorim, pelos ensinamentos, companheirismo e esforços não medidos durante o convívio;

Aux collègues Michaël Leblanc et Nicolas Samson, pour l'accueil très gentil et sympathique et aussi pour la patience et l'amitié;

A todos os funcionários do Departamento de Solos e Adubos, pelos auxílios e pela amizade, em especial à Célia Regina Muniz, Cláudia Campos Dela Marta, Dejair Silva, Orivaldo Gomes e Anderson Morello da Silva;

Aos funcionários da Seção de Pós-Graduação e aos funcionários da Biblioteca da FCAV/Unesp pela presteza, atendimento e auxílio;

A todos os familiares, amigos, colegas e companheiros de pesquisa, que estando presentes ou não, sempre torceram pelo meu sucesso e sempre me incentivaram, e também pela amizade durante esta caminhada;

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho, meus sinceros agradecimentos.

Muito Obrigada!!!

SUMÁRIO

	Página
RESUMO.....	x
SUMMARY.....	xi
CAPÍTULO 1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	1
Fruticultura tropical.....	3
Aspectos gerais da goiabeira.....	4
Nutrição mineral.....	6
Calagem.....	8
Diagnose nutricional.....	10
I. Avaliação da fertilidade do solo.....	10
II. Avaliação da nutrição mineral vegetal.....	13
Referências.....	16
CAPÍTULO 2 – Equilíbrio catiônico do solo em pomares de goiabeiras.....	27
Resumo.....	27
Introdução.....	28
Material e métodos.....	31
Resultados e Discussão.....	38
Conclusão.....	67
Referências.....	68
CAPÍTULO 3 – Equilíbrio nutricional de goiabeiras a partir da adubação e calagem.....	74
Resumo.....	74
Introdução.....	75
Material e métodos.....	77
Resultados e discussão.....	83
Conclusão.....	93
Referências.....	94

DIAGNOSE NUTRICIONAL DA GOIABEIRA

RESUMO – A resposta da goiabeira à adubação e à calagem pode ser monitorada pela análise de solo e de tecido vegetal, ferramenta utilizada visando o reequilíbrio do solo e da planta, através da adição de nutrientes em concentração adequada. Porém, o conceito de saturação por bases da capacidade de troca catiônica (CTC), usado para fins de avaliação da fertilidade do solo, é fracamente apoiado experimentalmente, é intrinsecamente influenciado pela tendência e redundância dos dados, possuindo dependência de escala e distribuição não-normal. Por outro lado, o perfil nutricional, usado para fins de diagnose da nutrição vegetal, é definido em relação à padrões de teores de nutrientes, os quais são constantemente criticados por não considerarem as interações que ocorrem entre os elementos e por gerarem tendências numéricas, decorrentes da redundância dos dados, da dependência de escala e da distribuição não-normal. Assim, o objetivo do trabalho foi avaliar um sistema de razões log isométricas (*ilr*) para corrigir tais distorções, tanto na avaliação da fertilidade do solo como da diagnose foliar, viabilizando o manejo da adubação e da calagem em pomares de goiabeira, ajustando os atuais padrões de nutrientes com a faixa de equilíbrio das goiabeiras mais produtivas. Para isso, foi utilizada uma base de dados de experimentos conduzidos, durante três anos, com doses de N, P e K e, durante sete anos, com doses de calcário, em pomares de goiabeira. Os valores no solo de K, Ca, Mg e da acidez potencial ($H + Al$) foram divididos em três partições binárias da seguinte forma: o balanço do solo $[K | Ca, Mg, H + Al]$ para gerenciar a adubação potássica; o balanço do solo $[Ca, Mg | H + Al]$ para monitorar a necessidade de calcário; e, o balanço do solo $[Ca | Mg]$ para estabelecer o material de calagem. Selecionaram-se os balanços foliares $[N, P, K | Ca, Mg]$, $[N, P | K]$, $[N | P]$ e $[Ca | Mg]$ para separar os efeitos dos fertilizantes (N-K) e da calagem (Ca-Mg) no equilíbrio de nutrientes. Os balanços catiônicos críticos do solo foram definidos sem tendências numéricas, sendo então um ótimo índice de fertilidade do solo para o manejo da adubação em pomares de goiabeiras. A produtividade das goiabeiras, bem como seu balanço foliar nutricional, permitiram a definição de faixas de equilíbrio de nutrientes, combinadas em coordenadas *ilr*, e sua validação com as faixas de concentrações críticas atualmente utilizadas no Brasil.

Palavras-chave: análise composicional de dados, fertilidade do solo, geometria de Aitchison, nutrição mineral vegetal, *Psidium guajava* L., razões log isométrica (*ilr*)

GUAVA TREE NUTRITIONAL DIAGNOSIS

SUMMARY – The response of the guava tree to fertilizing and liming can be monitored by analyzing the soil and the plant tissue so that a balance can be re-established by adding nutrients at the appropriate concentration. However, the concept of base saturation of cationic exchange capacity (CEC), used to assess soil fertility, has little experimental backing and is intrinsically influenced by the trend and redundancy of the data, is scale-dependent and has non-normal distribution. On the other hand, the nutritional profile used for plant nutritional diagnosis is defined in relation to standard nutrient content figures which are constantly criticized for ignoring interactions between elements and for generating numeric trends as a result of data redundancy, scale-dependence and non-normal distribution. Therefore, the aim of the study was to evaluate a system of isometric log ratios (*ilr*) to correct these distortions, both in soil fertility assessment and in foliar diagnosis, making it possible to manage fertilizing and liming in guava tree orchards, adjusting the current nutrient standards to the range of the highest yielding guava trees. To do this, a database of experiments conducted in guava tree orchards were used, over a three-year period using doses of N, P and K, and over a seven-year period with doses of lime. The soil values for K, Ca, Mg and potential acidity (H + Al) were split into three binary partitions as follows: soil balance [K | Ca, Mg, H + Al] to manage potassium fertilizing; soil balance [Ca, Mg | H + Al] to monitor the need for liming; and soil balance [Ca | Mg] to establish the liming material. The [N, P, K | Ca, Mg], [N, P | K], [N | P] and [Ca | Mg] foliar balances were selected in order to separate the parts played by fertilizers (N-K) and liming (Ca-Mg) in balancing the nutrients. The critical cationic balances in the soil were defined with no numeric trends, providing an excellent soil fertility index for managing fertilizer application in guava orchards. Guava tree yields and foliar nutritional balance were used to define nutrient balance ranges combined in *ilr* coordinates, and validated against the critical concentration ranges currently used in Brazil.

Keywords: compositional data analysis, soil fertility, Aitchison geometry, plant mineral nutrition, *Psidium guajava* L., isometric log ratios (*ilr*)

CAPÍTULO 1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS

Introdução

A fruticultura brasileira vem ganhando espaço no mercado mundial, transformando o Brasil em um grande exportador de frutas e criando oportunidades de negócios para os agricultores em empreendimentos com alta rentabilidade. A goiaba, uma fruta altamente nutritiva e cuja planta é nativa da América Tropical, ocupa lugar de destaque entre as frutas tropicais, colocando o Brasil na posição de maior produtor mundial de goiaba vermelha (IEA, 2012). Porém, a produção média dos pomares de goiabeiras (*Psidium guajava* L.) no estado de São Paulo é considerada baixa, devido, entre outros fatores, ao manejo inadequado de nutrientes em decorrência da carência de informações acerca da nutrição, adubação e calagem da cultura.

O manejo adequado da calagem e adubação é imprescindível para que haja um equilíbrio entre o fornecimento de nutrientes, visando à obtenção de altos rendimentos com frutos de ótima qualidade. Assim, a goiabeira requer quantidades substanciais de nutrientes para alcançar essa alta produtividade e qualidade de frutos, sendo responsiva à adubação e à calagem, fato confirmado por vários experimentos de campo, conduzidos durante vários anos e em clima e solos diferentes (ARORA; SINGH, 1970; NATALE, 1993; NATALE et al., 1994; NATALE et al., 1996; NATALE, 1999; NATALE et al., 2001; NATALE et al., 2002ab; PRADO, 2003; PRADO; NATALE, 2004, 2008; NATALE et al., 2005; PRADO et al., 2005; NATALE et al., 2007; ANJANEYULU; RAGHUPATHI, 2009; OSMAN; ABD EL-RAHMAN, 2009; ROZANE et al., 2009; SOUZA et al., 2009).

As análises de solo e de tecido vegetal podem auxiliar no monitoramento da resposta da goiabeira à adubação e à calagem, porém seus métodos de interpretação utilizam abordagens conceitualmente tendenciosas, já que não levam em consideração as interações que ocorrem entre os elementos. Além disso, os conceitos utilizados nas interpretações das análises geram tendências numéricas

decorrentes da redundância dos dados, e possuem dependência de escala e distribuição não-normal (PARENT, 2011).

Para evitar as distorções que ocorrem nas interpretações das análises de solo e de tecido vegetal, pode ser utilizado o conceito das transformações da razão log isométrica (*ilr*), proposto por Egozcue et al. (2003), que é imparcial e não tendencioso. Assim, a hipótese do presente estudo é de que as interpretações das análises de solo e de tecidos vegetais utilizando o conceito *ilr* sejam melhores que as interpretações decorrentes do uso de outras abordagens. Com isso, o objetivo do presente estudo foi avaliar a viabilidade do uso desse conceito na interpretação da avaliação da fertilidade do solo e da nutrição de plantas.

REVISÃO DE LITERATURA

Fruticultura tropical

A fruticultura tem ocupado lugar de destaque na agricultura mundial, principalmente pela possibilidade de utilizar solos considerados inadequados à agricultura tradicional. O Brasil desponta como um dos três maiores produtores mundiais de frutas, com volume de 43 milhões de toneladas ano⁻¹ (IBRAF, 2012), posição alcançada devido às condições favoráveis de clima, solo e disponibilidade de área. Esse setor vem se desenvolvendo de modo acelerado, com reflexos positivos na economia nacional, porém, a produtividade do País ainda é considerada baixa, quando comparada à de países tradicionalmente produtores de frutas, o que ocorre por diversos fatores, dentre os quais a escassez de resultados de pesquisa sobre tecnologia de produção e, em especial, sobre as práticas de calagem e adubação.

Apesar de ser considerado grande produtor de frutas, o Brasil possui baixo consumo *per capita* de frutas frescas. Segundo o IBRAF (2012), o consumo nacional está em torno de 57 kg ano⁻¹ por pessoa, valor considerado baixo, quando comparado a de outros países como Espanha (120 kg ano⁻¹), Alemanha (112 kg ano⁻¹), Estados Unidos (67 kg ano⁻¹) e Japão (62 kg ano⁻¹). Vale ressaltar que, a Organização Mundial de Saúde (OMS) recomenda o consumo *per capita* de 146 kg de frutas por ano.

O desempenho da fruticultura brasileira mostra que o País tem potencial para produzir frutas de qualidade, atendendo aos requisitos mais exigentes dos mercados externos. As frutas brasileiras representam apenas 2% do mercado internacional, que movimenta US\$ 21 bilhões ao ano e o País ocupa o vigésimo lugar entre os exportadores (BUAINAIN; BATALHA, 2007). Vale ressaltar que, nem o mercado nacional nem o internacional estão plenamente supridos de frutas, e ambos devem continuar em crescimento. O mercado mundial de frutas cresce em média, atualmente, US\$ 1 bilhão ao ano (FAO, 2012).

O Brasil coloca-se numa posição privilegiada em relação às demais nações, devido a sua extensa área e diversidade climática, possibilitando o cultivo em seu território, tanto de plantas de clima temperado no Sul e no Sudeste, como de clima tropical e subtropical no Sudeste, Norte e Nordeste do País.

A fruticultura do estado de São Paulo ocupa posição de destaque no Brasil, tanto pela área cultivada, como pelo volume produzido, com os pomares abrangendo mais de 800 mil hectares no Estado e 19 milhões de toneladas de frutas produzidas anualmente, representando 36% da área total do País ocupada pela fruticultura e 44% da produção total de frutas brasileiras (IBGE, 2012). O estado de São Paulo oferece condições vantajosas no tocante à localização, solos, clima, infraestrutura, padrão agrícola e produção orientada em bases econômicas.

Aspectos gerais da goiabeira

A goiabeira (*Psidium guajava* L.) é originária da região tropical das Américas, situada entre o México e o Brasil. Atualmente, essa espécie encontra-se mundialmente distribuída, dada a sua habilidade de adaptação à diferentes condições edafolímáticas (KOLLER, 1979; GONZAGA NETO, 2001).

Pertencente à família *Myrtaceae*, a goiabeira é uma fruteira que inicia sua produção entre 10 e 12 meses após o plantio, e atingindo período de máxima eficiência produtiva aos 3 ou 4 anos de idade (ROVIRA, 1988). É considerada uma planta rústica, adaptando-se a variados tipos de solos; entretanto, solos profundos, permeáveis e ricos em matéria-orgânica são os que proporcionam os melhores resultados econômicos (KOLLER, 1979), desde que também atendam adequadamente às exigências nutricionais da planta, o que envolve o manejo da calagem e da adubação.

A reprodução da goiabeira nativa é via sementes, mas, pode-se propagá-la, também, por via assexuada, através da enxertia, borbulhia ou garfagem. Entretanto, recomenda-se a utilização de estaca herbácea, empregando-se cultivares melhoradas, altamente produtivas, porém, exigentes em termos nutricionais

(NATALE et al., 1996), para a formação dos pomares comerciais. Esse procedimento é rotineiramente utilizado por viveristas para a produção de mudas de goiabeira (TODA FRUTA, 2012), devido à uniformidade genética para a formação de pomares (PEREIRA; NACHITIGAL, 1997).

Dentre as frutas tropicais brasileiras, a goiaba ocupa lugar de destaque, não só pelo seu aroma e sabor, como também pelo seu valor nutricional e elevado teor de vitamina C, além de fornecer carboidratos, proteínas, fibras e vitaminas (MANICA et al., 2000), colocando o Brasil na posição de maior produtor mundial de goiabas vermelhas (IEA, 2012). Seus frutos são empregados não somente na indústria, sob múltiplas formas (purê, polpa, néctar, suco, compota, sorvete, entre outros), como também são amplamente consumidos *in natura* (GONZAGA NETO, 2001).

Em 2007, o Brasil produziu mais de 300 mil toneladas de goiabas, em uma área que supera 15 mil hectares, sendo que apenas 0,07% dessa produção foi destinada à exportação (IBGE, 2012), tendo como destino principal a União Europeia, que hoje concentra 70% do volume das exportações brasileiras. Isso evidencia a necessidade de melhoria na qualidade das frutas para a conquista de espaço no mercado internacional.

A cultura da goiaba evoluiu muito nos últimos anos, principalmente devido ao desenvolvimento de cultivares mais produtivas, que requerem, no entanto, melhores tratamentos culturais, exigindo manejo mais intenso. Assim, sistemas que atendam tanto ao mercado *in natura* quanto à indústria, exigem manejo adequado, como a poda e a irrigação (SERRANO et al., 2007), e a aplicação de corretivos e fertilizantes (NATALE et al., 1996).

Sem dúvida, há possibilidades de aumento da participação da goiaba nas exportações brasileiras, mas, para tanto, é fundamental que haja maior racionalização do seu cultivo, desde o plantio, até cuidados imprescindíveis com os aspectos inerentes a apresentação e regularidade da oferta do produto no mercado internacional (GONGATTI NETTO et al., 1994).

No território nacional, as maiores regiões de cultivo de goiaba são o Sudeste e o Nordeste, sendo São Paulo e Pernambuco os maiores produtores (IBGE, 2012). Em São Paulo, os municípios de Monte Alto, Taquaritinga, Vista Alegre do Alto e Urupês respondem por 35% da produção de goiaba de todo o País (IBGE, 2012).

Essa região tem como vantagem a existência de agroindústrias localizadas nos municípios de Matão, Monte Alto, Taquaritinga e Vista Alegre do Alto (FRANCISCO et al., 2012).

A produção média dos pomares em São Paulo é de cerca de 14 t ha⁻¹ para mesa e de 25 t ha⁻¹ para a indústria (SÉRIE..., 2001), o que notoriamente configura baixa produtividade, atribuída, dentre outros fatores, à carência de informações acerca da nutrição, adubação e calagem da cultura (NATALE et al., 1996).

Nutrição mineral

As plantas, em geral, necessitam de elementos essenciais para o adequado crescimento e desenvolvimento, como C, H, O, provenientes do ar e da água, os quais compõem aproximadamente 95% da massa seca da planta. Além disso, necessitam, também, de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S), micronutrientes (Fe, Mn, Zn, Cu, B, Cl e Mo) (RAIJ, 1991) e elementos benéficos ou essenciais (Se, Co, Ni, Si) para certos grupos de plantas (MALAVOLTA, 2006).

A produtividade e a qualidade dos frutos de um pomar resultam da interação de vários fatores, destacando-se o potencial genético, assim como o manejo do solo, dos nutrientes e o balanço hídrico. Para a máxima produção e qualidade ótima dos frutos, é necessário que haja equilíbrio no fornecimento de nutrientes.

Apesar da expressiva produção de goiabas, são escassas as pesquisas sobre nutrição mineral dessa frutífera. De maneira geral, na literatura, a goiabeira tem sido considerada uma planta rústica, tolerante à acidez (GUERRERO, 1991) e pouco exigente em solo (PEREIRA; MARTINEZ JUNIOR, 1986). Segundo Clarkson (1985), essa frutífera apresenta alta capacidade e/ou eficiência de uso de nutrientes, quando cultivadas em solos com baixa fertilidade. Assim, é de se esperar que a planta possua baixa capacidade de resposta à aplicação do elemento, ou, à correção da acidez do solo. No entanto, Nachtigal et al. (1994) observaram que a goiabeira serrana, frutífera da família *Myrtaceae*, originária de solos ácidos e de baixa fertilidade, apresentou resposta positiva, quando submetida à melhoria da fertilidade

do solo. Portanto, para a obtenção de resultados econômicos satisfatórios em pomares comerciais, é necessário manter em níveis adequados a fertilidade do solo, promovendo aumentos substanciais na produção de frutos (NATALE, 1993).

A nutrição mineral representa um dos aspectos mais importantes para as fruteiras, assim como para a maioria das plantas. As exigências nutricionais da goiabeira são relativamente elevadas, porém, a pobreza dos solos onde são cultivadas torna obrigatória a aplicação da quase totalidade dos elementos minerais essenciais ao pleno desenvolvimento das plantas (NATALE, 1999).

O nitrogênio faz parte de aminoácidos, proteínas e ácidos nucleicos, e desempenha um papel importante em processos como a absorção iônica, a fotossíntese, a respiração, e a divisão e diferenciação celular (MALAVOLTA et al., 1989). Assim, é fundamental para a estrutura da planta, facilitando o crescimento, a floração, a frutificação e, conseqüentemente, a produtividade da goiabeira.

O fósforo está diretamente relacionado às funções estruturais e processos de transferência/armazenamento de energia, com papel fundamental também no processo de fotossíntese e de multiplicação e divisão celular. Assim, o desenvolvimento de frutíferas no momento de sua implantação é favorecido por fontes de fósforo disponíveis no solo, as quais estimulam o crescimento das raízes e, como reflexo, o desenvolvimento da parte aérea (MARSCHNER, 1995). Portanto, a baixa disponibilidade de fósforo no solo pode reduzir marcadamente o crescimento de mudas de goiabeiras (RODRIGUEZ et al., 1968; SALVADOR et al., 1998).

O potássio atua no mecanismo de turgor celular, no transporte de carboidratos e na qualidade do fruto (MARSCHNER, 1995). Embora o potássio não seja participante de nenhum composto orgânico vegetal, ele é importante no transporte e assimilação de carboidratos, que também são necessários na formação das paredes celulares. Dessa maneira, o potássio promove, pelo transporte de fotoassimilados, aumento no peso do fruto, e melhorias no sabor e na capacidade de armazenamento dos frutos da goiabeira. Assim, quando há um déficit no fornecimento de potássio, é de se esperar uma redução no crescimento do broto da goiabeira (RODRIGUEZ et al., 1968), já que há redução do metabolismo vegetal.

De modo geral, levando-se em consideração alguns trabalhos desenvolvidos com a goiabeira, pode-se afirmar que a exigência da frutífera em N e K é mais elevada que em P (BRASIL SOBRINHO et al., 1961;. HIROCE et al., 1977; KHANDUJA; GARG, 1980; MEDINA, 1988; QUEIROZ et al., 1986; NATALE, 1993; NATALE, 1999), o que não significa que a planta não necessite desse nutriente para adequado desenvolvimento. A adubação de árvores frutíferas deve considerar, ainda, a dificuldade em aliar a qualidade do produto colhido à produtividade, visto que o aspecto nutricional pode afetar características importantes do fruto como cor, sabor, tamanho, dentre outras (MALAVOLTA, 1994). Assim, o aumento da produção, à custa da elevação das doses de fertilizante, pode provocar redução na qualidade dos frutos, afetando o tamanho, a resistência ao transporte e armazenamento, a coloração interna e externa e o teor de sólidos solúveis (MALAVOLTA, 1989).

Concentrações excessivas de um elemento no solo podem acarretar redução na absorção ou mesmo impedimento na utilização de outro elemento. Desse modo, faz-se necessário o estudo da interação de nutrientes, desde a utilização de dados de produção até estudos sobre o comportamento bioquímico nas plantas (NATALE, 1993).

Calagem

É sabido que os solos brasileiros, em sua maioria, são ácidos e com baixa fertilidade, em função do material de origem e do processo de intemperismo intenso que sofreram. Assim, esses solos caracterizam-se por possuírem baixas concentrações de Ca e Mg e altas quantidades de Al e Mn, além de menor disponibilidade de outros nutrientes e maior adsorção de P, fatores esses que limitam o adequado crescimento e desenvolvimento da goiabeira.

Diversos fatores podem ser apontados como responsáveis pela baixa produtividade das culturas nas áreas tropicais, destacando-se a limitada capacidade dos solos em atender às exigências nutricionais das plantas e ao manejo inadequado da calagem e da adubação das culturas (NATALE, 2009). Assim, um

dos fatores determinantes do aumento de produtividade das culturas é o atendimento das exigências nutricionais dos vegetais, especialmente através da calagem e da adubação.

Além disso, em função do melhoramento genético, as plantas passaram a produzir mais e com qualidade superior, porém, sua exigência em nutrientes também aumentou. Contudo, os solos brasileiros são naturalmente pobres em termos de fertilidade e são submetidos à constante exploração, levando-os à exaustão. Portanto, a calagem e a adubação são imposições à exploração agrícola de forma sustentável e à conservação do solo como recurso natural (NATALE, 2009).

Os pomares de frutas são explorações agrícolas de longo prazo, cujas raízes das plantas permanecem praticamente restritas ao mesmo volume de solo por vários anos. Além disso, a acidez do solo é reconhecidamente um dos principais fatores da baixa produtividade das culturas (RAIJ, 1991). Assim, a prévia incorporação homogênea do calcário em profundidade proporcionará ambiente adequado ao crescimento radicular, o que possibilitará um eficiente aproveitamento de água e de nutrientes contidos nas camadas corrigidas, afetando positivamente o desenvolvimento e o estado nutricional da frutífera, tendo como consequência o uso racional de fertilizantes e a melhoria da relação benefício/custo, através do incremento da produtividade (NATALE, 2009).

A importância do sistema radicular das plantas é óbvia, visto existir uma estreita dependência entre o desenvolvimento das raízes e a formação da parte aérea. O maior ou menor êxito da aplicação de calcário depende, por sua vez, da natureza do sistema radicular e do volume de solo efetivamente explorado pela cultura. Assim, corrigir a acidez do solo é o modo mais eficiente de eliminar as barreiras químicas ao pleno desenvolvimento das raízes e, em consequência, da planta (PRADO, 2003).

Em solos ácidos, com elevada saturação por alumínio, a calagem promove a precipitação do Al das camadas superficiais, possibilitando a proliferação intensa das raízes, com reflexos positivos no crescimento das plantas. Além disso, a calagem fornece quantidades consideráveis de cálcio e magnésio, que são macronutrientes fundamentais no desenvolvimento da goiabeira.

Uma das principais funções do cálcio é estrutural, como integrante da parede celular, interferindo na formação da pectina e na organização da lamela média, podendo influenciar na textura, firmeza e maturação dos frutos da goiabeira (MENGEL; KIRKBY, 2000). Apresenta, também, função de ativador enzimático, influenciando e favorecendo diversos processos metabólicos na frutífera, contribuindo assim, para o adequado desenvolvimento da goiabeira.

Entre as principais funções do magnésio nas plantas, destacam-se as de ativador enzimático e estruturais, participando na constituição da clorofila. A baixa disponibilidade de magnésio causa, portanto, diminuição na síntese de clorofila e, conseqüentemente, na taxa fotossintética. Assim, com a diminuição da síntese de carboidratos nas folhas, ocorre uma diminuição marcante no crescimento da goiabeira (RODRIGUEZ, et al., 1968).

A calagem promove, também, aumento dos teores de sólidos solúveis no fruto, possibilitando, assim, atingir o ponto de colheita mais precocemente (PARO et al., 1994). Portanto, a aplicação de calcário é fundamental para a obtenção de alta produtividade, com qualidade.

Desse modo, conhecer os fatores limitantes à produção de goiabas permite a adoção de programas de calagem e adubação mais racionais, visando à melhoria do estado nutricional e, conseqüentemente, da produtividade, com benefícios em toda a cadeia agrícola (NATALE, 2009).

Diagnose nutricional

I. Avaliação da fertilidade do solo

A análise química de solo é o método mais antigo e tradicionalmente usado para a avaliação da fertilidade do solo e, através dela, pode-se estabelecer a necessidade de correção e de adubação das culturas. A sua interpretação baseia-se apenas na formação e manutenção de níveis suficientes de nutrientes disponíveis (McLEAN, 1984). No entanto, é difícil estabelecer corretamente a dose adequada de

nutrientes, já que o solo é um meio complexo, heterogêneo, onde ocorrem inúmeras reações químicas, físicas e microbiológicas, e onde os nutrientes interagem, além das interações complexas que ocorrem entre o clima, fontes de nutrientes, solos e plantas, o que pode influenciar a disponibilidade e o aproveitamento dos nutrientes adicionados com a aplicação de fertilizantes. Apesar da infinidade de interações existentes entre os nutrientes no solo (MALAVOLTA, 2006), a observação do equilíbrio entre os elementos não faz parte do procedimento de análise de solo.

Os conceitos mais comuns utilizados na interpretação da análise de solo são o de intensidade e equilíbrio de nutrientes e o da taxa de saturação por bases catiônicas. O conceito de intensidade e equilíbrio de nutrientes, muito aplicado às culturas hortícolas, utiliza nutrientes solúveis e concentrações totais de sais para fins de diagnose (GERALDSON, 1957; 1970; 1984). Já o conceito da taxa de saturação por bases catiônicas, utilizado mais para as culturas agronômicas, é uma abordagem do equilíbrio dos cátions trocáveis e da acidez potencial, que interagem entre si na capacidade de troca catiônica (CTC), expresso por duplas relações, tais como K/Ca, K/Mg e Ca/Mg (McLEAN et al., 1983; McLEAN, 1984), apesar de não haver evidências experimentais sobre quais seriam as relações catiônicas “ideais” do solo (LIEBHARDT, 1981; KOPITKE; MENZIES, 2007).

A base de dados decorrente dessas abordagens é composicional, isto é, os dados são expressos como porcentagem. Então, conseqüentemente, tornam-se abordagens conceitualmente tendenciosas, já que são influenciadas pela dependência de escala, pela redundância e pela distribuição não-normal dos dados (PARENT et al., 2011).

As relações K-Ca-Mg podem ser ilustradas por diagramas ternários, onde um componente pode ser omitido e calculado pela diferença entre 100% e a soma dos outros dois. Como o terceiro componente sempre será redundante, há então apenas dois graus de liberdade para diagnosticar um sistema K-Ca-Mg. Se mais componentes forem adicionados, como, por exemplo, a acidez potencial ou o sódio (Na), o diagnóstico deve ser realizado utilizando-se D-1 graus de liberdade, evitando essa redundância (EGOZCUE; PAWLOWSKY-GLAHN, 2005).

Assim, qualquer proporção que afeta outra, em caso de alteração, gera pelo menos uma correlação espúria. Alguns autores já haviam observado e relatado o

problema de correlações espúrias entre as proporções de componentes e as proporções relativas a uma escala de medida, por exemplo, base de matéria seca, matéria fresca ou orgânica (PEARSON, 1897; TANNER, 1949; CHAYES, 1960). Assim, as correlações espúrias irão distorcer modelos estatísticos lineares, já que afetam a matriz de covariância, podendo até mesmo produzir resultados contraditórios (PARENT et al., 2011).

Em contraste com os dados reais, que estão livres para se moverem no espaço real $\pm \infty$, os dados composicionais apresentam distribuição não-normal, dentro de seu espaço fechado entre 0 e 100%, já que os limites inferior e superior do intervalo de confiança não podem ser negativos ou superiores a 100% (DIAZ-ZORITA et al., 2002; WELTJE, 2002). No entanto, as razões de log podem assumir valores negativos ou positivos, variando livremente no espaço real $\pm \infty$, assim sua transformação é importante para manter as proporções dentro do espaço fechado.

Diversas transformações podem ser utilizadas para os dados composicionais, como a transformação da razão log aditiva (*alr*), da razão log centralizada (*clr*) (AITCHISON, 1986) e da razão log isométrica (*ilr*) (EGOZCUE et al., 2003). A razão log centralizada tem sido utilizada em estudos sobre nutrição de plantas (PARENT; DAFIR, 1992; PARENT et al., 2009), solução do solo (PARENT et al., 1997) e hidroponia (LOPEZ et al., 2002). As transformações da razão log isométrica (*ilr*) são baseadas em D-1 balanços organizados ortogonalmente, sendo então uma abordagem imparcial e não tendenciosa, (D-1 graus de liberdade), preservando todas as informações contidas no vetor composicional, graças ao princípio da ortogonalidade. O conceito *ilr* foi testado com sucesso em geociências (BUCCIANTI, 2011), assim como em estudos de nutrição de plantas (PARENT, 2011), de decomposição de resíduos orgânicos (PARENT et al., 2011) e de agregação do solo (PARENT et al., 2012).

II. Avaliação da nutrição mineral vegetal

A análise foliar é o critério mais apropriado para determinar o estado nutricional das plantas perenes, quando comparado com a análise de solo (CHADHA et al., 1973), tornando-se uma das mais importantes ferramentas nas pesquisas sobre nutrição mineral de plantas frutíferas, não apenas por determinar as respostas aos nutrientes aplicados ou confirmar os sintomas de deficiência, mas, também, por servir como um critério auxiliar nas recomendações de adubação. Além disso, possui vantagem em relação à análise de solo como ferramenta de diagnose, já que as culturas perenes, como a goiabeira, por terem sistema radicular profundo, têm acesso a mais nutrientes no solo em profundidade do que seria encontrado através de procedimentos normais de análise do solo (SMITH et al., 1985).

A ideia fundamental por trás da análise de tecidos vegetais é que a quantidade de nutrientes absorvidos pela planta reflete a quantidade disponível desses nutrientes no solo (LUNDEGÅRDH, 1943), sendo que mudanças no fornecimento de nutrientes têm reflexos nos teores desses elementos no tecido vegetal (BOULD, 1968). Um dos fundamentos da diagnose foliar parte da premissa de que é nas folhas que ocorre a maioria dos processos fisiológicos e metabólicos, devendo seu teor mineral estar sempre relacionado com o desenvolvimento e o aumento da produção (SALVADOR et al., 1999). Para atender aos requisitos de produção e qualidade, os nutrientes devem estar contidos nas folhas, não somente em concentração adequada, mas, também, em uma relação equilibrada (MALAVOLTA et al., 1997). A análise de tecido vegetal e seus respectivos métodos de interpretação, normalmente utilizados para diagnosticar o estado nutricional das plantas, são específicos para cada cultura, assim como para o tecido analisado e fase de crescimento da planta (BATES, 1971; BEAUFILS, 1973; PARENT; DAFIR, 1992), podendo os teores de nutrientes serem afetados pela idade da folha, carga da colheita, época e tamanho da amostra. Assim, o diagnóstico de nutrientes nos tecidos vegetais requer métodos padronizados de amostragem e de análises de rotina, valores de nutrientes-padrão e uma interpretação padronizada imparcial dos resultados analíticos para realização de recomendações de adubação

(KENWORTHY, 1983). Entretanto, os teores-padrão de nutrientes foram criticados por não considerarem as interações entre os elementos (BATES, 1971), uma vez que várias interações duplas e múltiplas têm sido documentadas em plantas (BERGMANN, 1988; MALAVOLTA, 2006).

Os conceitos de nível crítico de nutrientes (BATES, 1971), Sistema Integrado de Diagnose e Recomendação (DRIS) (BEAUFILS, 1973) e Diagnóstico da Composição Nutricional (CND) (PARENT; DAFIR, 1992) são os conceitos mais utilizados na interpretação da análise do tecido vegetal.

No conceito do nível crítico de nutrientes, o teor de um elemento no tecido vegetal deve ser superior a um certo teor mínimo ou a um certo teor crítico para o máximo crescimento e desenvolvimento da cultura. Porém, o teor crítico dos elementos declina durante o crescimento das plantas, devido ao efeito de diluição (BÉLANGER et al., 2001). Relações entre o teor de nutrientes e matéria seca das plantas são, portanto, influenciadas pela época de crescimento da cultura (BÉLANGER et al., 2001). No entanto, o nível crítico de nutrientes não considera o fato de que a composição da folha constitui um espaço de informação fechada, delimitada apenas à unidade de medição, onde todos os nutrientes interagem.

O DRIS utiliza duplas relações de nutrientes, podendo explicar, em parte, as interações entre elementos (WALWORTH; SUMNER, 1988); porém, é geometricamente deficiente, conforme descrito em Parent (2011). O CND utiliza a transformação da razão log centralizada (PARENT; DAFIR, 1992), usada para analisar dados composicionais, como os teores de nutrientes (AITCHISON, 1986), para tentar corrigir e ajustar o procedimento DRIS.

A interação entre nutrientes ocorre quando um elemento impede ou interfere na absorção de outro (BATES, 1971). Os nutrientes podem, também, ser acumulados como consumo de luxo, ou em níveis excessivos, em detrimento de outros componentes. Como os nutrientes absorvidos pela planta interagem dentro dos limites físicos do tecido vegetal, podem gerar correlações espúrias. A transformação logarítmica proposta por Aitchison (1986) para a análise composicional, usada por Parent e Dafir (1992) e Parent et al. (2009) para fins de diagnose, pode reduzir as correlações espúrias entre os componentes do tecido vegetal.

A transformação da razão log isométrica (*ilr*) (EGOZCUE; PAWLOWSKI-GLAHN, 2005) é também uma das transformações logarítmicas que pode evitar a tendência numérica e a redundância inerente aos dados composicionais, reduzindo as correlações espúrias entre os componentes do tecido vegetal. As coordenadas *ilr* podem descrever as interações de nutrientes ao longo de eixos ortonormais, assim como o balanço de nutrientes, como uma distância de normas de nutrientes nos mesmos eixos. Assim, a análise de tecidos e os métodos de interpretação podem proporcionar um diagnóstico do equilíbrio nutricional das plantas através dos diferentes estágios de crescimento.

Referências

AITCHISON, J. **The statistical analysis of compositional data**. London: Chapman & Hall, 1986. 416 p.

ANJANEYULU, K.; RAGHUPATHI, H. B. Identification of yield-limiting nutrients through DRIS leaf nutrient norms and indices in guava (*Psidium guajava*). **Indian Journal of Agricultural Sciences**, New Delhi, v. 79, p. 418-421, 2009.

ARORA, J. S.; SINGH, J. R. Effect of nitrogen, phosphorus and potassium sprays on guava (*Psidium guajava* L.). **Journal of the Japanese Society for Horticultural Science**, Kyoto, v. 39, p. 55-62, 1970.

BATES, T. E. Factors affecting critical nutrient concentrations in plants and their evaluation: a review. **Soil Science**, Baltimore, v. 112, p. 116-130, 1971.

BEAUFILS, E. R. **Diagnosis and recommendation integrated system (DRIS)**. Pietermaritzburg: University of Natal, 1973. 132 p.

BÉLANGER, G.; WALSH, J. R.; RICHARDS, J. E.; MILBURN, P. H.; ZIADI, N. Critical nitrogen curve and nitrogen nutrition index for potato in Eastern Canada. **American Journal of Potato Research**, Orono, v. 78, p. 355-364, 2001.

BERGMANN, W. **Ernährungs-störungen bei Kulturpflanzen**. 2nd. ed. Stuttgart: Auflage, Gustav Fischer Verlag, 1988. 762 p.

BOULD, C. Leaf analysis as a diagnostic method and advisory aid in crop production. **Experimental Agriculture**, Dundee, v. 4, p. 17-27, 1968.

BRASIL SOBRINHO, M. O. C.; MELLO, F. A. F.; HAAG, H. P.; LEME JR., J. A composição química da goiabeira (*Psidium guajava* L.). **Anais da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**, Piracicaba, v. 18, p. 183-192, 1961.

BUAINAIN, A. M.; BATALHA, M. O. **Cadeia produtiva de frutas**. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Secretaria de Política Agrícola, Instituto Interamericano de Cooperação para a Agricultura. Brasília: IICA, MAPA/SPA, 2007. 102 p.

BUCCIANTI, A. Natural laws governing the distribution of the elements in geochemistry: the role of the log-ratio approach. In: PAWLOWSKY-GLAHN, V.; BUCCIANTI, A. (Eds). **Compositional data analysis: theory and applications**. New York: John Wiley and Sons, 2011. p. 255-266.

CHADHA, K. L.; ARORA, J. S.; RAVEL, P.; SHIKHAMANY, S. D. Variation in the mineral composition of the leaves of guava (*Psidium guajava* L.) as affected by leaf position, season and sample size. **Indian Journal of Agricultural Science**, New Delhi, v. 43, p. 555-561, 1973.

CHAYES, F. On correlation between variables of constant sum. **Journal of Geophysical Research**, Washington, v. 65, p. 4185-4193, 1960.

CLARKSON, D. T. Factors affecting mineral nutrients acquisition by plants. **Annual Review of Plant Physiology**, Palo Alto, v. 36, p. 77-115, 1985.

DIAZ-ZORITA, M.; PERFECT, E.; GROVE, J. H. Disruptive methods for assessing soil structure. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 64, p. 3-22, 2002.

EGOZCUE, J. J.; PAWLOWSKY-GLAHN, V. Groups of parts and their balances in compositional data analysis. **Mathematical Geology**, New York, v.37, p. 795-828, 2005.

EGOZCUE, J. J.; PAWLOWSKY-GLAHN, V.; MATEU-FIGUERAS, G.; BARCELÓ-VIDAL, C. Isometric log-ratio transformations for compositional data analysis. **Mathematical Geology**, New York, v. 35, p. 279-300, 2003.

FAO – Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação. **Production**. Disponível em: <<http://www.fao.org/>>. Acesso em 29 abr. 2012.

FRANCISCO, V. L. F. S.; BAPTISTELLA, C. S. L.; AMARO, A. A. **A cultura da goiaba no Estado de São Paulo**. Disponível em: <<http://www.iea.sp.gov.br>>. Acesso em: 15 jun. 2012.

GERALDSON, C. M. Factors affecting calcium nutrition of celery, tomato and pepper. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 21, p. 621-625, 1957.

GERALDSON, C. M. Intensity and balance concept as an approach to optimal vegetable production. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 1, p. 187-196, 1970.

GERALDSON, C. M. Nutrient intensity and balance. In: STELLY, M. (Ed.). **Soil testing: correlating and interpreting analytical results**. Madison: American Society of Agronomy, 1984. p. 75-84.

GONGATTI NETO, G. A.; GARCIA, A. E.; ARDITO, E. F. G.; GARCIA, E. C.; BLEINROTH, E. W.; MATALLO, M.; CHITARRA, M. I. F.; BORADIM, M. R. **Goiaba para exportação: procedimentos de colheita e pós-colheita**. Brasília: Embrapa – SPI, 1994. 35 p.

GONZAGA NETO, L. **Frutas do Brasil: goiaba – produção**. Brasília: Embrapa, 2001. 72 p.

GUERRERO, R. La acidez del suelo – su naturaleza, sus implicaciones y su manejo. In: MOJICA, F. S. (Ed.). **Fundamentos para la interpretación de análisis de suelos, plantas y aguas para riego**. Bogota: SCCS, 1991. p. 141-163.

HIROCE, R.; CARVALHO, A. M. de; BATAGLIA, O. C.; FURLANI, P. R.; FURLANI, A. M. C.; SANTOS, R. R. dos; PARIQUERA, E. E. de; GALLO, J. R. Composição mineral de frutas tropicais na colheita. **Bragantia**, Campinas, v. 36, p. 155-164, 1977.

IBGE – **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br/cgi-bin/prtabl>>. Acesso em: 19 abr. 2012.

IBRAF - Instituto Brasileiro de Frutas. **Fruticultura**: síntese. Disponível em:<<http://www.ibraf.org.br/x-es/f-esta.html>>. Acesso em: 13 mar. 2012.

IEA – Instituto de Economia Agrícola. **A cultura da goiaba em São Paulo**. 2005. Disponível em: <<http://www.iea.sp.gov.br/out/verTexto.php?codTexto=1902>>. Acesso em: 05 fev. 2012.

KENWORTHY, A. L. Leaf analysis as an aid in fertilizing orchards. In: WALSH, L. M.; BEATON, J. D. (Eds.). **Soil testing and plant analysis**. Revised edition, 5th printing. Madison: Soil Science Society of America, 1983. p. 381-392

KHANDUJA, S. D.; GARG, V. K. Nutritional status of guava (*Psidium guajava* L.) trees in North India. **Journal of Horticultural Science**, Ashford, v. 55, p. 433-435, 1980.

KOLLER, O. M. **Cultura da goiabeira**. Porto Alegre: Agropecuária, 1979. 44 p.

KOPITTKKE, P. M.; MENZIES, N. W. A review of the use of the basic cation saturation ratio and the “ideal” soil. **Soil Science Society of America Journal**, Wiscosin, v. 71, p. 259-265, 2007.

LIEBHARDT, W. C. The basic cation saturation ratio concept and lime and potassium recommendations on Delaware’s Coastal Plain soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 45, p. 544-549, 1981.

LOPEZ, J.; PARENT, L. E.; TREMBLAY, N.; GOSSELIN, A. Sulfate accumulation and Ca balance in hydroponic tomato culture. **Journal of Plant Nutrition**, Athens, v. 25, p. 1585-1597, 2002.

LUNDEGÅRDH, H. Leaf analysis as a guide for soil fertility. **Nature**, London, v. 151, p. 310-311, 1943.

MALAVOLTA, E. **ABC da Adubação**. 5ª. ed. São Paulo: Agronômica Ceres Ltda., 1989. 292 p.

MALAVOLTA, E. Leaf analysis in Brazil - present and perspectives. In: VII INTERNATIONAL CITRUS CONGRESS, 2., 1994, Acireale. **Anais...** Acireale, Itália, 1994, p. 570-574.

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

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas**: princípios e aplicações. 2.ed. Piracicaba: POTAFOS, 1997. 319 p.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. de. **Avaliação do estado nutricional das plantas**: princípios e aplicações. Piracicaba: POTAFOS, 1989. 201 p.

MANICA, I.; ICUMA, I.; JUNQUEIRA, N. T. V.; SALVADOR, J. O.; MOREIRA, A.; MALAVOLTA, E. **Fruticultura tropical**: goiaba. Porto Alegre: Cinco Continentes, 2000. 374 p.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2. ed. London: Academic Press, 1995. 889 p.

McLEAN, E. O. Contrasting concepts in soil test interpretation: sufficiency levels of available nutrients versus basic cation saturation ratios. In: STELLY, M. (Ed.). **Soil testing**: correlating and interpreting the analytical results. Madison: American Society of Agronomy, 1984. p. 39-54.

McLEAN, E. O.; HARTWIG, R. C.; ECKERT, D. J.; TRIPLETT, G. B. Basic cation saturation ratios as a basis for fertilizing and liming agronomic crops. II. Field studies. **Agronomy Journal**, Madison, v. 75, p. 635-639, 1983.

MEDINA, J. C.; Goiaba - cultura. In: ITAL. **Goiaba**: cultura, matéria prima, processamento e aspectos econômicos. 2.ed. Campinas: ITAL; Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, 1988. p. 1-120.

MENGEL, K.; KIRKBY, E. A. **Principios de nutrición vegetal**. Basel, Switzerland: International Potash Institute, 2000. 692 p.

NACHTIGAL, J. C.; KLUGE, R. A.; ROSSAL, P. A. L.; VAHL, L. C.; HOFFMANN, A. Efeito do fósforo no desenvolvimento inicial de mudas de goiabeira serrana. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 51, p. 279-283, 1994.

NATALE, W. Adubação, nutrição e calagem na goiabeira. In: NATALE, W.; ROZANE, D. E.; SOUZA, H. A.; AMORIM, D. A. **Cultura da goiaba**. 2. vol. Jaboticabal: FCAV, Capes, CNPq, FAPESP, Fundunesp, SBF, 2009. 284 p.

NATALE, W. **Diagnose da nutrição nitrogenada e potássica em duas cultivares de goiabeira (*Psidium guajava* L.), durante três anos**. 1993. 150 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1993.

NATALE, W. **Resposta da goiabeira à adubação fosfatada**. 1999. 132 p. Tese de Livre-Docência - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias - Unesp, Jaboticabal, 1999.

NATALE, W.; COUTINHO, E. L. M.; BOARETTO, A. E. PEREIRA, F. M. Effect of potassium fertilization in 'Rica' guava cultivation. **Indian Journal of Agricultural Sciences**, New Delhi, v. 66, p. 201-207, 1996.

NATALE, W.; COUTINHO, E. L. M.; BOARETTO, A. E.; BANZATTO, D. A. Phosphorus foliar fertilization in guava trees. In: TAGLIAVINI, M. (Ed.). Proceedings ISHS on Foliar Nutrition, **Acta Horticulturae**, Bologna, v. 594, p. 171-177, 2002a.

NATALE, W.; COUTINHO, E. L. M.; BOARETTO, A. E.; BANZATTO, D. A. Nutrient foliar content for high productivity cultivars of guava in Brazil. In: TAGLIAVINI, M. (Ed.). Proceedings ISHS on Foliar Nutrition, **Acta Horticulturae**, Bologna, v. 594, p. 383-386, 2002b.

NATALE, W.; COUTINHO, E. L. M.; BOARETTO, A. E.; CENTURION, J. F. Resposta da goiabeira (*Psidium guajava* L.) cv. Paluma em formação à adubação fosfatada. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 23, p. 92-96, 2001.

NATALE, W.; COUTINHO, E. L. M.; BOARETTO, A. E.; PEREIRA, F. M. La fertilisation azotée du goyavier. **Fruits**, Paris, v. 49, p. 205-210, 1994.

NATALE, W.; PRADO, R. M.; MÔRO, F. V. Alterações anatômicas induzidas pelo cálcio na parede celular de frutos de goiabeira. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 40, p. 1239-1242, 2005.

NATALE, W.; PRADO, R. M.; ROZANE, D. E.; ROMUALDO, L. M. Efeitos da calagem na fertilidade do solo e na nutrição e produtividade da goiabeira. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 31, p. 1475-1485, 2007.

OSMAN, S. M.; ABD EL-RAHMAN, A. E. M. Effect of slow release nitrogen fertilization on growth and fruiting of guava under Mid Sinai conditions. **Australian Journal of Basic and Applied Science**, Pakistan, v. 3, p. 4366-4375, 2009.

PARENT, L. E. Diagnosis of the nutrient compositional space of fruit crops. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 33, p. 321-334, 2011.

PARENT, L. E.; CISSÉ, S.; TREMBLAY, N.; BÉLAIR, G. Row-centred log ratios as nutrient indexes for saturated extracts of organic soils. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 77, p. 571-578, 1997.

PARENT, L. E.; DAFIR, M. A theoretical concept of compositional nutrient diagnosis. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, Mount Vernon, v.117, p.239-242, 1992.

PARENT, L. E.; de ALMEIDA, C. X.; PARENT, S. E.; HERNANDES, A.; EGOZCUE, J. J.; KÄTTERER, T.; GÜLSER, C.; BOLINDER, M. A.; ANDRÉN, O.; ANCTIL, F.; CENTURION, J. F.; NATALE, W. Compositional analysis for an unbiased measure of soil aggregation. **Geoderma**, Amsterdam, v. 179, p. 123-131, 2012.

PARENT, L. E.; NATALE, W.; ZIADI, N. Compositional nutrient diagnosis of corn using the Mahalanobis distance as nutrient imbalance index. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 89, p. 383-390, 2009.

PARENT, S. E.; KARAM, A.; PARENT, L. E. Compositional modeling of C mineralization of organic materials in soils. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM OF AGRICULTURAL WASTE MANAGEMENT, 2., 2011, Foz do Iguaçu. **Proceedings...**, Foz do Iguaçu, Brazil, 2011.

PARO, M.; VITTI, G. C.; DONADIO, L. C.; SEMPIONATO, O. R. Influência da utilização de dois corretivos agrícolas, calcário e o gesso na qualidade do fruto de laranja pêra. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE FRUTICULTURA, 13., 1994, Salvador. **Anais...** Salvador: Sociedade Brasileira de Fruticultura, 1994. p. 511-512.

PEARSON, K. Mathematical contributions to the theory of evolution - On a form of spurious correlation which may arise when indices are used in the measurement of organs. **Proceedings of the Royal Society of London**, London, v. LX, p. 489-502, 1897.

PEREIRA, F. M.; MARTINEZ JUNIOR, M. **Goiabas para industrialização**. Jaboticabal: Legis Summa, 1986, 142 p.

PEREIRA, F. M.; NACHITIGAL, J. C. Propagação da goiabeira. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE A CULTURA DA GOIABEIRA, 1., 1997, Jaboticabal. **Anais...**, Jaboticabal: FCAV/Unesp, 1997. p. 17-32.

PRADO, R. M. **Efeitos da calagem no desenvolvimento, no estado nutricional e na produção de frutos da goiabeira e da caramboleira.** 2003. 68 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2003.

PRADO, R. M.; NATALE, W. Calagem na nutrição de cálcio e no desenvolvimento do sistema radicular da goiabeira. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, p. 1007-1012, 2004.

PRADO, R. M.; NATALE, W. Effect of liming on the mineral nutrition and yield of growing guava trees in a typic Hapludox soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Philadelphia, v. 39, p. 2191-2204, 2008.

PRADO, R. M.; NATALE, W.; SILVA, J. A. A. Liming and quality of guava fruit cultivated in Brasil. **Scientia Horticulturae**, Amsterdam, v. 104, p. 1-102, 2005.

QUEIROZ, E. F.; KLIEMANN, H. J.; VIEIRA, A.; RODRIGUES, A. P. M.; GUILHERME, M. R. Nutrição mineral e adubação da goiabeira (*Psidium guajava* L.). In: HAAG, H. P. (Ed.). **Nutrição mineral e adubação de fruteiras tropicais no Brasil.** Campinas: Fundação Cargill, 1986. p.165-187.

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e adubação.** Piracicaba: Ceres, Potafos, 1991. 343 p.

RODRIGUEZ, J. S.; CIBES, N. R.; GONZALEZ IBAÑEZ, J. Deficiency symptoms displayed in guajava (*Psidium guajava* L.) under greenhouse conditions. **University of Puerto Rico: Technical paper**, n. 44, 1968.

ROVIRA, L. A. El ciclo de vida productivo de losfrutales de tipo arbóreo em médio tropical y seus consecuenciasagro-economicas. **Fruits**, Paris, v. 43, p. 517-529, 1988.

ROZANE, D. E.; NATALE, W.; PRADO, R. M.; BARBOSA, J. C. Tamanho da amostra foliar para avaliação do estado nutricional de goiabeiras com e sem irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, p. 233-239, 2009.

SALVADOR, J. O.; MOREIRA, A.; MURAOKA, T. Deficiência nutricional em mudas de goiabeira decorrente da omissão simultânea de dois macronutrientes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 33, p. 1623-1631, 1998.

SALVADOR, J. O.; MOREIRA, A.; MURAOKA, T. Efeito da omissão combinada de N, P, K e S nos teores foliares de macronutrientes em mudas de goiabeira. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 56, p. 501-507, 1999.

SÉRIE INFORMAÇÕES ESTATÍSTICAS DA AGRICULTURA: **Anuário IEA 2000**, São Paulo, v. 12, p. 19, 2001.

SERRANO, L. A. L.; MARINHO, C. S.; RONCHI, C. P.; LIMA, I. M.; MARTINS, M. V. V.; TARDIN, F. D. Goiabeira 'Paluma' sob diferentes sistemas de cultivo, épocas e intensidades de poda de frutificação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, p. 785-792, 2007.

SMITH, G. S.; ASHER, G. J.; CLARK, C. J. **Kiwifruit nutrition: diagnosis of nutritional disorders**. Southern Horticulture, 1985. 56 p.

SOUZA, H. A.; NATALE, W.; PRADO, R. M.; ROZANE, D. E.; ROMUALDO, L. M.; HERNANDES, A. Efeito da calagem sobre o crescimento de goiabeiras. **Revista Ceres**, Viçosa, MG, v. 56, p. 336-341, 2009.

TANNER, J. Fallacy of per-weight and per-surface area standards, and their relation to spurious correlation. **Journal of Applied Physiology**, Bethesda, v. 2, p. 1-15, 1949.

TODA FRUTA. **A cultura da goiaba**. Disponível em: <<http://www.todafruta.com.br/>>. Acesso em: 15 mai. 2012.

WALWORTH, J. L.; SUMNER, M. E. Foliar diagnosis: a review. **Advances in Plant Nutrition**, New York, v. 539, p. 193-240, 1988.

WELTJE, G. J. Quantitative analysis of dentrial modes: statistically rigorous confidence regions in ternary diagrams and their use in sedimentary petrology. **Earth Science Reviews**, [S.l.], v. 57, p. 211-253, 2002.

CAPÍTULO 2 – Equilíbrio catiônico do solo em pomares de goiabeiras

RESUMO – Para alcançar altas produtividades, a goiabeira (*Psidium guajava* L.) requer quantidades de fertilizantes nitrogenados e potássicos compatíveis com a estimativa de utilização desses nutrientes, levando-se também em consideração a disponibilidade desses elementos no solo. Porém, o conceito de saturação por bases da capacidade de troca catiônica (CTC), usado para fins de avaliação da fertilidade do solo, é tendencioso já que os dados do solo podem transmitir informações relativas e interagir dentro do espaço restrito da CTC, gerando correlações espúrias. Assim, o objetivo do trabalho foi avaliar um sistema de razões log isométricas (*ilr*) para corrigir tais distorções, viabilizando o manejo da adubação nitrogenada e potássica em pomares de goiabeiras. Foram utilizados dados de experimentos conduzidos durante três anos, sendo dois experimentos distintos com doses de N e K, em Argissolo e Latossolo. Os valores de K, Ca, Mg e da acidez potencial (H + Al) foram divididos em três partições binárias da seguinte forma: o balanço do solo [K | Ca, Mg, H + Al] para gerenciar a adubação potássica; o balanço do solo [Ca, Mg | H + Al] para monitorar a necessidade de calcário; e, o balanço do solo [Ca | Mg] para estabelecer o material de calagem. A fertilização nitrogenada diminuiu o balanço do solo [Ca, Mg | H + Al] devido à acidificação do solo. A fertilização potássica aumentou o balanço do solo [K | Ca, Mg, H + Al]. Os valores críticos de balanços do solo foram -2,10 para [K | Ca, Mg, H + Al], 1,28 para [Ca, Mg | H + Al] e 0,85 para [Ca | Mg], já que altos rendimentos na produção de goiaba (> 77 t ha⁻¹) foram obtidos com valores de balanços acima dos citados. As porcentagens de saturação da CTC foram 2,0% de K, 25% de Ca, 7,5% de Mg e 65% de (H + Al). O valor de pH (CaCl₂) crítico para a cultura da goiaba foi de 4,5. A manutenção do balanço no solo [K | Ca, Mg, H + Al] exige que as exportações de K pela colheita sejam compensadas por quantidades equivalentes de fertilizantes potássicos. Os balanços catiônicos críticos do solo foram definidos sem tendências numéricas, sendo então um ótimo índice de fertilidade do solo para o manejo da fertilização em pomares de goiabeiras.

Palavras-chave: análise composicional de dados, equilíbrio catiônico do solo, fertilidade do solo, geometria de Aitchison, *Psidium guajava* L., razões log isométrica (*ilr*)

Introdução

A goiabeira (*Psidium guajava* L.) requer quantidades substanciais de N e K para alcançar alta produtividade e qualidade de frutos (ARORA; SINGH, 1970; ANJANEYULU; RAGHUPATHI, 2009; OSMAN; ABD EL-RAHMAN, 2009). Entretanto, no Brasil, as recomendações de adubação para a goiabeira são baseadas em um número limitado de ensaios de campo e análises de solo e de folhas.

A interpretação das análises de solo baseia-se na formação e manutenção de níveis suficientes de nutrientes disponíveis (NSND) (McLEAN, 1984). O equilíbrio de nutrientes não faz parte dos procedimentos da análise de solo, apesar da infinidade de interações existentes entre os elementos que ocorrem na planta durante e após a absorção dos nutrientes (MALAVOLTA, 2006).

O conceito de intensidade e equilíbrio de nutrientes (CIEN) é um sistema de interpretação de equilíbrio iônico entre elementos solúveis e concentrações totais de sais no solo (GERALDSON, 1957; 1970; 1984). Por outro lado, o conceito de taxa da saturação por bases catiônicas (TSBC), utiliza duplas relações de cátions trocáveis, que permutam na capacidade de troca catiônica (CTC), tais como K/Ca, K/Mg e Ca/Mg (McLEAN et al., 1983; McLEAN, 1984). O último conceito tem sido criticado devido à escassez de evidências experimentais sobre quais seriam as relações catiônicas “ideais” do solo (LIEBHARDT, 1981; KOPITTKE; MENZIES, 2007). As abordagens NSND, CIEN e TSBC são conceitualmente tendenciosas, já que são intrinsicamente influenciadas pela dependência de escala, pela redundância e pela distribuição não-normal dos dados, uma vez que sua base de dados é composicional (isto é, são expressos como porcentagem).

Na verdade, os dados catiônicos do solo são dados multivariados estritamente positivos, fazendo parte do espaço composicional fechado da CTC (PARENT, 2011). Similar ao diagrama de textura do solo, as relações de K-Ca-Mg podem ser ilustradas por diagramas ternários, onde um componente é calculado pela diferença entre 100% e a soma dos outros dois. Assim, o terceiro componente sempre será redundante; então, para evitar essa redundância, o diagnóstico deve ser realizado utilizando D-1 graus de liberdade (EGOZCUE; PAWLOWSKY-GLAHN,

2005). As relações catiônicas não são uma solução, já que entre as relações K/Ca, K/Mg e Ca/Mg, derivadas do vetor composicional K-Ca-Mg, o terceiro componente pode ser determinado a partir dos outros dois, por exemplo, $K/Ca = [(K/Mg) / (Ca/Mg)]$.

O problema de correlações espúrias entre as proporções de componentes e as proporções relativas a uma escala de medida (tais como, base de matéria seca, matéria fresca ou orgânica), é bem conhecida e foi observada anteriormente por Pearson (1897), Tanner (1949) e Chayes (1960). Por exemplo, os resultados de uma análise multivariada irão variar de qualquer forma, não importando se a concentração das espécies catiônicas for expressa em base molar ou em massa. Uma vez que elas afetam a matriz de covariância, as correlações espúrias irão distorcer modelos estatísticos lineares e podem até mesmo produzir resultados contraditórios (PARENT et al., 2011).

Os dados composicionais apresentam distribuição não-normal, dentro de seu espaço fechado entre 0 e 100%, já que os limites inferior e superior do intervalo de confiança não podem ser negativos ou superiores a 100% (DIAZ-ZORITA et al., 2002; WELTJE, 2002). No entanto, as razões de log podem assumir valores negativos ou positivos, variando livremente no espaço real $\pm \infty$. Aitchison (1986) sugeriu usar as transformações da razão log aditiva (*alr*) e da razão log centralizada (*clr*) para os dados composicionais. A razão log centralizada tem sido utilizada em estudos sobre nutrição das plantas (PARENT; DAFIR, 1992; PARENT et al., 2009), solução do solo (PARENT et al., 1997) e hidroponia (LOPEZ et al., 2002). Egozcue et al. (2003) desenvolveram transformações da razão log isométrica (*ilr*), baseadas em D-1 balanços, organizados ortogonalmente. Essa abordagem é imparcial, não tendenciosa, (D-1 graus de liberdade), e preserva todas as informações contidas no vetor composicional graças ao princípio da ortogonalidade. O *ilr* foi considerado o método mais adequado para a condução de análises multivariadas, conforme demonstrado em Filzmoser e Hron (2011). O conceito *ilr* foi testado com sucesso em geociências (BUCCIANTI, 2011), assim como em estudos de nutrição de plantas (PARENT, 2011), de decomposição de resíduos orgânicos (PARENT et al., 2011) e de agregação do solo (PARENT et al., 2012). Porém, um conceito matemático

imparcial, não tendencioso, para diagnosticar o equilíbrio catiônico do solo nunca foi desenvolvido antes.

Assim, a hipótese do presente estudo é de que o diagnóstico do equilíbrio catiônico do solo utilizando o conceito *ilr* seja melhor que os diagnósticos decorrentes do uso de outras abordagens. Com isso, o objetivo deste trabalho foi monitorar as alterações do equilíbrio catiônico do solo, decorrentes da adubação nitrogenada e potássica, em pomares de goiabeiras das cultivares Rica e Paluma, utilizando o conceito imparcial *ilr*. Foi testado um esquema de balanços catiônicos arranjados de maneira a facilitar o manejo de fertilizantes K e de materiais de calagem contendo Ca e Mg, em pomares de goiabeiras, utilizando dados de análise de solo e a estimativa de utilização de nutrientes.

Material e métodos

Dados de experimentos conduzidos com a cultura da goiaba, realizados por Natale (1993) e Natale (1999), coletados durante o crescimento e desenvolvimento da cultura foram utilizados como base de dados para o atual estudo, com 260 observações.

Área experimental e tratamentos

Os experimentos foram conduzidos em dois pomares distintos de goiabeiras, durante três safras agrícolas consecutivas, compreendendo os anos de 1989 a 1992. Os experimentos de fertilização foram instalados em Jaboticabal (São Paulo), em um Argissolo Vermelho-Amarelo, argila de atividade baixa, eutrófico, abrupto, A moderado, textura arenosa/argilosa (EMBRAPA, 2006) e, em São Carlos (São Paulo), em um Latossolo Vermelho-Amarelo, epieutrófico, endodistrófico, A moderado, textura média, fase cerrado e relevo plano (EMBRAPA, 2006). Os pomares eram formados por goiabeiras de um ano de idade ‘Rica’ em Jaboticabal e ‘Paluma’ em São Carlos, duas importantes cultivares de goiabeira no Brasil (PEREIRA, 1984). Ambas as cultivares são precoces, vigorosas e produtivas. As doses de fertilizantes dos tratamentos foram distribuídas no primeiro ano do estabelecimento das plantas, sendo incrementadas proporcionalmente a cada ano, levando-se em conta a remoção de nutrientes pela colheita e, principalmente, o aumento da demanda por nutrientes decorrente do desenvolvimento das frutíferas.

Em ambas as áreas foram conduzidos experimentos distintos, sendo um experimento de adubação nitrogenada e outro de adubação potássica. A área de cada experimento foi de 3.360 m² em Jaboticabal, e de 3.920 m² em São Carlos. O delinamento experimental adotado foi em blocos casualizados com seis tratamentos (‘Rica’) e sete tratamentos (‘Paluma’), todos com quatro repetições. As parcelas foram constituídas de quatro plantas, em espaçamento de 7 m por 5 m, sendo que a primeira planta representou a bordadura, considerando apenas 3 plantas como úteis para fins de avaliação. O sistema de condução foi o de poda de limpeza e condução, com uma produção por ano, não irrigado.

No experimento de N, os tratamentos no primeiro ano foram zero, 30, 60, 120, 180 e 240 g de N planta⁻¹ em Jaboticabal e, zero, 30, 60, 120, 180, 240 e 300 g de N planta⁻¹ em São Carlos. A adubação nitrogenada foi suplementada com 120 g de P₂O₅ planta⁻¹ e, 120 g de K₂O planta⁻¹. As doses iniciais de N foram dobradas e triplicadas no segundo e no terceiro ano, respectivamente. As doses iniciais de P e K também foram dobradas no segundo ano. No terceiro ano, as doses foram 240 g de P₂O₅ planta⁻¹ e, 360 g de K₂O planta⁻¹. As fontes utilizadas foram nitrato de amônio (34% N), superfosfato simples (18% P₂O₅) e cloreto de potássio (60% K₂O).

No experimento de K, os tratamentos no primeiro ano foram zero, 30, 60, 120, 180 e 240 g de K₂O planta⁻¹ em Jaboticabal e, zero, 30, 60, 120, 180, 240 e 300 g de K₂O planta⁻¹ em São Carlos, juntamente com 120 g de N planta⁻¹ e, 120 g de P₂O₅ planta⁻¹. As doses de N, P e K foram dobradas no segundo ano. As doses de K foram triplicadas no terceiro ano e, suplementadas com 360 g de N planta⁻¹ e 240 g de P₂O₅ planta⁻¹. As fontes utilizadas foram sulfato de amônio (20% N), superfosfato triplo (44% P₂O₅) e cloreto de potássio (60% K₂O).

Os fertilizantes foram aplicados manualmente em uma faixa de 40 cm na projeção da copa. Durante a condução dos experimentos no campo foram realizados os tratos culturais normais, necessários ao bom desenvolvimento das plantas. Para avaliar a produção, os frutos foram colhidos de uma a três vezes por semana, de janeiro/fevereiro a maio/junho de cada ano.

Amostragem e análises químicas de solo

Os solos foram amostrados anualmente após a colheita, em quatro subamostras por planta (Norte, Sul, Leste e Oeste), nas camadas de 0-20 cm (durante os três anos do experimento) e 20-40 cm (apenas nos últimos dois anos), onde se encontra a maior parte do sistema radicular da goiabeira (FRACARO; PEREIRA, 2004), num total de 12 subamostras por parcela, a fim de constituir a amostra composta. As amostras de solo foram secas ao ar e analisadas para pH (CaCl₂), teores de matéria orgânica, K, Ca, Mg e H + Al (RAIJ et al., 1987). O K, Ca e Mg foram extraídos por resinas de troca e quantificados por espectrofotometria de

absorção atômica, sendo expressos em $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$. A acidez potencial ($H + Al$) foi quantificada pelo método tampão pH SMP (SHOEMAKER et al., 1961) e, pela equação de Quaggio et al. (1985), convertida em $\text{mmol}_c (H + Al) \text{ dm}^{-3}$:

$$(H + Al) = 10 \exp (7,76 + 1,053 pH_{SMP}); R^2 = 0,98 \quad 1)$$

A capacidade de troca catiônica (CTC) foi calculada pela soma das espécies catiônicas. A CTC foi de $54 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ no Latossolo ('Paluma') e de $41 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ no Argissolo ('Rica'), enquanto o teor de matéria orgânica foi de 19 e 22 g dm^{-3} , respectivamente, no início dos experimentos.

Balanço catiônico do solo

O espaço composicional (S) das espécies trocáveis foi definido da seguinte forma:

$$S^D = \mathcal{C} (K, Ca, Mg, H + Al) \quad 2)$$

em que D = quatro componentes e $\mathcal{C}$ é o operador de encerramento da função com referência à CTC.

As relações entre as espécies catiônicas foram projetadas no espaço Euclidiano, usando $D-1$ coordenadas ilr com base ortonormal, calculadas da seguinte forma (EGOZCUE et al., 2003):

$$ilr_j = \sqrt{\frac{rs}{r+s}} \ln \frac{g(c_+)}{g(c_-)} \text{ com } j = [1, 2, \dots, D - 1] \quad 3)$$

em que: ilr_j é a razão log isométrica j -ésima, r e s representam os números de componentes em grupos positivos (+) e negativos (−) em cada partição binária,

respectivamente, $g(c_+)$ é a média geométrica dos componentes nos grupos positivos c_+ , e $g(c_-)$ é a média geométrica dos componentes nos grupos negativos c_- (Tabela 1). O coeficiente $\sqrt{\frac{rs}{r+s}}$ representa o número de componentes nos grupos positivos e negativos. Como κ é a unidade de medida, as relações das partes dos grupos na equação 2 elimina o κ , tornando a escala das coordenadas ilr invariante e livre de correlações espúrias causadas pela dependência de escala. Valores positivos de ilr indicam que o grupo positivo classificado como positivo possui maior peso que o outro grupo, enquanto valores nulos indicam o mesmo peso.

Tabela 1. Partição binária sequencial dos componentes da CTC na base mmol_c

<i>ilr</i>	Cátions trocáveis				Balanço	$r^\dagger$	S	Cálculo <i>ilr</i>
	K	Ca	Mg	H+Al				
	Partição binária sequencial							
1	1	-1	-1	-1	[K Ca, Mg, H + Al]	1	3	$\sqrt{\frac{1 \times 3}{1 + 3}} \ln \left(\frac{K}{[Ca \times Mg \times (H + Al)]^{1/3}} \right)$
2	0	1	1	-1	[Ca, Mg H + Al]	2	1	$\sqrt{\frac{2 \times 1}{2 + 1}} \ln \left(\frac{(Ca \times Mg)^{1/2}}{H + Al} \right)$
3	0	1	-1	0	[Ca Mg]	1	1	$\sqrt{\frac{1 \times 1}{1 + 1}} \ln \left(\frac{Ca}{Mg} \right)$

$^\dagger r$ = número de sinais positivos e s = número de sinais negativos.

A partição binária sequencial (PBS) na Tabela 1 foi elaborada para facilitar a interpretação dos resultados. A adubação potássica foi equilibrada em oposição ao Ca, Mg e acidez potencial. Uma PBS do solo alternativa poderia ser um contraste entre as espécies catiônicas e a acidez potencial, ou seja, [K, Ca, Mg | H + Al], seguido pelos balanços do solo [K | Ca, Mg] e [Ca | Mg]. Essa PBS alternativa é uma representação do balanço das clássicas relações K/Mg, K/Ca e Ca/Mg, em que as relações potássicas são compactadas no balanço do solo [K | Ca, Mg]. A escolha da PBS depende do objetivo do estudo. A PBS escolhida na Tabela 1 foi selecionada para evidenciar o equilíbrio potássico e, as exigências em Ca e Mg, para determinar a necessidade de calagem, devido à acidificação pela adubação nitrogenada, principalmente.

Como exemplo, um solo apresentando 65% de Ca, 10% de Mg, 5% de K e 20% de acidez total (McLEAN, 1984) possui três coordenadas *ilr* (quatro componentes menos um), calculada como se segue:

$$ilr_1 = \sqrt{\frac{rs}{r+s}} \ln \frac{K}{[CaMg(H+Al)]^{1/3}} = \sqrt{\frac{1 \times 3}{1+3}} \ln \frac{5}{(65 \times 10 \times 20)^{1/3}} = -1,341 \quad 4)$$

em que $r = 1$ e $s = 3$.

A segunda coordenada contrasta os cátions divalentes e a acidez total, calculada da seguinte forma:

$$ilr_2 = \sqrt{\frac{rs}{r+s}} \ln \frac{(CaMg)^{1/2}}{(H+Al)} = \sqrt{\frac{2 \times 1}{2+1}} \ln \frac{(65 \times 10)^{1/2}}{20} = 0,198 \quad 5)$$

A terceira coordenada [Ca | Mg] mantém a ortogonalidade, sendo calculada da seguinte forma:

$$ilr_3 = \sqrt{\frac{rs}{r+s}} \ln \frac{Ca}{Mg} = \sqrt{\frac{1 \times 1}{1+1}} \ln \frac{65}{10} = 1,324 \quad 6)$$

Cálculos

A utilização de nutrientes entre os períodos de amostragem foi estimada como a quantidade de nutrientes adicionados na adubação, menos a quantidade de nutrientes exportados pela colheita. Segundo Natale et al. (2002), cada tonelada de fruta fresca da cultivar Rica remove 1.325 g N, 166 g P e 2.180 g K, enquanto a cultivar Paluma remove 1.179 g N, 121 g P e 1.554 g K.

Análises estatísticas

Os cálculos *ilr*, as análises discriminantes e as análises de correlações espúrias foram conduzidas no ambiente computacional do R estatístico (IHAKA; GENTLEMAN, 1996), que é um *software* gratuito, utilizando o pacote composicional (van den BOOGAART; TOLOSANA-DELGADO, 2008) para análise de dados composicionais. As correlações espúrias foram identificadas comparando o volume de solo ($\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$) ou a CTC (% saturação), como escalas de medição para espécies catiônicas.

Já as análises de variância foram conduzidas usando o PROC MIXED do SAS (*Statistical Analysis System*, versão 9.2., 2009), e suas significâncias foram verificadas pelo teste t.

Os valores críticos *ilr* foram obtidos utilizando-se o procedimento de Cate-Nelson, dividindo os pontos dos dados do gráfico que relaciona a produção de frutos e seus valores *ilr* correspondentes (NELSON; ANDERSON, 1984). Resumidamente, os pontos de dados foram distribuídos em quatro quadrantes, utilizando-se linhas cruzadas perpendiculares e paralelas aos eixos, que foram movidas através do gráfico, até que o número de pontos em quadrantes opostos fosse maximizado ou minimizado. As amostras dos pontos nos quadrantes foram interpretadas com referência ao desequilíbrio de nutrientes, como se segue (GLYNN; WEISBACH, 2012):

- Verdadeiro positivo (VP: desequilíbrio de nutrientes): safra desequilibrada (baixo rendimento), corretamente diagnosticada como desequilibrada (acima do valor crítico);
- Falso positivo (FP: erro do tipo I): safra equilibrada (alto rendimento), incorretamente identificada como desequilibrada (acima do valor crítico);
- Verdadeiro negativo (VN: equilíbrio de nutrientes): safra equilibrada (alto rendimento), corretamente diagnosticada como equilibrada (abaixo do valor crítico);

- Falso negativo (FN: erro do tipo II): safra desequilibrada (baixo rendimento), incorretamente identificada como equilibrada (abaixo do valor crítico).

Os balanços críticos do solo foram re-transformados para porcentagens, usando-se o pacote R-composicional e, para as unidades de concentração inicial ($\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$), empregando-se os valores da CTC. Como havia três balanços no solo e quatro componentes, o procedimento de cálculo define automaticamente a soma das espécies catiônicas em 100% da saturação da CTC para resolver um sistema de 4 equações com 4 incógnitas (os 3 *ilrs* e a soma de restrição).

Resultados e Discussão

Estudo de correlações

As espécies catiônicas, expressas na base de volume de solo (BVS) ou como saturação da CTC, apresentaram evidências de correlações espúrias (Tabelas 2 e 3).

Tabela 2. Correlações espúrias entre os cátions do solo expressos na base $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$

	K	Ca	Mg
K	-	0,54**	-0,01ns
Ca	-	-	0,44*
Mg	-	-	-

* significativo a 0,05 de probabilidade; ** significativo a 0,01 de probabilidade, ns: não significativo.

Tabela 3. Correlações espúrias entre os cátions do solo expressos na base% de saturação da CTC

	%K	%Ca	%Mg
%K	-	0,48*	-0,18ns
%Ca	-	-	0,22ns
%Mg	-	-	-

* significativo a 0,05 de probabilidade; ** significativo a 0,01 de probabilidade, ns: não significativo.

O coeficiente de correlação entre K e Ca foi 0,54** na base BVS e 0,48* na base CTC. O coeficiente de correlação entre K e Mg foi -0,01^{ns} na base BVS e -0,18^{ns} na base CTC. Finalmente, o coeficiente de correlação entre Ca e Mg foi 0,44* na base BVS e 0,22^{ns} na base CTC. Assim, os coeficientes de correlação variaram em magnitude e significância, dependendo da escala de medida, indicando correlações espúrias que podem levar a diferentes interpretações.

Uma vantagem adicional do conceito *ilr* é a invariância de escala. Mehlich (1973) levantou o problema de escalas de medição volumétrica ou gravimétrica em

análises de solo e, a parcialidade metodológica introduzida ao converter escalas usando um único valor de densidade aparente. A técnica *ilr* é, portanto, um meio eficaz para corrigir o problema da dependência de escala.

Produção de frutos e balanço catiônico do solo

A produção de frutos foi significativamente ($P \leq 0,05$) influenciada pelo ano, doses e suas interações, em ambas as áreas, enquanto os balanços de nutrientes do solo foram significativamente ($P \leq 0,05$) influenciados pelo ano e pelas doses de fertilizantes (Tabelas 4 a 7).

No experimento com doses de N, a produção aumentou linearmente no segundo ($y = 0,0656x + 17,824$; $R^2 = 0,90$) e terceiro anos ($y = 0,1456x + 27,189$; $R^2 = 0,90$) na cultivar Rica (Figura 1a) e, apenas no terceiro ano ($y = 0,0486x + 63,810$; $R^2 = 0,85$), na cultivar Paluma (Figura 1b). No experimento com doses de K, a produção aumentou de forma quadrática no terceiro ano com a cultivar Rica ($y = 0,0003x^2 + 0,0201x + 36,509$; $R^2 = 0,94$) (Figura 2a) e, de forma linear no terceiro ano ($y = 0,0716x + 65,260$; $R^2 = 0,73$), com a cultivar Paluma (Figura 2b). A produção aumentou anualmente até alcançar seu valor máximo no terceiro ano após o estabelecimento da cultura. Assim, se justifica que as doses de N e K tenham sido ajustadas anualmente durante o experimento, a fim de considerar as exportações por meio da colheita e, principalmente, para suprir a demanda da planta devido ao seu desenvolvimento.

A cultivar Paluma foi mais produtiva que a 'Rica', sendo que, no Brasil, muitos pomares de 'Paluma' produzem mais de 100 t de goiabas há^{-1} e, por isso, estão se expandindo.

Tabela 4. Análise de variância e valores de F sobre o efeito da adição de N na produtividade e no balanço catiônico do solo, em pomar de goiabeira ‘Rica’

Ano Produção		Camada 0-20 cm			Camada 20-40 cm		
		[K Ca, Mg, H+Al]	[Ca, Mg H+Al]	[Ca Mg]	[K Ca, Mg, H+Al]	[Ca, Mg H+Al]	[Ca Mg]
‘Rica’							
Ano (A)	-	249**	5,69 ^{ns}	0,01 ^{ns}	9,16 ^{ns}	6,58 ^{ns}	5,01 ^{ns} 4,39 ^{ns}
Doses (D)	-	33,4**	9,81**	20,48**	12,3**	18,04**	7,36** 8,60**
A x D	-	7,61**	0,67 ^{ns}	1,20 ^{ns}	1,76 ^{ns}	1,61 ^{ns}	0,31 ^{ns} 0,53 ^{ns}
	1	ns					
	2	8,08**	ns	ns	ns	ns	ns
	3	39,7**					
C vs. T†	1	ns					
	2	23,9**	25,22**	15,57**	7,99**	61,48**	ns
	3	116**					
Ajuste	1	ns					
	2	L††	Q	Q	L	Q	L
	3	L					
C.V. (%)		16,7	-1,2	-10,0	1,8	-0,9	-6,3 5,5

† C vs. T = Controle (dose zero) vs. Tratamentos fertilizados. †† Ajuste L = linear, Q = quadrático.

* significativo a 0,05 de probabilidade; ** significativo a 0,01 de probabilidade, ns: não significativo.

Tabela 5. Análise de variância e valores de F sobre o efeito da adição de N na produtividade e no balanço catiônico do solo, em pomar da goiabeira ‘Paluma’

Ano Produção		Camada 0-20 cm			Camada 20-40 cm			
		[K Ca, Mg, H+Al]	[Ca, Mg H+Al]	[Ca Mg]	[K Ca, Mg, H+Al]	[Ca, Mg H+Al]	[Ca Mg]	
‘Paluma’								
Ano (A)	-	641**	1,26 ^{ns}	146,76**	26,7**	0,46 ^{ns}	20,39*	10,77*
Dose (D)	-	2,16 ^{ns}	0,92 ^{ns}	20,36**	1,91 ^{ns}	2,42*	3,54**	3,35*
A x D	-	2,36**	0,13 ^{ns}	2,25 ^{ns}	2,03 ^{ns}	0,28 ^{ns}	0,54 ^{ns}	2,02 ^{ns}
	1	ns						
	2	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	3	5,57**						
C vs. T†	1	ns						
	2	ns	ns	24,68**	ns	ns	ns	ns
	3	7,15**						
Ajuste	1	ns						
	2	ns	ns	L††	ns	ns	L	L
	3	L††						
C.V. (%)	14,6	-1,1	-1,9	22,8	-1,4	-2,3	45,0	

† C vs. T = Controle (dose zero) vs. Tratamentos fertilizados. †† Ajuste L = linear, Q = quadrático.

* significativo a 0,05 de probabilidade; ** significativo a 0,01 de probabilidade, ns: não significativo.

Tabela 6. Análise de variância e valores de F sobre o efeito da adição de K na produtividade e no balanço catiônico do solo, em pomar da goiabeira ‘Rica’

	Ano	Produção	Camada 0-20 cm				Camada 20-40 cm			
			[K Ca, Mg, H+Al]				[K Ca, Mg, H+Al]			
			‘Rica’				[Ca Mg]			
Ano (A)	-	195**	4,75 ^{ns}	4,00 ^{ns}	4,25 ^{ns}	1,37 ^{ns}	1,76 ^{ns}	1,86 ^{ns}		
Dose (D)	-	4,32**	25,38**	1,21 ^{ns}	0,91 ^{ns}	20,45**	1,09 ^{ns}	1,22 ^{ns}		
A x D	-	3,58**	1,64 ^{ns}	0,68 ^{ns}	1,11 ^{ns}	0,63 ^{ns}	0,68 ^{ns}	0,58 ^{ns}		
	1	ns								
	2	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns		
	3	10,9**								
C vs. T [†]	1	ns								
	2	ns	53,06**	ns	ns	32,45**	ns	ns		
	3	16,5**								
Ajuste	1	ns								
	2	ns	L	ns	ns	L	ns	ns		
	3	Q ^{††}								
C.V. (%)		17,8	-1,9	-3,2	1,6	-1,4	-5,4	4,0		

[†] C vs. T = Controle (dose zero) vs. Tratamentos fertilizados. ^{††} Ajuste L = linear, Q = quadrático.

* significativo a 0,05 de probabilidade; ** significativo a 0,01 de probabilidade, ns: não significativo.

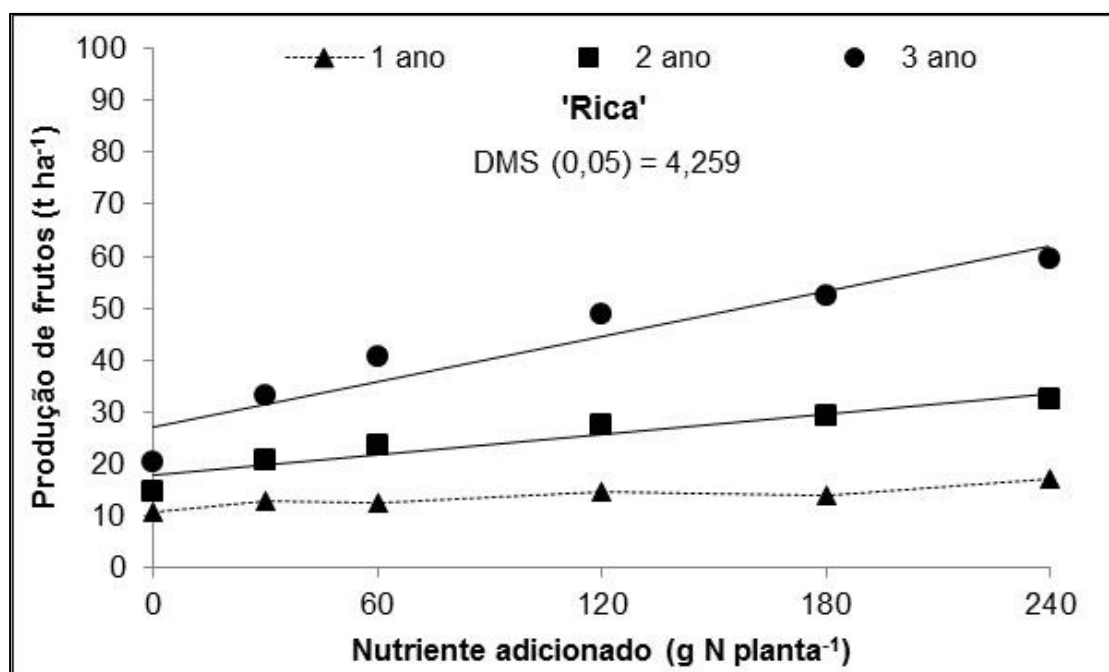
Tabela 7. Análise de variância e valores de F sobre o efeito da adição de K na produtividade e no balanço catiônico do solo, em pomar da goiabeira ‘Paluma’

Ano Produção		Camada 0-20 cm			Camada 20-40 cm		
		[K Ca, Mg, H+Al]	[Ca, Mg H+Al]	[Ca Mg]	[K Ca, Mg, H+Al]	[Ca, Mg H+Al]	[Ca Mg]
‘Paluma’							
Ano (A)	-	258**	4,72 ^{ns}	60,22**	5,21*	0,10 ^{ns}	7,57 ^{ns} 0,26 ^{ns}
Dose (D)	-	3,66**	47,67**	1,19 ^{ns}	0,20 ^{ns}	48,96**	0,76 ^{ns} 0,76 ^{ns}
A x D	-	5,25**	1,46 ^{ns}	0,79 ^{ns}	0,82 ^{ns}	2,29 ^{ns}	0,60 ^{ns} 0,37 ^{ns}
	1	ns					
	2	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	3	13,14**					
C vs. T†	1	ns					
	2	ns	131,38**	ns	ns	78,61**	ns
	3	53,62**					
Ajuste	1	ns					
	2	ns	L	ns	ns	L	ns
	3	L††					
C.V. (%)		14,1	-1,0	-2,4	5,1	-1,0	-1,4 10,3

[†] C vs. T = Controle (dose zero) vs. Tratamentos fertilizados. ^{††} Ajuste L = linear, Q = quadrático.

* significativo a 0,05 de probabilidade; ** significativo a 0,01 de probabilidade, ns: não significativo.

a.



b.

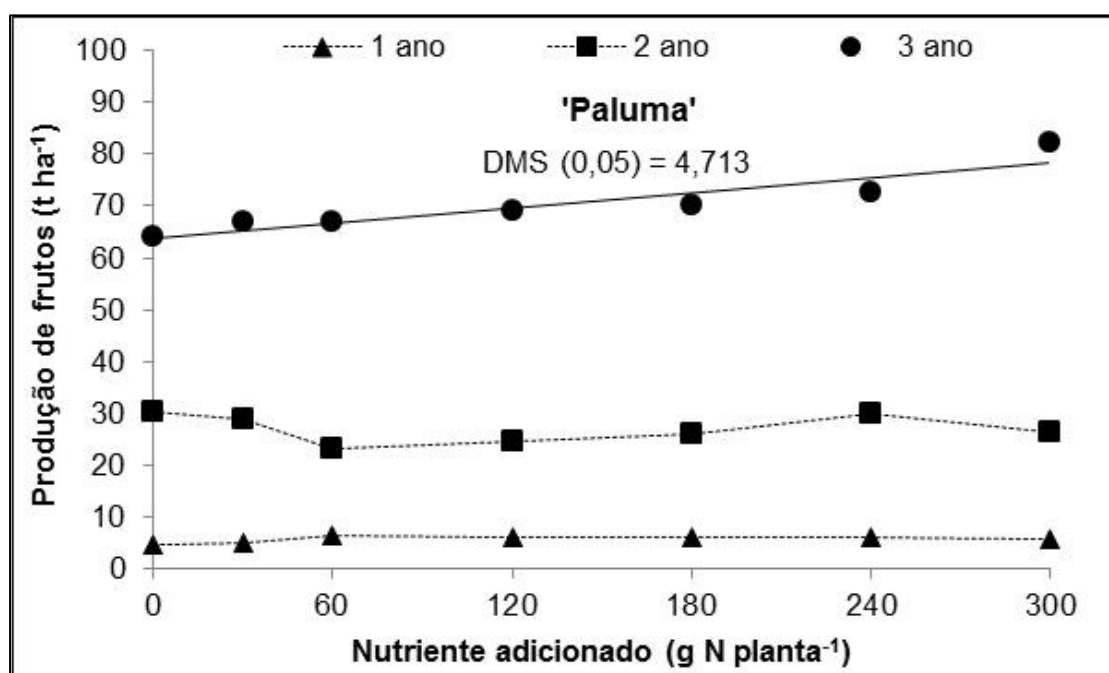


Figura 1. Produção de goiabas das cultivares Rica (1a) e Paluma (1b), em reposta à adição de N. DMS = diferença mínima significativa a 0,05 de probabilidade. † Doses de N no 1º ano: zero, 30, 60, 120, 180 e 240g de N planta⁻¹, no 2º e 3º anos o dobro e o triplo das doses iniciais respectivamente.

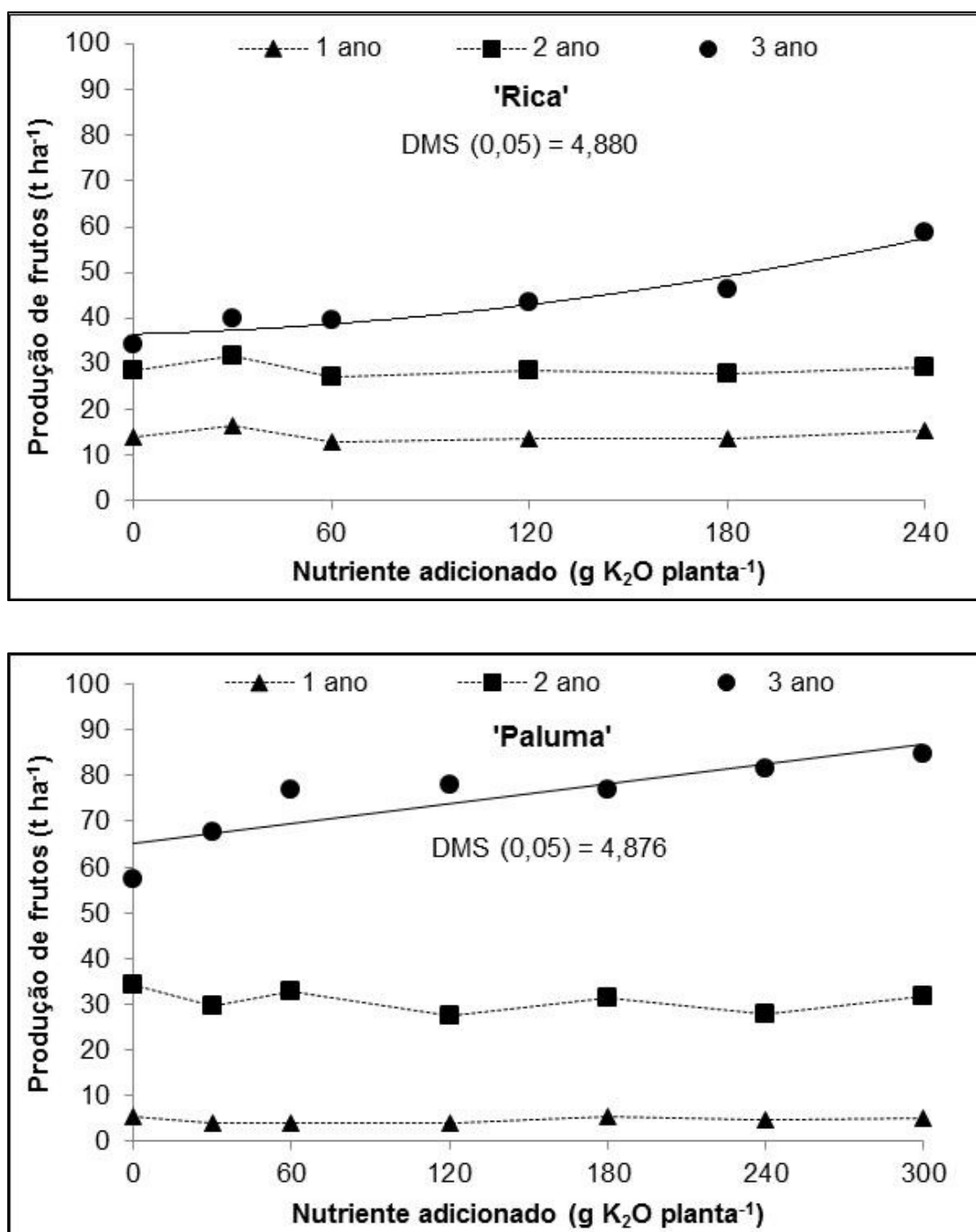


Figura 2. Produção de goiabas das cultivares Rica (2a) e Paluma (2b), em reposta à adição de K. DMS = diferença mínima significativa a 0,05 de probabilidade. [†] Doses de K no 1º ano: zero, 30, 60, 120, 180, 240 e 300g de K₂O planta⁻¹, no 2º e 3º anos o dobro e o triplo das doses iniciais, respectivamente.

Os tratamentos com doses de N diminuíram de forma quadrática o balanço do solo [K | Ca, Mg, H + Al] na camada de 0-20 cm ($y = 2 \cdot 10^{-5}x^2 - 0,0061x - 1,1582$; $R^2 = 0,81$) e 20-40 cm ($y = 2 \cdot 10^{-5}x^2 - 0,0062x - 1,3428$; $R^2 = 0,82$) (Figura 3a), e o balanço do solo [Ca, Mg | H + Al] na camada de 0-20 cm ($y = 2 \cdot 10^{-5}x^2 + 0,0011x - 0,3332$; $R^2 = 0,91$) e 20-40 cm ($y = 2 \cdot 10^{-5}x^2 + 0,0036x - 0,3668$; $R^2 = 0,61$) (Figura 3b), e aumentaram linearmente o balanço do solo [Ca | Mg] na 'Rica' na camada de 0-20 cm ($y = 0,002x + 0,9112$; $R^2 = 0,86$) e 20-40 cm ($y = 0,0006x + 0,7688$; $R^2 = 0,38$) (Figura 3c). Na 'Paluma', os tratamentos com doses de N diminuíram linearmente o balanço do solo [Ca, Mg | H + Al] na camada de 0-20 cm ($y = -0,0022x - 0,7665$; $R^2 = 0,96$) e 20-40 cm ($y = -0,001x - 1,029$; $R^2 = 0,69$) (Figura 3b), e aumentaram linearmente o balanço do solo [Ca | Mg] na camada de 20-40 cm ($y = 0,0006x + 0,3346$; $R^2 = 0,48$) (Figura 3c). Por outro lado, os tratamentos com doses de K aumentaram linearmente o balanço do solo [K | Ca, Mg, H + Al] na camada de 0-20 cm ($y = 0,0048x - 2,2091$; $R^2 = 0,98$) e 20-40 cm ($y = 0,0048x - 2,5119$; $R^2 = 0,97$) nos pomares de 'Rica' (Figura 4a), e na camada de 0-20 cm ($y = 0,0036x - 2,6028$; $R^2 = 0,95$) e 20-40 cm ($y = 0,0047x - 2,7531$; $R^2 = 0,99$) nos pomares de 'Paluma' (Figura 4a). A adubação nitrogenada diminuiu o pH do solo (Figura 5a), já que o $N-NH_4$ acidifica a rizosfera, decorrente da nitrificação ou da absorção de amônio pelas raízes, mas estimulou o crescimento da planta e, conseqüentemente a absorção de nutrientes, levando a diminuição de K, Ca e Mg no solo (Figuras 5b, 5c e 5d). Os tratamentos com doses de potássio não alteraram o pH (Figura 6a), mas aumentaram a concentração de K no solo (Figura 6b) e mantiveram as concentrações de Ca e Mg no solo (Figuras 6c e 6d). Sendo assim, a estimativa de utilização de K (o K adicionado menos o K exportado) foi negativa (Figura 7a) ou equilibrada (Figura 7b) no experimento com doses de N e, positiva no experimento com doses de K (Figuras 8a e 8b).

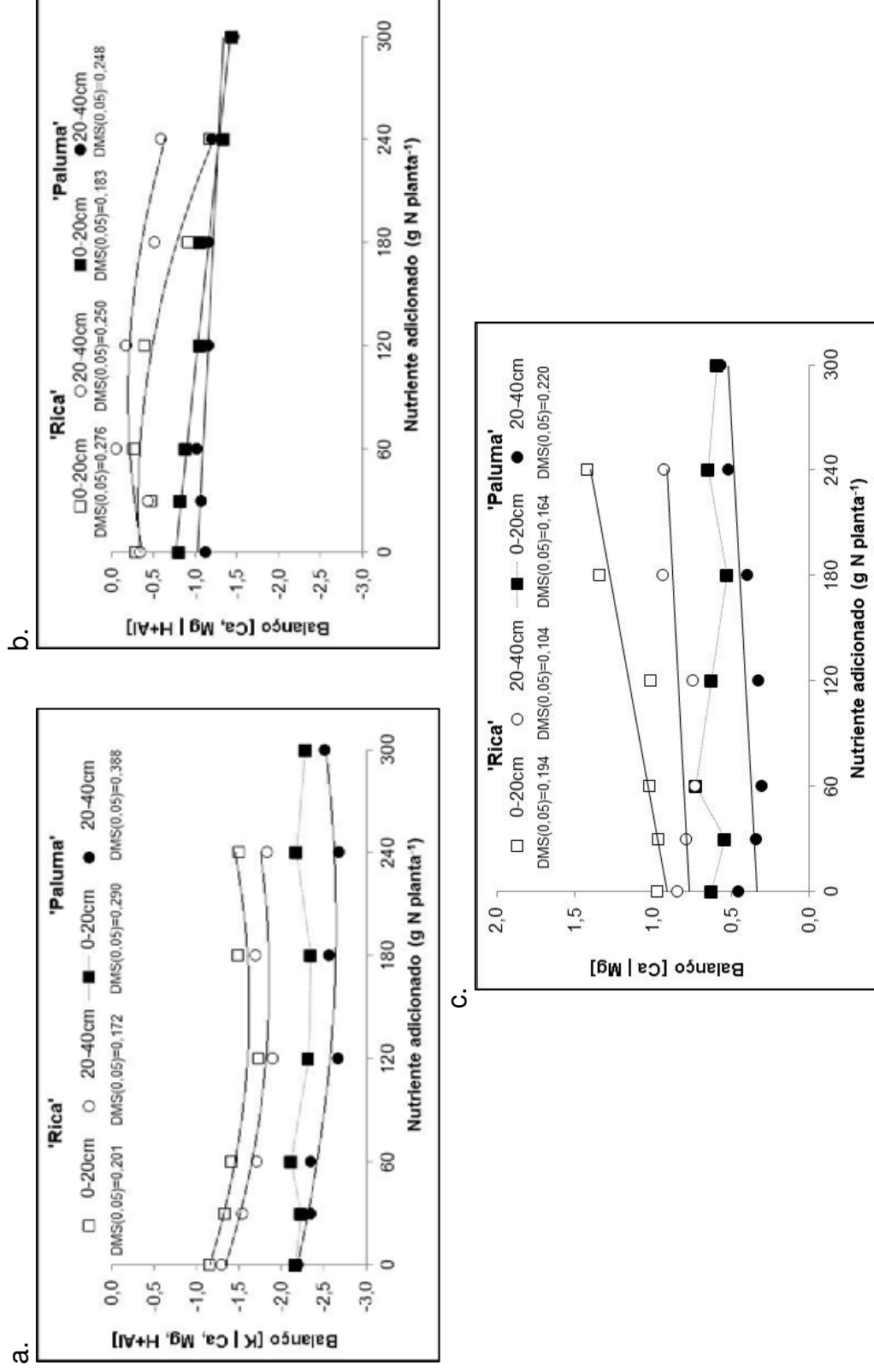


Figura 3. Mudança sazonal nos balanços catiônicos do solo nas camadas de 0-20 e 20-40 cm, em pomares de goiabeiras 'Rica' e 'Paluma', em experimento com doses de N. DMS = diferença mínima significativa a 0,05 de probabilidade. † Doses de N no 1º ano: zero, 30, 60, 120, 180, 240 e 300 g de N planta⁻¹, no 2º e 3º anos o dobro e o triplo das doses iniciais, respectivamente.

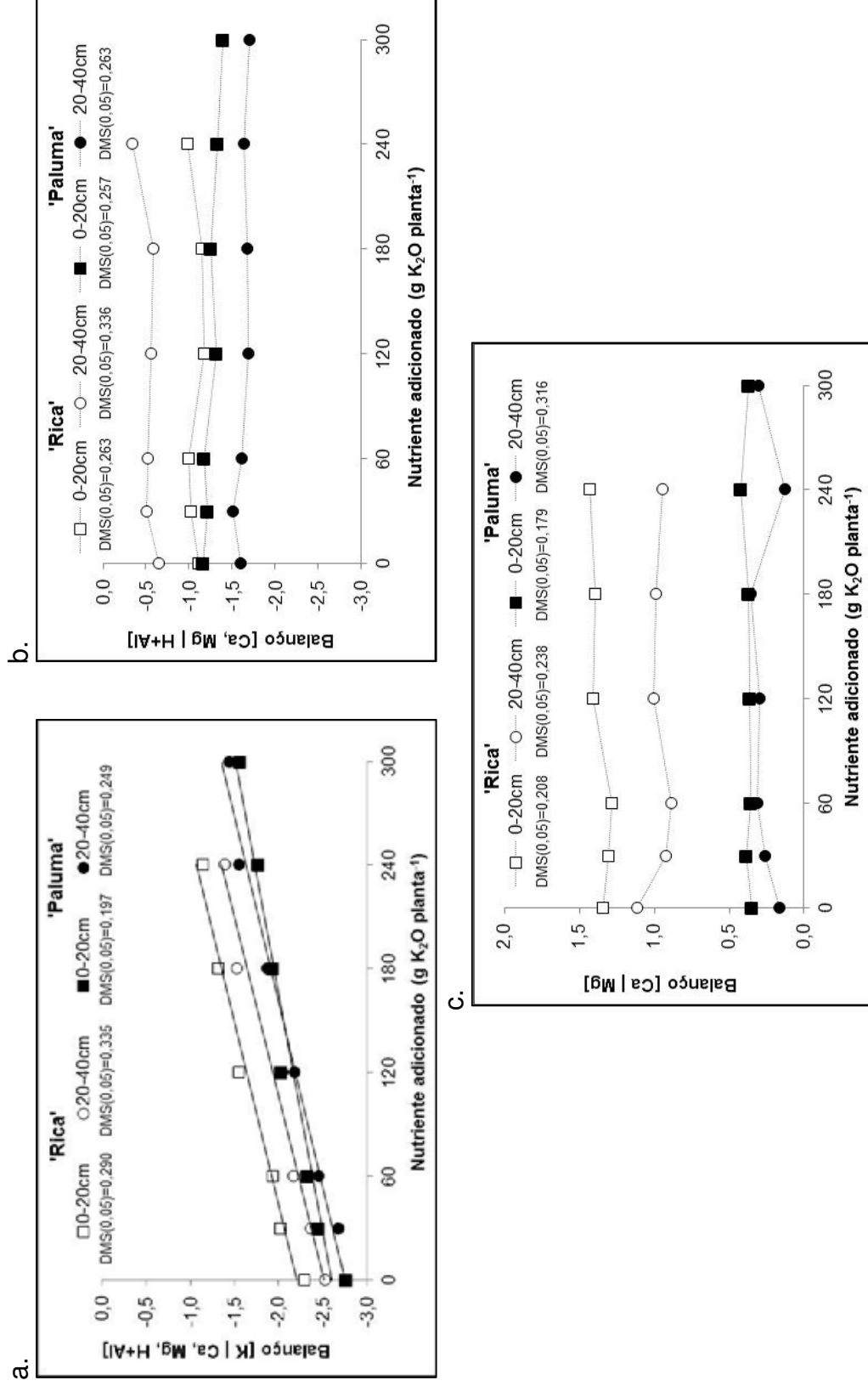


Figura 4. Mudança sazonal nos balanços catiônicos do solo nas camadas de 0-20 e 20-40 cm, em pomares de goiabeiras 'Rica' e 'Paluma', em experimento com doses de K. DMS = diferença mínima significativa a 0,05 de probabilidade. † Doses de K no 1º ano: zero, 30, 60, 120, 180, 240 e 300 g de K₂O planta⁻¹, no 2º e 3º anos o dobro e o triplo das doses iniciais, respectivamente.

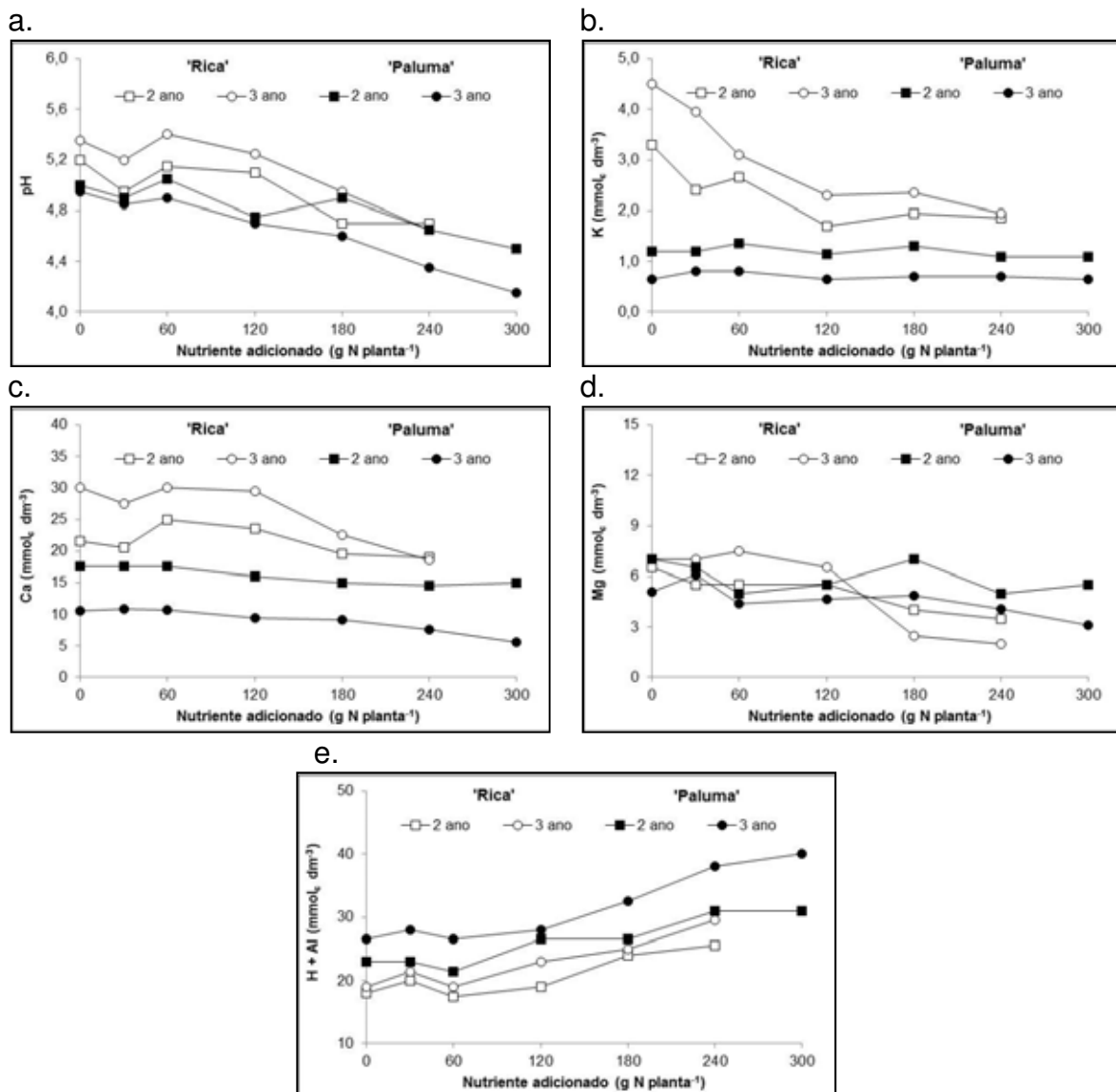


Figura 5. Mudança sazonal nos valores medianos das propriedades químicas do solo, em pomares de goiabeiras 'Rica' e 'Paluma', em experimento com doses de N. [†] Doses de N no 1° ano: zero, 30, 60, 120, 180, 240 e 300 g de N planta⁻¹, no 2° e 3° anos o dobro e o triplo das doses iniciais, respectivamente.

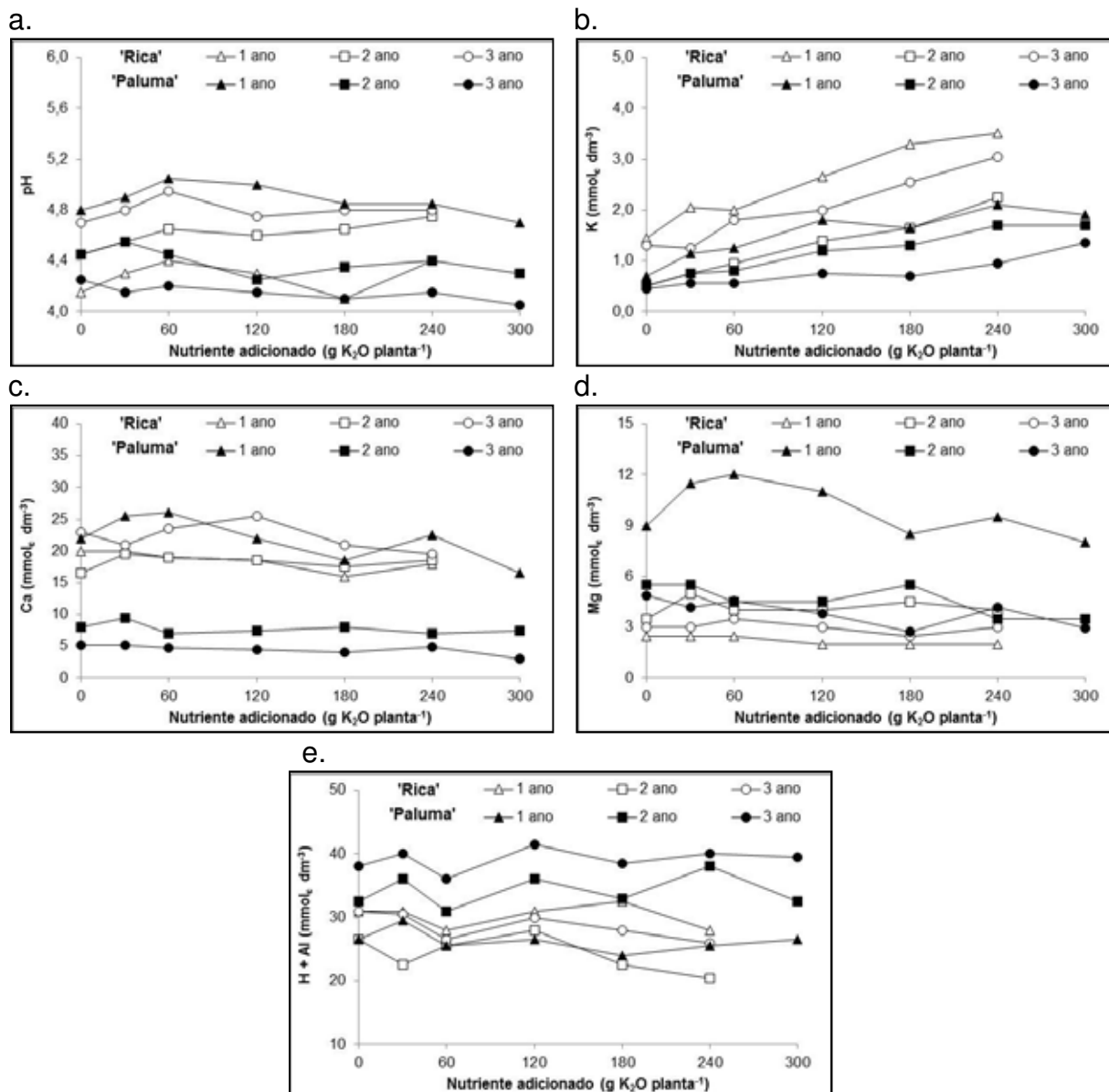
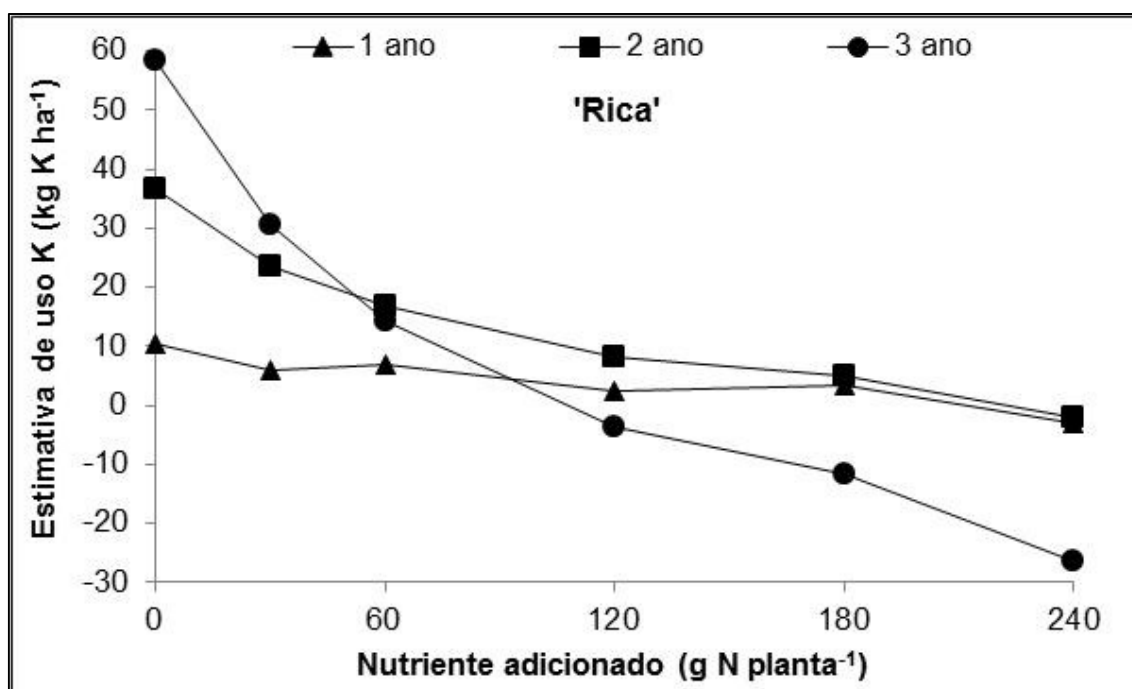


Figura 6. Mudança sazonal nos valores medianos das propriedades químicas do solo, em pomares de goiabeiras 'Rica' e 'Paluma', em experimento com doses de K. [†] Doses de K no 1º ano: zero, 30, 60, 120, 180, 240 e 300 g de K₂O planta⁻¹, no 2º e 3º anos o dobro e o triplo das doses iniciais, respectivamente.

a.



b.

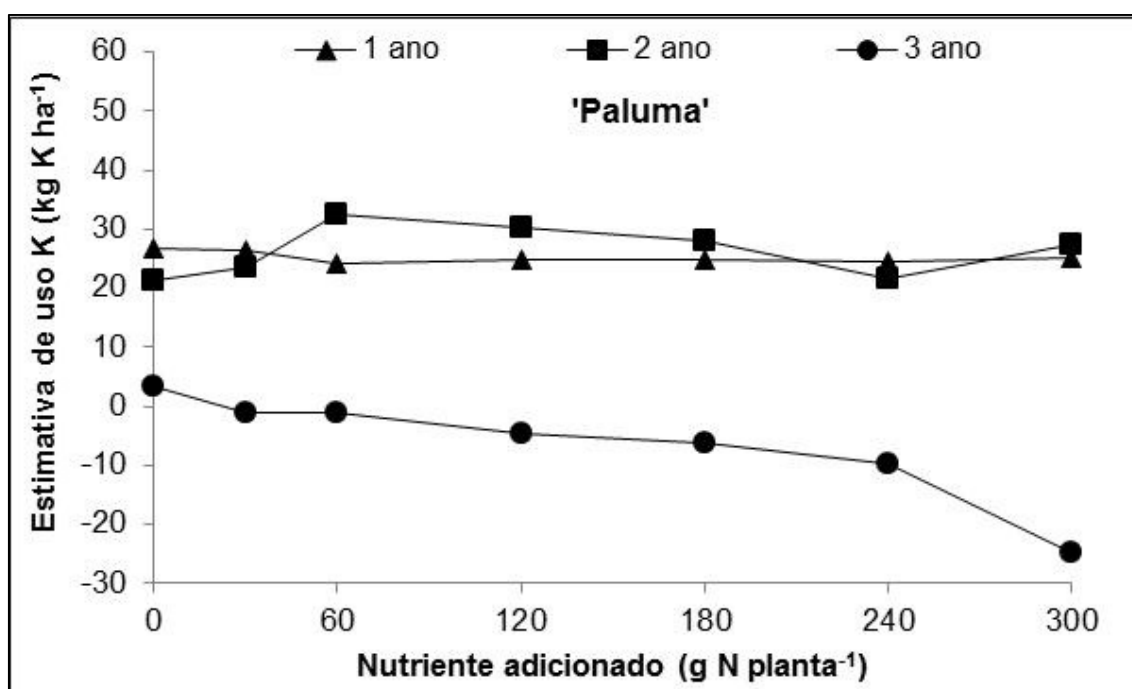
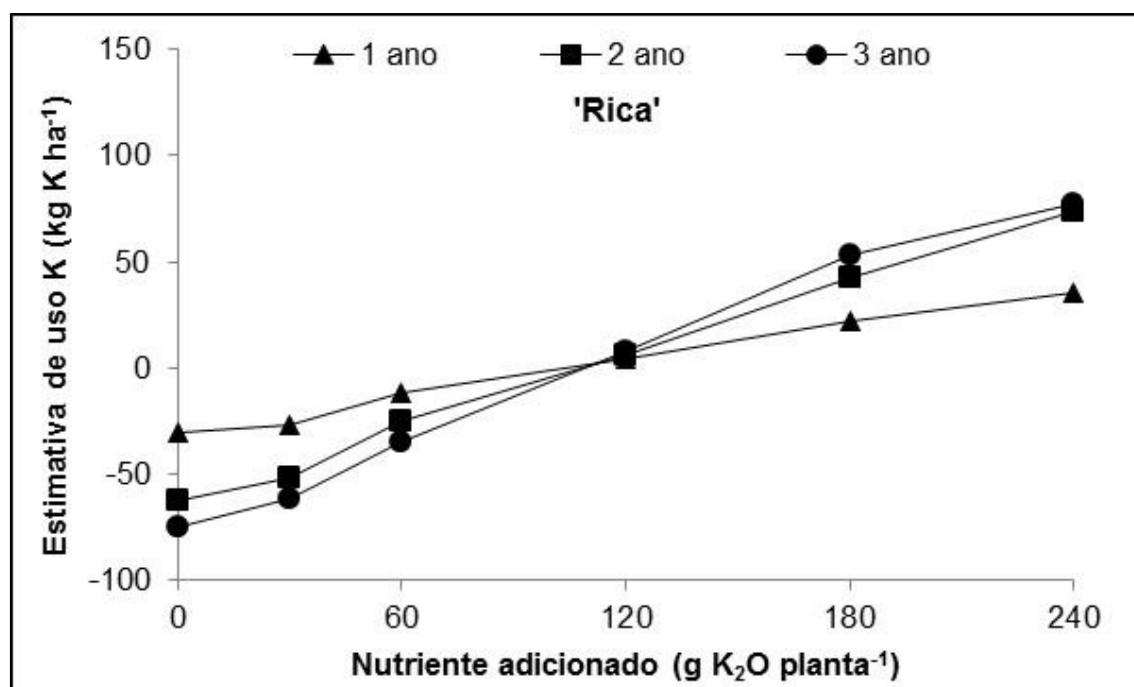


Figura 7. Remoção de potássio por goiabeiras 'Rica' (7a) e 'Paluma' (7b) nos experimentos empregando doses de N. [†] Doses de N no 1º ano: zero, 30, 60, 120, 180, 240 e 300 g de N planta⁻¹ e, no 2º e 3º anos o dobro e o triplo das doses iniciais, respectivamente.

a.



b.

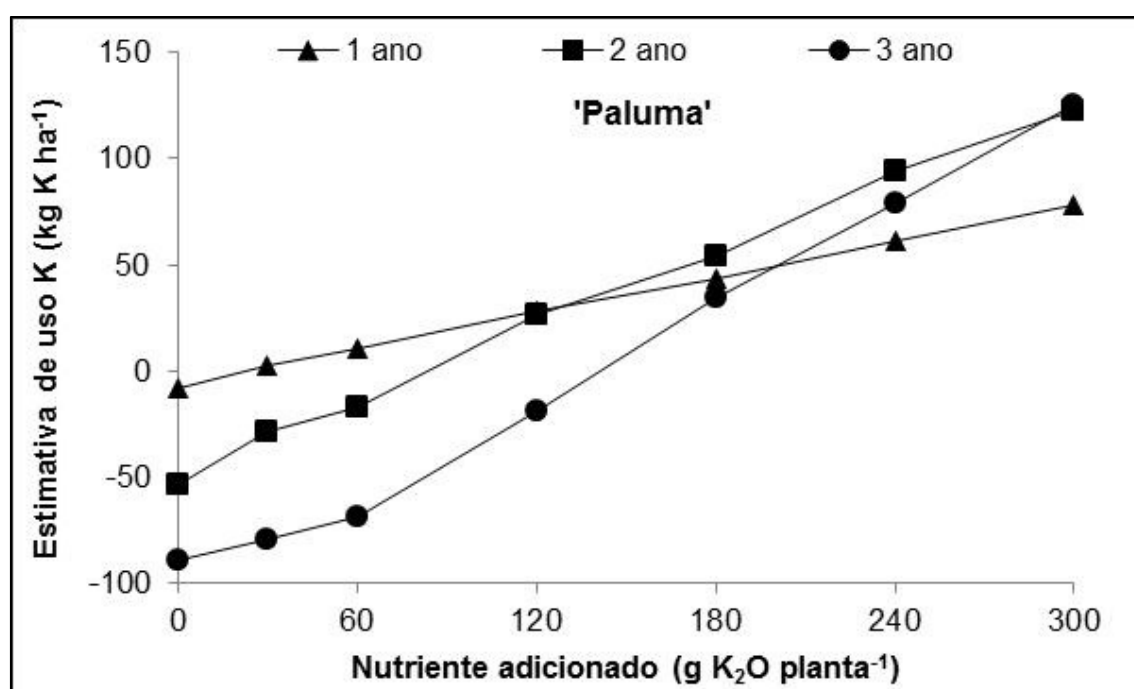


Figura 8. Remoção de potássio por goiabeiras 'Rica' (8a) e 'Paluma' (8b) nos experimentos empregando doses de K. [†] Doses de K no 1º ano: zero, 30, 60, 120, 180, 240 e 300 g de K₂O planta⁻¹, no 2º e 3º anos o dobro e o triplo das doses iniciais, respectivamente.

O N estimula o crescimento da planta e conseqüentemente a absorção de K, já que o K é o principal cátion que acompanha o nitrato, além de ser o regulador de vários processos do crescimento das plantas (MALAVOLTA, 2006). Por outro lado, os balanços catiônicos no solo estão relacionados com a magnitude dos mecanismos que restringem a disponibilidade de cada íon, a quantidade do íon e a força de ligação. A amônia e a acidez, resultantes do processo de nitrificação, competem com o K, Ca e Mg pelos sítios de adsorção nas partículas de argila (MALAVOLTA, 1989). Os cátions trocáveis estão localizados principalmente nas extremidades e na base (OH) da superfície da caulinita, onde as cargas negativas permanentes são insignificantes e a CTC depende fortemente do tamanho da partícula e do pH (MA; EGGLETON, 1999). A elevada densidade de carga superficial da caulinita aumenta a desidratação do K, resultando em uma elevada afinidade da caulinita pelo K, além da preferência pelo K em relação ao Ca (LEVY et al., 1988). Assim, existe uma faixa limitada de equilíbrio ácido-base na caulinita que pode disponibilizar K, Ca e Mg.

Dendogramas e diagramas ternários dos valores composicionais

Os balanços catiônicos do solo nas camadas 0-20 e 20-40 cm podem ser comparados usando-se dendogramas, diagramas ternários e representação Euclidiana da relação entre os balanços do solo $[K \mid Ca, Mg, H + Al]$ e $[Ca, Mg \mid H + Al]$ que, por definição, são ortogonais entre si.

Nos dendogramas dos balanços do solo, ilustrados na Figura 9, cada intersecção é um balanço ponderado, definido a partir da partição binária sequencial indicada na Tabela 1. O balanço pode ser zero (centro), negativo (deslocado para a esquerda) ou positivo (deslocado para a direita). A porcentagem de variância de cada balanço é representada pelo comprimento da barra vertical. Os balanços catiônicos do solo foram semelhantes nas camadas de solo 0-20 e 20-40 cm. O balanço potássico do solo foi o mais proeminente sendo impulsionado pelos tratamentos com doses de K.

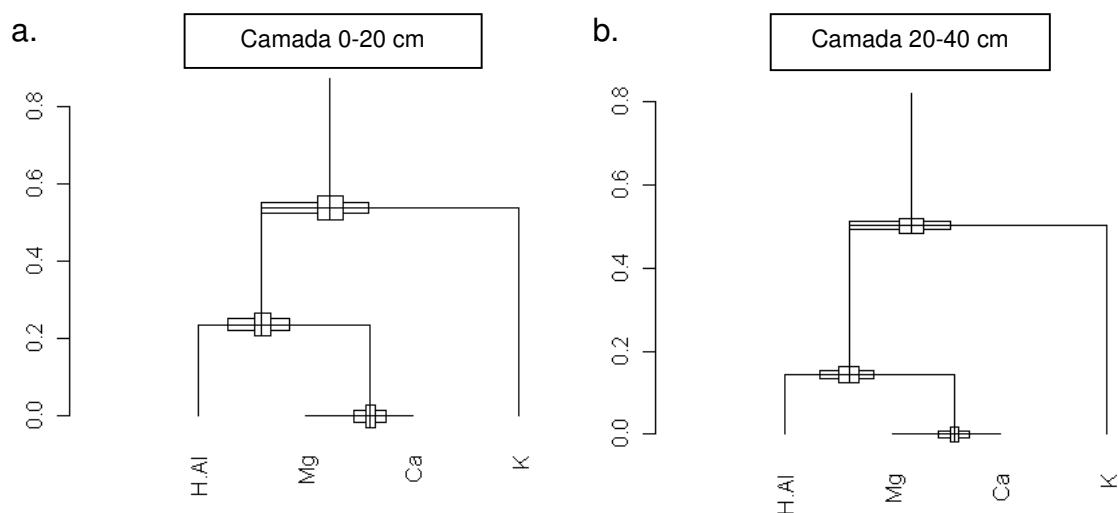


Figura 9. Dendogramas dos valores composicionais na camada de solo de 0-20 e 20-40 cm.

Como apresentado no diagrama ternário, a distribuição dos balanços catiônicos do solo entre as camadas de 0-20 e 20-40 cm se sobrepuseram (Figura 10). No entanto, as pequenas elipses (Figura 11), que representam a região de confiança das médias, diferiram significativamente entre as camadas do solo de 0-20 e 20-40 cm. A coordenada $[K \mid Ca, Mg, H + Al]$ foi maior na camada de solo 0-20 cm, em comparação com a camada 20-40 cm, indicando que mais K foi acumulado na camada superficial, decorrente das aplicações superficiais de fertilizante potássico.

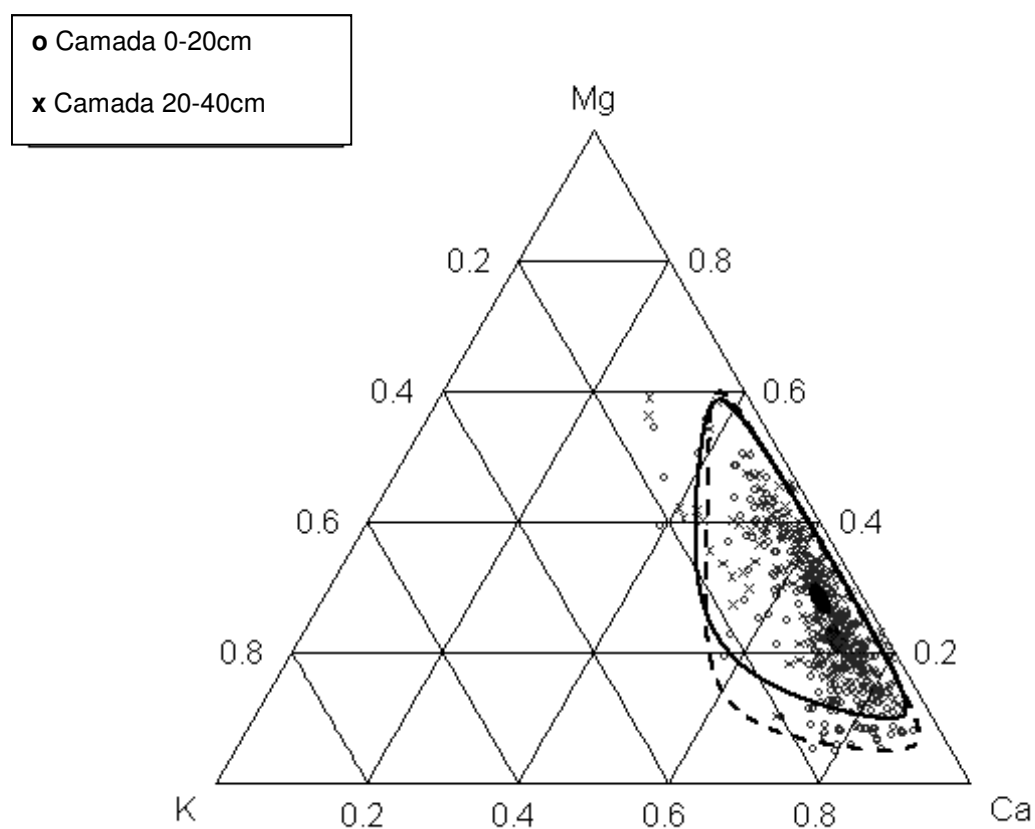


Figura 10. Diagrama ternário dos valores composicionais de K, Ca e Mg nas camadas de solo 0-20 cm (linha pontilhada) e 20-40 cm (linha contínua), sob doses de N e K, com intervalo de confiança de 95%.

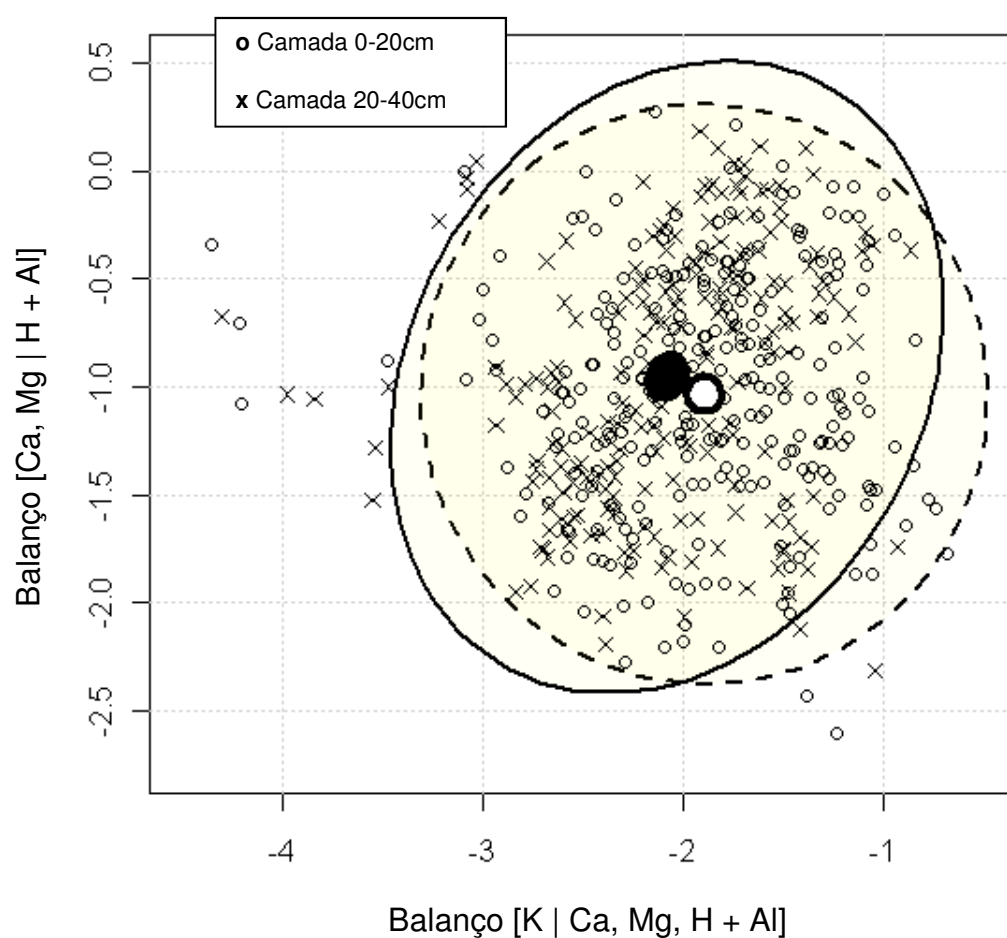


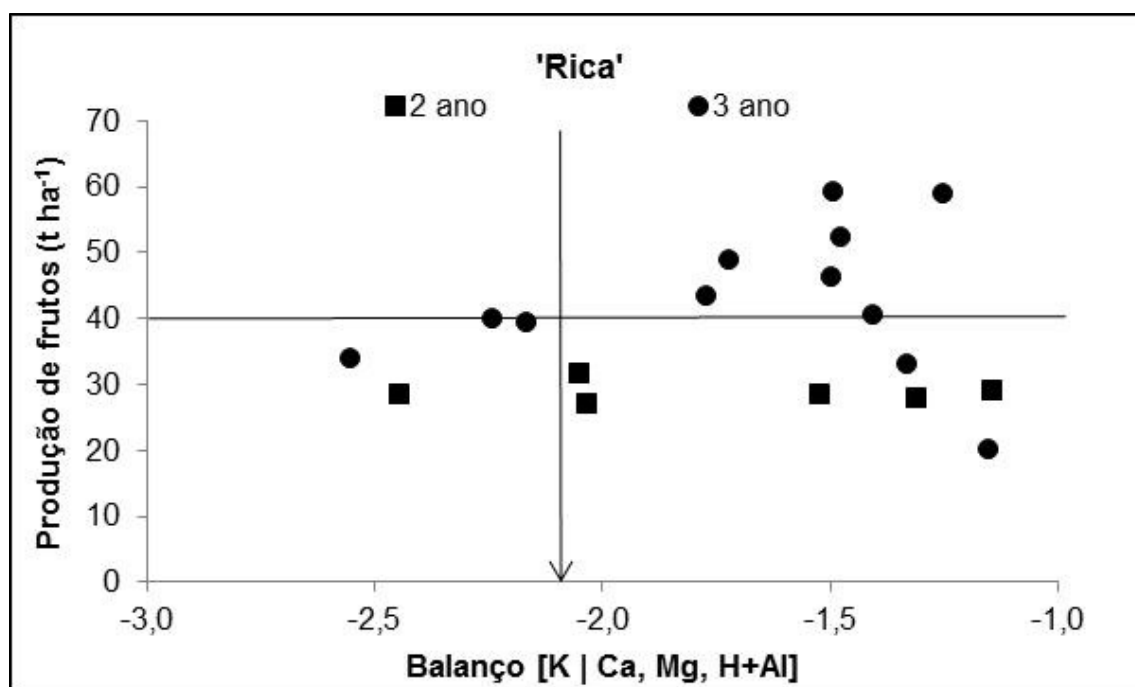
Figura 11. Relação entre os balanços $[Ca, Mg | H + Al]$ e $[K | Ca, Mg, H + Al]$ nas camadas de solo 0-20 e 20-40 cm [as elipses menores são as médias das coordenadas *ilr* para a camada 0-20 cm (elipses brancas) e para a camada 20-40 cm (elipses pretas)].

Balanço catiônico crítico do solo

As médias da concentração de K no solo e do balanço [K | Ca, Mg, H + Al] foram calculadas entre o início e o fim do período de crescimento, como condições médias do solo. Como a planta frutífera permanece no terreno durante todo o ano, e está continuamente absorvendo elementos do solo, a análise do solo reflete a concentração do nutriente no momento da amostragem; em decorrência disso, para fins de cálculos, considerou-se apenas as médias entre amostragens. A concentração de K no solo e o balanço [K | Ca, Mg, H + Al] foram relacionados com a produção de frutos e particionados de acordo com o procedimento Cate-Nelson (Figuras 12 e 13). No segundo ano do estabelecimento do pomar, não houve qualquer relação aparente entre a produção de frutos e a concentração de potássio no solo, ou mesmo entre a produção de frutos e o balanço [K | Ca, Mg, H + Al], devido ao baixo rendimento da goiabeira, que ainda estava na fase de formação.

Embora difícil de definir, o valor crítico da concentração de K no solo parece ser de $1,60 \text{ mg dm}^{-3}$ para 'Rica' (Figura 13a) e de $1,20 \text{ mg dm}^{-3}$ para 'Paluma' (Figura 13b) no terceiro ano. O valor crítico do balanço [K | Ca, Mg, H + Al] foi mais claramente definido do que o valor crítico da concentração de K, determinado pela análise de solo, sendo de -2,10 para as duas cultivares (Figuras 12a e 12b).

a.



b.

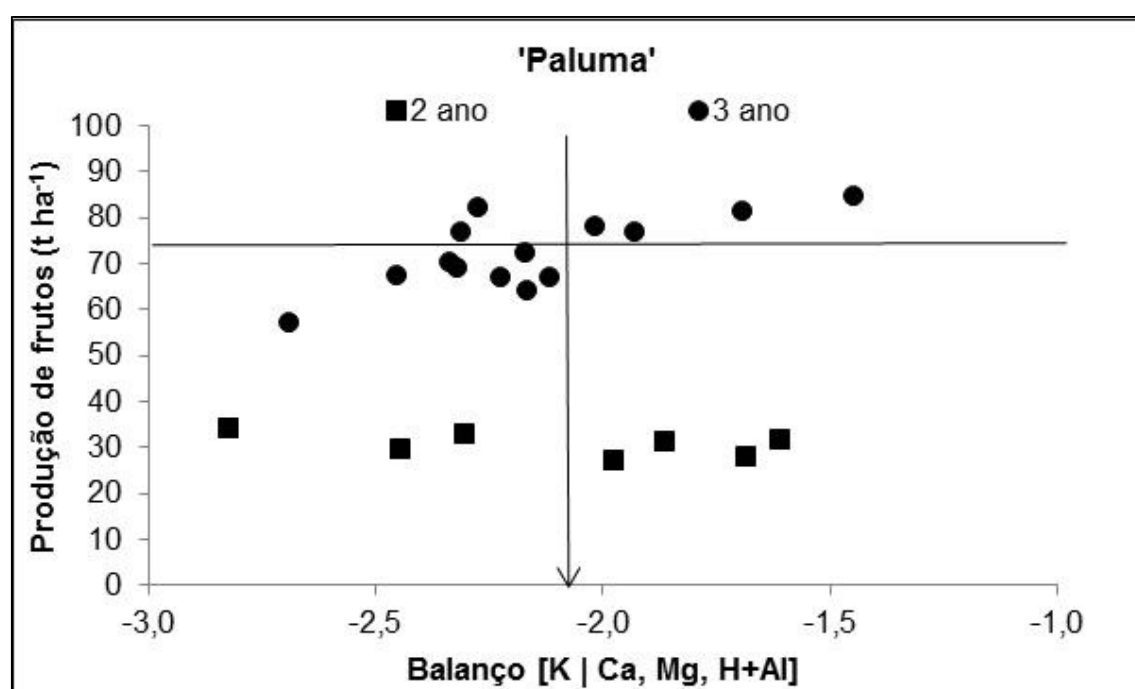
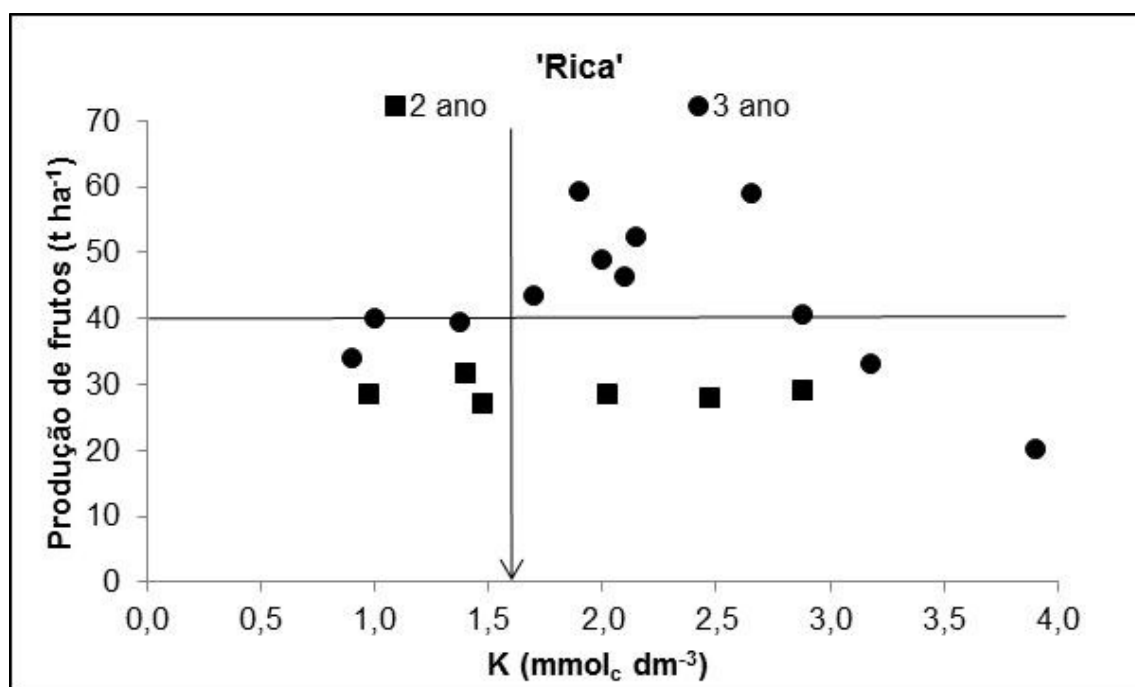


Figura 12. Particionamento Cate-Nelson da relação entre o balanço catiônico do solo e a produção de goiabas das cultivares Rica (12a) e Paluma (12b), nos experimentos com doses de N e K, mostrando o valor crítico do balanço no solo.

a.



b.

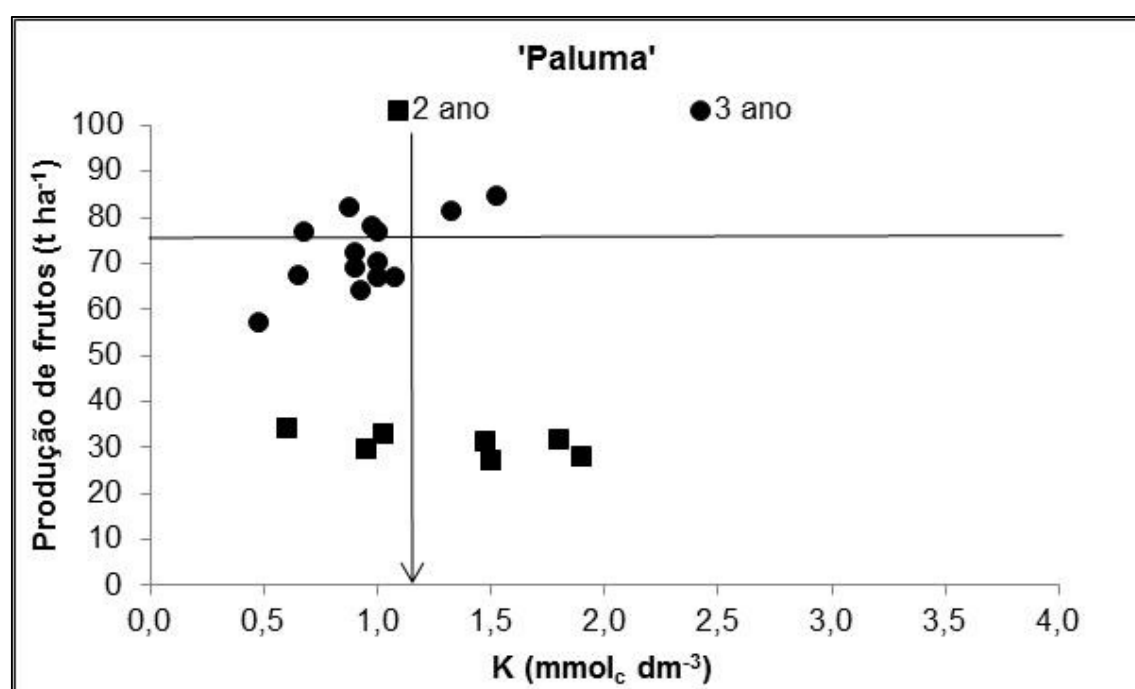


Figura 13. Particionamento Cate-Nelson da relação entre a concentração de K no solo e a produção de goiabas das cultivares Rica (13a) e Paluma (13b) nos experimentos com doses de N e K, mostrando o valor crítico do balanço no solo.

Houve nove amostras no grupo verdadeiro negativo (ou seja, sem desequilíbrio) para a concentração de K no solo (Figura 13), em comparação com onze amostras para o balanço [K | Ca, Mg, H + Al] (Figura 12) para 'Rica' e 'Paluma'. Ambos os indicadores apresentaram uma amostra no grupo falso positivo (alto rendimento classificado como desequilibrado) e duas amostras no grupo falso negativo (baixo rendimento classificado como equilibrado).

A taxa de sucesso, calculada pelo número de pontos positivos verdadeiros e negativos verdadeiros, divididos pelo número total de pontos, foi de 85% para a concentração de K no solo e de 92% para o balanço [K | Ca, Mg, H + Al]. Sendo assim, a taxa de sucesso do balanço do solo no particionamento foi maior quando comparada com a taxa de sucesso da concentração de K no solo, o que indica maior confiança nos resultados. Os pontos positivos verdadeiros fazem parte da subpopulação de alto rendimento, visada pelos produtores e utilizada para fins de diagnose.

Os valores críticos foram de aproximadamente -1,28 para o balanço [Ca, Mg | H+Al] (Figura 14) e 0,85 para o balanço [Ca | Mg] (Figura 15). Os valores críticos de -2,10 para o balanço [K | Ca, Mg, H + Al], de -1,28 para o balanço [Ca, Mg | H + Al], e de 0,85 para o balanço [Ca | Mg] foram re-transformados para porcentagem de saturação da CTC, correspondendo a 2,0% de K, 25% de Ca, 7,5% de Mg, e 65% de (H+Al). Para o Argissolo ($CTC = 41 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$) e Latossolo ($CTC = 54 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$) do presente ensaio, o nível crítico de K no solo seria de 0,80 e 1,10 $\text{mmol}_c \text{ K dm}^{-3}$, respectivamente.

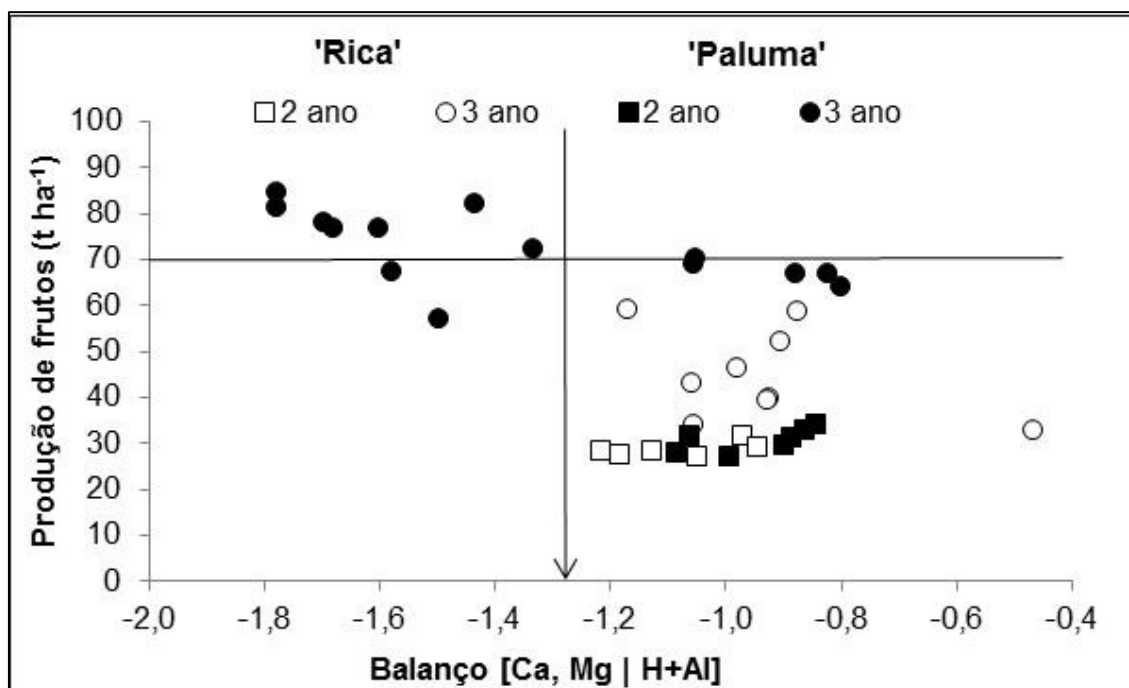


Figura 14. Particionamento Cate-Nelson da relação entre o balanço catiônico do solo [Ca, Mg | H + Al] e a produção de goiabas das cultivares Rica e Paluma, nos experimentos com doses de N e K, mostrando o valor crítico do balanço no solo.

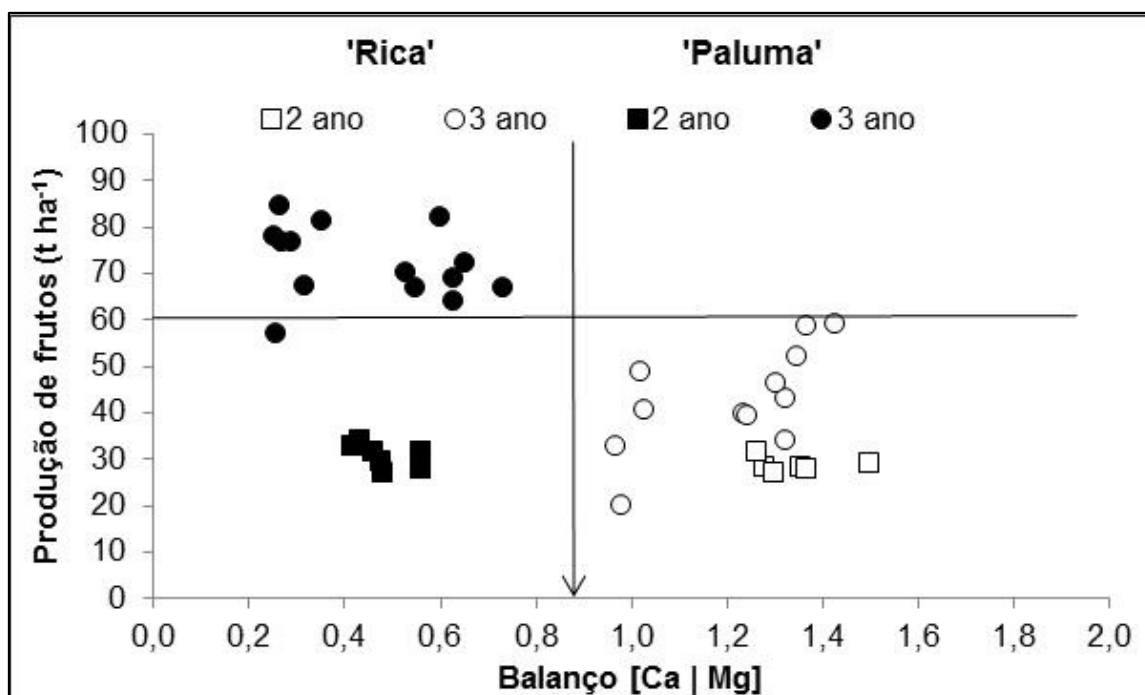


Figura 15. Particionamento Cate-Nelson da relação entre o balanço catiônico do solo [Ca | Mg] e a produção de goiabas das cultivares Rica e Paluma, nos experimentos com doses de N e K, mostrando o valor crítico do balanço no solo.

Para obter um intervalo crítico dos balanços, foram selecionadas as faixas de balanços de -1,90 a 2,10 para o balanço $[K \mid Ca, Mg, H + Al]$ para ambas as cultivares (Figura 12). Para a 'Paluma', as faixas de balanços foram de -1,78 a -0,80 para o balanço $[Ca, Mg \mid H + Al]$ (Figura 14), e de 0,27 a 0,73 para o balanço $[Ca \mid Mg]$ (Figura 15). As faixas de balanços da cultivar Rica foram de -1,17 a -0,88 para o balanço $[Ca, Mg \mid H + Al]$ (Figura 14), e de 0,97 a 1,42 para o balanço $[Ca \mid Mg]$ (Figura 15). Dependendo do nível das outras espécies catiônicas, as faixas de saturação de K no nível de altos rendimentos foram de 1,6 a 2,4% para a cultivar Paluma e 1,9 a 2,3% para a cultivar Rica. A saturação de Ca variou de 11 a 33% para a 'Paluma' e de 36 a 44% para a 'Rica'. A saturação de Mg variou de 5 a 18% para a cultivar Paluma e de 5 a 9% para a cultivar Rica, enquanto os intervalos de saturação por $H + Al$ foram de 53 a 80% para a 'Paluma' e de 48 a 61% para a 'Rica'. No entanto, esses intervalos ainda devem ser validados usando uma base de dados mais ampla.

Modelo de recomendação de potássio

O balanço do solo $[K \mid Ca, Mg, H + Al]$ foi considerado um índice de fertilidade do solo para a contabilização do K, nas condições ácido-base do solo, ou seja, a média geométrica de $[Ca, Mg, H + Al]$. Se o balanço do solo $[K \mid Ca, Mg, H + Al]$ é muito baixo, isso significa que, ou o nível de K no solo é muito baixo, ou, o equilíbrio ácido-base que regula o pH do solo é muito alto. O pH do solo é corrigido pela calagem para restabelecer os balanços do solo $[Ca, Mg \mid H + Al]$ e $[Ca \mid Mg]$. No valor de balanço $[Ca, Mg \mid H + Al]$ crítico de -1,28, o valor de pH ($CaCl_2$) crítico foi considerado 4,5, determinado a partir de sua estreita relação com os valores de balanço do solo (Figura 16).

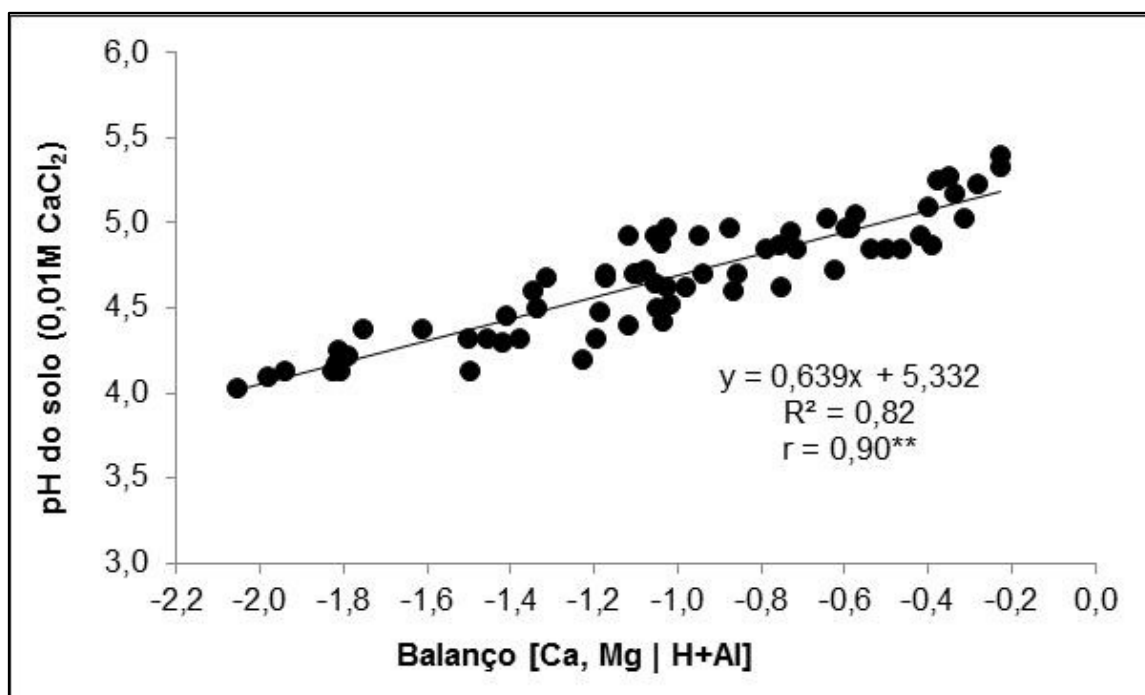


Figura 16. Relação entre o balanço [Ca, Mg | H + Al] e o pH do solo.

A goiabeira é uma planta tolerante à acidez, porém, adapta-se à pH em H₂O variando de 4,5 a 7,0 (CRANE; BALERDI, 2009); entretanto, se desenvolve melhor em condições de pH 5,0 a 6,0, segundo Bourdelles e Estanove (1967). Altas produções de frutos foram obtidas numa faixa de valores de pH em CaCl₂ variando entre 4,1 e 5,4 em ambos os locais (Figuras 5a e 6a). Abaixo dos valores pH de 5,4, a capacidade tampão dos Argissolos e Latossolos é devido principalmente ao Al trocável (KAMPRATH, 1970). Em valores de pH em H₂O < 5,5 geralmente ocorre toxicidade por Al em plantas em Argissolos e Latossolos (KAMPRATH, 1984) e, como isso não aconteceu no presente ensaio, a goiabeira aparenta ser relativamente insensível à toxicidade por Al e Mn. O objetivo da aplicação de calcário em solos ácidos, altamente fertilizados, em pomares de goiabeiras seria, portanto, o de restabelecer o balanço catiônico do solo favorável à alta produtividade dessa frutífera.

O modelo de adubação potássica apresentado aqui é uma abordagem para a “construção” e a manutenção da fertilidade do solo, tendo como referência o limite inferior crítico. As exportações e as adições de nutrientes devem ser equilibradas

para manter os três balanços catiônicos do solo acima desses valores críticos. Uma vez que a absorção de nutrientes aumenta com a produção e os fertilizantes contendo N-NH_4 acidificam o solo, fertilizantes potássicos, gesso e materiais de calagem contendo Ca e Mg devem ser fornecidos para manter os balanços catiônicos no solo acima dos limites inferiores críticos.

O balanço crítico $[\text{K} \mid \text{Ca}, \text{Mg}, \text{H} + \text{Al}]$ de -2,10 pode ser mantido na camada de solo de 0-20 cm, aplicando-se 109 g K_2O por planta, em pomares da cultivar Paluma e, 49 g K_2O por planta em pomares da cultivar Rica no primeiro ano, dobrando-se e triplicando-se essas doses no segundo e terceiro anos respectivamente (Figura 17).

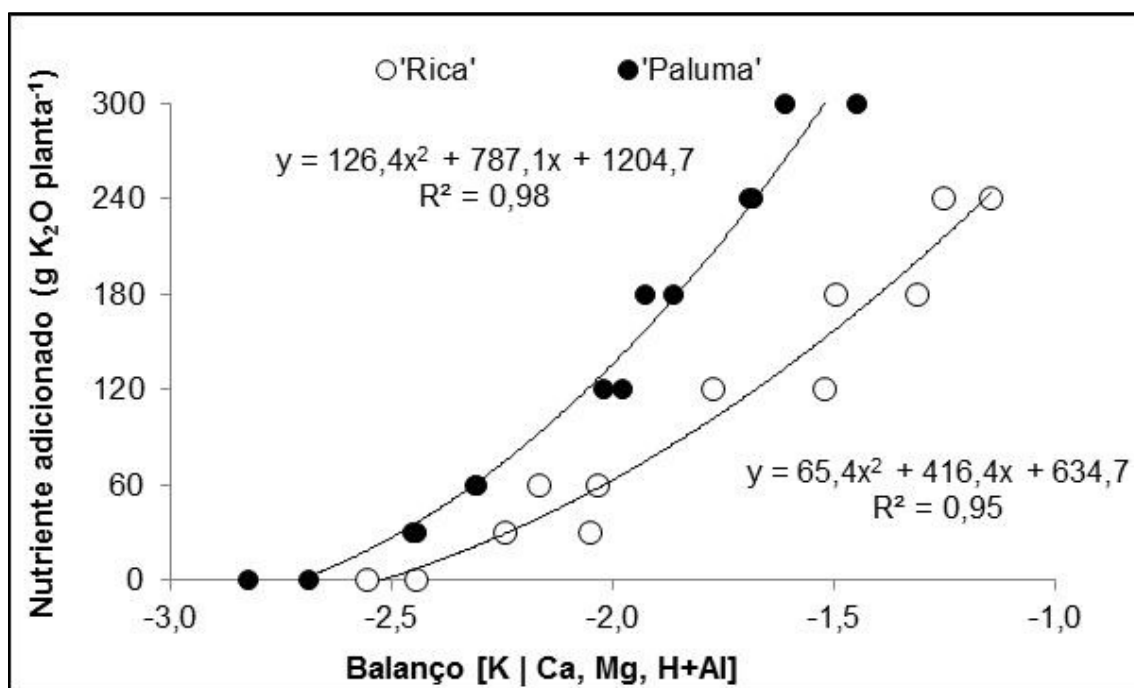


Figura 17. Relação entre o balanço $[\text{K} \mid \text{Ca}, \text{Mg}, \text{H} + \text{Al}]$ e a adição de K ao solo. † Doses de K no 1º ano: zero, 30, 60, 120, 180, 240 e 300 g de K_2O planta⁻¹; no 2º e 3º anos, o dobro e o triplo das doses iniciais respectivamente.

Embora uma dose satisfatória de K não possa ser definida a partir da curva de resposta de produção (Figura 2), as doses de K de 49 ou 109 g K_2O por planta no primeiro ano, e o dobro e o triplo no segundo e terceiro anos, respectivamente,

foram suportadas por um contraste significativo entre o controle (dose zero) e os tratamentos fertilizados (Tabelas 6 e 7). Em comparação, a remoção de K pela cultura foi cerca de 120 g K₂O por planta no primeiro ano, sendo o dobro e o triplo no segundo e terceiro anos, respectivamente (Figuras 7 e 8). A aplicação de 120 g K₂O por planta no primeiro ano e, o dobro e o triplo no segundo e terceiro anos, respectivamente, é necessária para manter o balanço do solo [K | Ca, Mg, H + Al] em -2,10 na camada de 20-40 cm (Figuras 3a e 4a), também bastante explorada pelas raízes das goiabeiras.

Há preocupação no que diz respeito à aplicação dos métodos TSBC em solos com baixa CTC, como Latossolos e Argissolos, o que pode levar à deficiência mineral, já que não existem níveis mínimos absolutos definidos. Em solos com CTC muito baixa, a quantidade de um determinado elemento, embora em uma proporção correta em relação aos demais elementos, pode se mostrar muito baixa para atender as necessidades da cultura. Por outro lado, aplicar os métodos TSBC em solos de elevada CTC pode resultar em aplicação excessiva de fertilizantes potássicos (KOPITKE; MENZIES, 2007). No caso de pomares de goiabeiras cultivadas em dois solos de baixa CTC no Brasil (40 - 50 mmol_c dm⁻³), a manutenção do balanço [K | Ca, Mg, H + Al] acima de -2,10, com a utilização de fertilizantes potássicos, pode garantir elevada produção de frutos.

Conclusão

Os balanços catiônicos do solo nos pomares de goiabeiras 'Rica' e 'Paluma' foram organizados ortogonalmente para evitar distorções numéricas e facilitar o manejo da adubação nitrogenada e potássica nos Latossolos e Argissolos. A manutenção do balanço $[K \mid Ca, Mg, H + Al]$ exige que as exportações de K pela colheita sejam compensadas por quantidades equivalentes de fertilizantes potássicos. O *ilr* proporcionou um índice confiável e imparcial do balanço catiônico do solo. Os valores críticos de saturação da CTC foram determinados em 2,0% de K, 25% de Ca, 7,5% de Mg e 65% de (H + Al), sendo o valor crítico de pH ($CaCl_2$) igual a 4,5 para rendimentos $> 77 \text{ t ha}^{-1}$.

Referências

AITCHISON, J. **The statistical analysis of compositional data**. London: Chapman & Hall, 1986. 416 p.

ANJANEYULU, K.; RAGHUPATHI, H. B. Identification of yield-limiting nutrients through DRIS leaf nutrient norms and indices in guava (*Psidium guajava*). **Indian Journal of Agricultural Sciences**, New Delhi, v. 79, p. 418-421, 2009.

ARORA, J. S.; SINGH, J. R. Effect of nitrogen, phosphorus and potassium sprays on guava (*Psidium guajava* L.). **Journal of the Japanese Society for Horticultural Science**, Kyoto, v. 39, p. 55-62, 1970.

BOURDELLES, J.; ESTANOVE, P. La goyave aux Antilles. **Fruits**, Paris, v. 22, p. 397-412, 1967.

BUCCIANTI, A. Natural laws governing the distribution of the elements in geochemistry: the role of the log-ratio approach. In: PAWLOWSKY-GLAHN, V.; BUCCIANTI, A. (Eds). **Compositional data analysis: theory and applications**. New York: John Wiley and Sons, 2011. p. 255-266.

CHAYES, F. On correlation between variables of constant sum. **Journal of Geophysical Research**, Washington, v. 65, p. 4185-4193, 1960.

CRANE, J. H.; BALERDI, C. F. **Guava growing in the Florida home landscape**. Horticultural Sciences Department, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida, Florida, 2009. 8 p.

DIAZ-ZORITA, M.; PERFECT, E.; GROVE, J. H. Disruptive methods for assessing soil structure. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 64, p. 3-22, 2002.

EGOZCUE, J. J.; PAWLOWSKY-GLAHN, V. Groups of parts and their balances in compositional data analysis. **Mathematical Geology**, New York, v.37, p. 795-828, 2005.

EGOZCUE, J. J.; PAWLOWSKY-GLAHN, V.; MATEU-FIGUERAS, G.; BARCELÓ-VIDAL, C. Isometric log-ratio transformations for compositional data analysis. **Mathematical Geology**, New York, v. 35, p. 279-300, 2003.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de classificação de solos**. 2nd. ed. Rio de Janeiro, Brasil: Embrapa Solos, 2006. 306 p.

FILZMOSER, P.; HRON, K. Robust statistical analysis. In: PAWLOWSKY-GLAHN, V.; BUCCIANTI, A. (Eds.). **Compositional data analysis: theory and applications**, New York: John Wiley and Sons, 2011. p. 57-72.

FRACARO, A. A.; PEREIRA, F. M. Distribuição do sistema radicular da goiabeira 'Rica' produzida a partir de estaquia herbácea. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 26, p. 183-185, 2004.

GERALDSON, C. M. Factors affecting calcium nutrition of celery, tomato and pepper. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 21, p. 621-625, 1957.

GERALDSON, C. M. Intensity and balance concept as an approach to optimal vegetable production. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 1, p. 187-196, 1970.

GERALDSON, C. M. Nutrient intensity and balance. In: STELLY, M. (Ed.). **Soil testing: correlating and interpreting analytical results**. Madison: American Society of Agronomy, 1984. p. 75-84.

GLYNN, P. E.; WEISBACH, P. C. **Clinical predictions rules: a physical therapy reference manual**. Sudbury: Jones and Barlett. Disponível em: <http://samples.jbpub.com/9780763775186/75186_FMXX_Glynh.pdf>. Acesso em: 30 jul. 2012.

IHAKA, R.; GENTLEMAN, R. R: A language for data analysis and graphics. **Journal of Computational and Graphical Statistics**, Alexandria, v. 5, p. 299-314, 1996.

KAMPRATH, E. J. Crop response to lime on soils in the tropics. In: ADAMS, F. (Ed.). **Soil acidity and liming**. 2nd. ed. Madison: American Society of Agronomy, 1984. p. 349-368.

KAMPRATH, E. J. Exchangeable aluminium as a criterion for liming leached mineral soils. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 34, p. 252-254, 1970.

KOPITKE, P. M.; MENZIES, N. W. A review of the use of the basic cation saturation ratio and the "ideal" soil. **Soil Science Society of America Journal**, Wiscosin, v. 71, p. 259-265, 2007.

LEVY, G. J.; van der WATT, H. V. H.; SHAINBERG, I.; du PLESSIS, H. M. Potassium-calcium and sodium-calcium exchange on kaolinite and kaolinitic soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 52, p. 1259-1264, 1988.

LIEBHARDT, W. C. The basic cation saturation ratio concept and lime and potassium recommendations on Delaware's Coastal Plain soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 45, p. 544-549, 1981.

LOPEZ, J.; PARENT, L. E.; TREMBLAY, N.; GOSSELIN, A. Sulfate accumulation and Ca balance in hydroponic tomato culture. **Journal of Plant Nutrition**, Athens, v. 25, p. 1585-1597, 2002.

MA, C.; EGGLETON, R. A. Cation exchange capacity of kaolinite. **Clays and Clay Minerals**, Chantilly, v. 47, p. 174-180, 1999.

MALAVOLTA, E. **ABC da Adubação**. 5^a. ed. São Paulo: Agronômica Ceres Ltda., 1989. 292 p.

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

McLEAN, E. O. Contrasting concepts in soil test interpretation: sufficiency levels of available nutrients versus basic cation saturation ratios. In: STELLY, M. (Ed.). **Soil testing: correlating and interpreting the analytical results**. Madison: American Society of Agronomy, 1984. p. 39-54.

McLEAN, E. O.; HARTWIG, R. C.; ECKERT, D. J.; TRIPLETT, G. B. Basic cation saturation ratios as a basis for fertilizing and liming agronomic crops. II. Field studies. **Agronomy Journal**, Madison, v. 75, p. 635-639, 1983.

MEHLICH, A. Uniformity of soil test results as influenced by volume weight. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 4, p. 475-486, 1973.

NATALE, W. **Diagnose da nutrição nitrogenada e potássica em duas cultivares de goiabeira (*Psidium guajava* L.), durante três anos**. 1993. 150 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1993.

NATALE, W. **Resposta da goiabeira à adubação fosfatada**. 1999. 132 p. Tese de Livre-Docência - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias - Unesp, Jaboticabal, 1999.

NATALE, W.; COUTINHO, E. L. M.; BOARETTO, A. E.; BANZATTO, D. A. Nutrient foliar content for high productivity cultivars of guava in Brazil. In: TAGLIAVINI, M. (Ed.). Proceedings ISHS on Foliar Nutrition, **Acta Horticulturae**, Bologna, v. 594, p. 383-386, 2002.

NELSON, L. A.; ANDERSON, R. L. Partitioning of soil test-crop response probability. In: STELLY, M. (Ed.). **Soil testing: Correlating and interpreting the analytical results**. Madison: American Society of Agronomy, 1984. p. 19-38.

OSMAN, S. M.; ABD EL-RAHMAN, A. E. M. Effect of slow release nitrogen fertilization on growth and fruiting of guava under Mid Sinai conditions. **Australian Journal of Basic and Applied Science**, Pakistan, v. 3, p. 4366-4375, 2009.

PARENT, L. E. Diagnosis of the nutrient compositional space of fruit crops. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 33, p. 321-334, 2011.

PARENT, L. E.; CISSÉ, S.; TREMBLAY, N.; BÉLAIR, G. Row-centred log ratios as nutrient indexes for saturated extracts of organic soils. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 77, p. 571-578, 1997.

PARENT, L. E.; DAFIR, M. A theoretical concept of compositional nutrient diagnosis. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, Mount Vernon, v.117, p.239-242, 1992.

PARENT, L. E.; de ALMEIDA, C. X.; PARENT, S. E.; HERNANDES, A.; EGOZCUE, J. J.; KÄTTERER, T.; GÜLSER, C.; BOLINDER, M. A.; ANDRÉN, O.; ANCTIL, F.; CENTURION, J. F.; NATALE, W. Compositional analysis for an unbiased measure of soil aggregation. **Geoderma**, Amsterdam, v. 179, p. 123-131, 2012.

PARENT, L. E.; NATALE, W.; ZIADI, N. Compositional nutrient diagnosis of corn using the Mahalanobis distance as nutrient imbalance index. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 89, p. 383-390, 2009.

PARENT, S. E.; KARAM, A.; PARENT, L. E. Compositional modeling of C mineralization of organic materials in soils. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM OF AGRICULTURAL WASTE MANAGEMENT, 2., 2011, Foz do Iguaçu. **Proceedings...**, Foz do Iguaçu, Brazil, 2011.

PEARSON, K. Mathematical contributions to the theory of evolution - On a form of spurious correlation which may arise when indices are used in the measurement of organs. **Proceedings of the Royal Society of London**, London, v. LX, p. 489-502, 1897.

PEREIRA, F. M. 'Rica' e 'Paluma': novas cultivares de goiabeira. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE FRUTICULTURA, 7., 1983, Florianópolis. **Proceedings...** Florianópolis: Sociedade Brasileira de Fruticultura/EMPASC, 1984. p. 524-528.

QUAGGIO, J. A.; van RAIJ, B.; MALAVOLTA, E. Alternative use of the SMP-buffer solution to determine lime requirement of soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 16, p. 245-260, 1985.

RAIJ, B. van; QUAGGIO, J. A.; CANTARELLA, H.; FERREIRA, M. E.; LOPES, A. S.; BATAGLIA, O. C. **Análise química do solo para fins de fertilidade**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. 170 p.

SAS INSTITUTE. **SAS/STAT**: user's Guide. Version 9.2. Cary: SAS Institute, 2009. 7869 p.

SHOEMAKER, H. E.; McLEAN, E. O.; PRATT, P. F. Buffer methods for determining lime requirement of soils with appreciable amounts of extractable aluminium. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 25, p. 274-277, 1961.

TANNER, J. Fallacy of per-weight and per-surface area standards, and their relation to spurious correlation. **Journal of Applied Physiology**, Bethesda, v. 2, p. 1-15, 1949.

van den BOOGART, K. G.; TOLOSANA-DELGADO, R. "Compositions": a unified R package to analyze compositional data. **Computers & Geosciences**, [S.l.], v. 34, p. 320-338, 2008.

WELTJE, G. J. Quantitative analysis of detrital modes: statistically rigorous confidence regions in ternary diagrams and their use in sedimentary petrology. **Earth Science Reviews**, [S.l.], v. 57, p. 211-253, 2002.

CAPÍTULO 3 – Equilíbrio nutricional de goiabeiras a partir da adubação e calagem

RESUMO— A resposta da goiabeira à adubação e à calagem pode ser monitorada por análises de tecido vegetal. O perfil nutricional de cada cultura, usado para fins de diagnose da nutrição vegetal, é definido em relação à padrões de teores de nutrientes. No entanto, os teores-padrão de nutrientes são constantemente criticados por não considerarem as interações que ocorrem entre elementos e, por gerarem tendências numéricas, decorrentes da redundância dos dados, da dependência de escala e da distribuição não-normal. As técnicas de análise composicional de dados podem controlar esses dados tendenciosos, equilibrando os grupos de nutrientes, tais como os envolvidos na adubação e calagem. A utilização das razões log isométricas (*ilr*) ortonormais, sequencialmente dispostas, evitam tendências numéricas inerentes aos dados composicionais. Assim, o objetivo do trabalho foi avaliar um sistema de razões log isométricas (*ilr*) para corrigir tais distorções, relacionando os balanços de nutrientes dos tecidos vegetais, com a produção de goiabas, em pomares de ‘Paluma’, adubados e corrigidos, a fim de ajustar os atuais padrões de nutrientes às faixa de equilíbrio das goiabeiras mais produtivas. Foram utilizados dados de experimentos conduzidos durante três anos com doses de N, P e K e, durante sete anos, dados de experimento com doses de calcário, em pomares de goiabeiras, em Latossolos. Os teores foliares de N, P, K, Ca e Mg foram avaliados anualmente. Os balanços foliares [N, P, K | Ca, Mg], [N, P | K], [N | P] e [Ca | Mg] foram selecionados para separar os efeitos dos fertilizantes (N-K) e da calagem (Ca-Mg) no equilíbrio de nutrientes. Os balanços foliares foram mais influenciados pela calagem do que pela adubação. A produtividade das goiabeiras e seu balanço nutricional foliar permitiram a definição de faixas de equilíbrio de nutrientes e sua validação com as faixas de teores críticos atualmente utilizados no Brasil, bem como sua combinação em coordenadas *ilr*.

Palavras-chave: análise composicional de dados, balanço nutricional foliar, geometria de Aitchison, nutrição mineral vegetal, *Psidium guajava* L., razões log isométrica (*ilr*)

Introdução

O Brasil é o maior produtor mundial de goiabas vermelha, uma planta nativa da América Tropical. A goiaba é uma fruta consumida *in natura* ou transformada em geleia e suco. A cultivar Paluma é precoce, vigorosa e produtiva (PEREIRA, 1984). Seus frutos são ovais, saborosos, com um peso médio entre 140 e 250 g, casca amarela e polpa vermelha, firmes, resistentes ao transporte e armazenamento, e adequados tanto para a transformação como para o mercado de frutos frescos.

A goiabeira (*Psidium guajava* L.) é responsiva à adubação (ARORA; SINGH, 1970; NATALE et al., 1996; NATALE et al., 2002a; ANJANEYULU; RAGHUPATHI, 2009; OSMAN; ABD EL-RAHMAN, 2009) e à calagem (PRADO; NATALE, 2004, 2008; NATALE et al., 2005; NATALE et al., 2007). Para alcançar o equilíbrio nutricional, deve-se balancear a adubação e a calagem. A resposta da goiabeira à adubação e à calagem pode ser monitorada por meio de análises de tecido vegetal. A análise foliar apresenta vantagem sobre a análise do solo como ferramenta de diagnose para culturas frutíferas, as quais possuem sistema radicular profundo, já que a planta tem acesso a mais nutrientes no solo em profundidade do que seria determinado através de procedimentos normais da análise do solo (SMITH et al., 1985), além de estar ganhando popularidade (NATALE et al., 2002a).

A interpretação das análises de tecido vegetal baseia-se na premissa de que alterações no fornecimento de nutrientes são refletidas nos teores desses elementos no tecido vegetal, sendo acentuadas em determinadas fases do desenvolvimento da planta (BOULD, 1968). No entanto, os teores-padrão de nutrientes foram criticados por não considerarem as interações entre nutrientes (BATES, 1971), uma vez que várias interações duplas e múltiplas têm sido bem documentadas em plantas (BERGMANN, 1988; MALAVOLTA, 2006). O Sistema Integrado de Diagnose e Recomendação (DRIS) utiliza duplas relações de nutrientes e pode explicar, em parte, as interações entre elementos (WALWORTH; SUMNER, 1988); porém, é geometricamente deficiente, conforme demonstrado em Parent (2011). Parent e Dafir (1992) ajustaram o procedimento DRIS para que este permitisse a transformação da razão log centralizada, usada para analisar os dados composicionais como, por exemplo, os teores de nutrientes (AITCHISON, 1986).

Os dados do tecido vegetal transmitem informação relativa, sendo intrinsecamente multivariados, uma vez que cada componente não pode ser interpretado isoladamente, sem relacioná-lo aos demais componentes (TOLONASA-DELGADO; VAN DEN BOOGART, 2011). Lagatu e Maume (1935) foram os primeiros a ilustrarem os efeitos da alteração das proporções na interação de nutrientes em um sistema fechado, utilizando um diagrama ternário que representa um sistema de mistura de três componentes que fecham em 100%. Como o vetor composicional com D-partes contém uma parte redundante, calculado pela diferença entre o valor total e o valor das outras partes, há então pelo menos uma correlação negativa (AITCHISON, 1986) e D-1 variáveis não-redundantes (EGOZCUE; PAWLOWSKY-GLAHN, 2005). Além disso, existem três relações duplas em uma composição com D-partes, porém, uma é redundante, já que é calculada a partir das outras duas relações, isto é, $X/Z = [(X/Y) / (Z/Y)]$.

Para evitar a tendência numérica e a redundância inerente aos dados composicionais e gerar D-1 variáveis, Egozcue e Pawlowski-Glahn (2005) propuseram o uso de razões log isométricas (*ilr*) ortonormais, sequencialmente dispostas, baseadas no princípio da ortogonalidade. As coordenadas *ilr* podem ser projetadas para o espaço Euclidiano, uma estrutura geométrica que permite cálculos estatísticos sem tendências numéricas. O método *ilr* é realizado em três etapas: a representação dos dados em coordenadas *ilr*; a análise de variância das coordenadas como variáveis reais aleatórias; e, a interpretação dos resultados em termos de balanços (EGOZCUE; PAWLOWSKY-GLAHN, 2011).

Assim, a hipótese do presente estudo é de que a interpretação das análises de tecidos vegetais utilizando o conceito *ilr* seja melhor que as interpretações provenientes do uso de outras abordagens. Com isso, o objetivo deste trabalho foi comparar os efeitos da adubação NPK e da calagem nos balanços foliares de macronutrientes (N, P, K, Ca e Mg) de goiabeiras da cultivar Paluma, utilizando o conceito imparcial *ilr* e os nutrientes-padrão atualmente utilizados no Brasil.

Material e métodos

Os resultados utilizados para a formação da base de dados deste estudo foram de experimentos conduzidos com a cultura da goiaba, realizados por Natale (1993) e Natale (1999), coletados durante a formação e desenvolvimento das goiabeiras, totalizando 468 observações; e de um experimento com doses de calcário conduzido por Natale et al. (2007) e Prado e Natale (2008) com a cultivar Paluma, durante sete anos (1999 - 2006), em um Latossolo Vermelho, distrófico típico, de textura média (EMBRAPA, 2006), em Bebedouro (São Paulo), totalizando 100 observações.

Experimentos de adubação

Três experimentos com doses de NPK foram conduzidos durante três safras agrícolas consecutivas, em São Carlos, no estado de São Paulo, Brasil, em um Latossolo Vermelho-Amarelo, epieutrófico, endodistrófico, A moderado, textura média, fase cerrado e relevo plano (EMBRAPA, 2006). Os experimentos com adubação NPK foram iniciados em Abril/Maio de 1989, com mudas de um ano de idade da cultivar Paluma, propagadas por estacas herbáceas e conduzidas durante três anos consecutivos. As parcelas foram constituídas de quatro plantas, das quais a primeira foi a planta de bordadura, em espaçamento 7 x 5 m, considerando apenas 3 plantas como úteis para fins de avaliação. Três áreas diferentes receberam doses variáveis de fertilizantes N, P e K. O delineamento adotado foi o de blocos casualizados, com sete tratamentos e quatro repetições. As doses de fertilizantes foram incrementadas proporcionalmente a cada ano, levando-se em conta a remoção de nutrientes pela colheita e, principalmente, o aumento da demanda por nutrientes decorrente do desenvolvimento das frutíferas.

No primeiro ano, os tratamentos com doses de nitrogênio foram zero, 30, 60, 120, 180, 240 e 300 g de N planta⁻¹, suplementado com 120 g de P₂O₅ planta⁻¹ e 120 g de K₂O planta⁻¹. As doses iniciais de N foram duplicadas e triplicadas no segundo e terceiro anos, respectivamente. As doses de P e K iniciais foram dobradas no

segundo ano, e no terceiro ano, as doses de P e K foram, respectivamente, 240 g de P_2O_5 planta⁻¹ e 360 g K_2O planta⁻¹.

Os tratamentos com doses de fósforo, no primeiro ano, foram zero, 30, 60, 120, 180, 240 e 300 g de P_2O_5 planta⁻¹, suplementado com 120 g de N planta⁻¹ e 120 g de K_2O planta⁻¹. No segundo e terceiro anos, as doses de P iniciais foram dobradas, enquanto as doses de N e K foram dobradas e triplicadas respectivamente.

No primeiro ano, os tratamentos com doses de potássio foram zero, 30, 60, 120, 180, 240 e 300 g de K_2O planta⁻¹, suplementado com 120 g de N planta⁻¹ e 120 g de P_2O_5 planta⁻¹. No segundo ano, as doses de N, P e K foram duplicadas e, no terceiro, as doses de N e K foram triplicadas e suplementadas com 240 g de P_2O_5 planta⁻¹.

No experimento com doses de N, as fontes de N, P e K usadas foram, respectivamente, nitrato de amônio (34% N), superfosfato simples (18% P_2O_5) e cloreto de potássio (60% K_2O). Nos experimentos com doses de P e K, as fontes de N, P e K empregadas foram sulfato de amônio (20% N), superfosfato triplo (44% P_2O_5) e cloreto de potássio (60% K_2O) respectivamente. Os fertilizantes foram aplicados manualmente ao redor da planta, em uma faixa de 40 cm de largura na projeção da copa.

Durante a condução dos experimentos no campo, foram realizados os tratos culturais normais, necessários ao bom desenvolvimento das plantas. O sistema de condução foi o de poda de limpeza e condução, com uma produção por ano, não irrigado. Para avaliar a produção, os frutos foram colhidos de uma a três vezes por semana, que ocorreu de janeiro/fevereiro a maio/junho de cada ano.

Experimento de calagem

Os tratamentos consistiram de cinco doses de calcário e quatro repetições, dispostos em delineamento de blocos casualizados. O calcário foi incorporado ao solo em agosto de 1999, e as mudas de goiabeira da cultivar Paluma, propagadas por estacas, foram plantadas em dezembro de 1999. Os tratamentos consistiram de

doses crescentes de calcário, tomando-se como referência a dose necessária para atingir a saturação por bases (V) igual a 70%, considerada ideal para a goiabeira (SANTOS; QUAGGIO, 1996). As doses de calcário foram calculadas considerando os resultados médios da análise química das camadas de 0-20 e 20-40 cm de profundidade e, também, para a incorporação na camada de 0-30 cm, como segue: D_0 = zero calcário; D_1 = metade da dose para alcançar V% de 70%; D_2 = a dose para alcançar V% de 70%; D_3 = 1,5 vezes a dose para alcançar V% de 70%; e, D_4 = 2 vezes a dose para alcançar V% de 70%, correspondendo a zero; 1,9; 3,8; 5,6 e 7,4 toneladas de calcário ha^{-1} respectivamente. O calcário utilizado continha 455,5 g de CaO kg^{-1} e 102,1 g de MgO kg^{-1} (relação molar Ca/Mg = 3,2). A eficiência relativa (distribuição granulométrica do calcário) foi de 93,72% e, o poder relativo de neutralização total igual a 106,85%. O calcário foi aplicado manualmente de forma uniforme sobre toda a área, metade antes da incorporação com arado de aivecas e a outra metade após essa operação, mas, antes da incorporação com grade aradora.

As parcelas foram constituídas por cinco plantas, espaçadas de 7 x 4,2 m, sendo as três goiabeiras centrais consideradas úteis para fins de avaliações. O sistema de condução foi o de poda de limpeza e condução, com uma produção por ano, não irrigado. As adubações, durante todo o período experimental, foram baseadas nas recomendações de Natale et al. (1996), sendo 140 g de N e 112g de K_2O no primeiro ano; 200 g de N e 50 g K_2O no segundo ano; 200 g de N, 30 g de P_2O_5 e 150 g de K_2O no terceiro ano; 400 g de N, 60 g de P_2O_5 e 300 g de K_2O no quarto ano; 800 g de N, 50 g de P_2O_5 e 300 g de K_2O no quinto ano; e 800 g N, 50 g de P_2O_5 e 300 g de K_2O no sexto ano. Os fertilizantes foram aplicados 3 a 4 vezes durante o período de crescimento. No segundo, terceiro e quarto anos, um adubo orgânico bovino foi adicionado, na dose de 40 L $planta^{-1}$. As fontes de fertilizantes usadas foram uréia e sulfato de amônio (1:1), superfosfato triplo ou fosfato mono-amônico e cloreto de potássio. Os adubos foram aplicados ao redor da planta, em uma faixa de 40 cm de largura, na projeção da copa das goiabeiras. Entre 2002 e 2006 a produção de goiabas, o número e o peso dos frutos foram determinados semanalmente e, ocasionalmente, duas a três vezes por semana no período de safra, que se estendeu de janeiro/fevereiro a maio/junho de cada ano.

Amostragens e análises químicas de solo e folhas

Para a caracterização inicial, os solos foram amostrados em quatro locais por planta (Norte, Sul, Leste e Oeste), na camada de solo de 0-20 cm no início do experimento, a fim de compor a amostra composta (12 pontos) por parcela. As amostras de solo foram secas ao ar e analisadas quanto ao pH (CaCl_2), matéria orgânica, K, Ca, Mg e (H + Al), segundo metodologia de Raij et al. (1987). As análises de solo estão apresentadas na Tabela 1.

Para a análise foliar, foram amostrados trinta pares de folhas com pecíolos, maduras (o terceiro a partir da ponta do ramo), foram coletadas na época da floração, 1,5 m acima do solo, como descrito por Natale et al. (1996). As amostras de tecido foram secas em estufa a 65°C e analisadas para N, P, K, Ca e Mg, de acordo com Bataglia et al. (1983). O N foi determinado pelo método micro Kjeldahl. O P foi quantificado por colorimetria e os cátions por espectrofotometria de absorção atômica, após digestão nítrico-perclórica.

Tabela 1. Propriedades do solo no início dos experimentos

Experimentos	pH CaCl_2	Matéria Orgânica g dm^{-3}	P resina mg dm^{-3}	K	Ca	Mg	H + Al
				$\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$			
Adubação							
Latossolo Vermelho-Amarelo	5,3	19	19	0,5	14	8	18
Calagem							
Latossolo Vermelho	4,7	18	6	1,3	9	4	40

Balanco de nutrientes foliares

O vetor composicional das análises de tecido foi composto pelos nutrientes N, P, K, Ca e Mg. A partição binária sequencial (PBS) pode ser arranjada de forma a facilitar a interpretação dos balanços, em relação aos objetivos deste estudo. Parent (2011) iniciou a partição binária sequencial (PBS) entre grupos de nutrientes,

contrastando os ânions (N, P) com os cátions (K, Ca, Mg), em uma perspectiva fisiológica. No presente estudo, os balanços foram iniciados com um contraste entre os nutrientes dos fertilizantes (N, P, K) e os nutrientes do calcário (Ca, Mg), a fim de separar os efeitos da adubação e da calagem no balanço dos nutrientes foliares (Tabela 2).

Tabela 2. Partições sequenciais ortogonais de macronutrientes foliares

<i>ilr</i>	Nutrientes					Balanço	$r^{\dagger}$	s	Cálculo <i>ilr</i>
	N	P	K	Ca	Mg				
1	1	1	1	-1	-1	[N, P, K Ca, Mg]	3	2	$\sqrt{\frac{3 \times 2}{3 + 2}} \ln \left(\frac{(NxPxK)^{1/3}}{(CaxMg)^{1/2}} \right)$
2	1	1	-1	0	0	[N, P K]	2	1	$\sqrt{\frac{2 \times 1}{2 + 1}} \ln \left(\frac{(NxP)^{1/2}}{K} \right)$
3	1	-1	0	0	0	[N P]	1	1	$\sqrt{\frac{1 \times 1}{1 + 1}} \ln \left(\frac{N}{P} \right)$
4	0	0	0	1	-1	[Ca Mg]	1	1	$\sqrt{\frac{1 \times 1}{1 + 1}} \ln \left(\frac{Ca}{Mg} \right)$

[†] r = número de sinais positivos e s = número de sinais negativos.

Transformação da razão log isométrica

Cada coordenada *ilr* foi calculada da seguinte forma (EGOZCUE; PAWLOWSKY-GLAHN, 2005):

$$ilr_j = \sqrt{\frac{rs}{r+s}} \ln \frac{g(c_+)}{g(c_-)} \text{ com } j = [1, 2, \dots, D - 1] \quad 7)$$

em que ilr_j é a razão log isométrica j -ésima, r e s representam os números de componentes em grupos positivos (+) e negativos (−) em cada partição binária, respectivamente, $g(c_+)$ é a média geométrica dos componentes nos grupos positivos c_+ , e $g(c_-)$ é a média geométrica dos componentes nos grupos negativos

c_- (Tabela 2). O coeficiente $\sqrt{\frac{rs}{r+s}}$ representa o equilíbrio entre o número de componentes nos grupos positivos e negativos.

Cálculos

As faixas críticas de balanços foram obtidas a partir de teores-padrão de nutrientes, indicados por Natale et al. (2002a) e Maia et al. (2007). Resumidamente, os limites inferiores de teores foram estabelecidos usando os menores valores no numerador e, os mais elevados no denominador, enquanto os limites superiores foram obtidos pela relação entre os maiores valores de teores no numerador e os menores no denominador. Natale et al. (2002b) propuseram faixas de teores de 20-23 g de N kg⁻¹; 1,4-1,8 g de P kg⁻¹; 14-17 g K kg⁻¹; 7-11 g de Ca kg⁻¹; e, 3,4-4,0 g de Mg kg⁻¹ durante o florescimento. Maia et al. (2007) sugeriram faixas de teores de 20,2-25,3 g de N kg⁻¹; 1,4-1,5 g de P kg⁻¹; 19,0-21,7 g K kg⁻¹; 7,7-8,3 g de Ca kg⁻¹; e 2,7-2,8 g Mg kg⁻¹ em folhas coletadas entre a brotação e a frutificação.

Análises estatísticas

Os cálculos *ilr* e as análises discriminantes foram conduzidos no ambiente de computação do R estatístico (IHAKA; GENTLEMAN, 1996), que é um *software* gratuito, usando o pacote composicional (VAN DEN BOOGART; TOLOSANA-DELGADO, 2008) para análise de dados composicionais. As análise de variância foram realizadas pelo PROC MIXED do SAS (*Statistical Analysis System*, versão 9.2., 2009), e suas significâncias verificadas pelo teste t.

Resultados e discussão

Produção de frutos

A produtividade de goiabas aumentou rapidamente durante os três primeiros anos de desenvolvimento da cultura, atingindo a máxima produção depois disso, declinando em seguida, podendo ser devido à alternância de produção, que ocorre em muitas frutíferas (ISAGI et al., 1997; MONSELISE; GOLDSCHMIDT, 1982), apesar de não haver nenhum relato científico de tal alternância na cultura da goiaba. A produção de frutos foi superior nos experimentos de adubação (Figura 1) comparativamente ao de calagem (Figura 2), apesar de possuírem o mesmo sistema de condução. A reposta das goiabeiras à adição de N e K foi significativa apenas no terceiro ano, com ajuste linear (Figuras 1a e 1b), enquanto a reposta à calagem foi significativa nos quatro primeiros anos, exceto no quinto ano (2006), apresentando ajuste linear no primeiro, terceiro e quarto anos (2002, 2004 e 2005) e ajuste quadrático no segundo ano (2003) (Figura 2). A cultura da goiaba geralmente apresenta pouca resposta às adições de P (Figura 1c) em condições brasileiras (NATALE et al., 2002b).

A produção aumentou anualmente até alcançar seu valor máximo no terceiro ano após o estabelecimento da cultura (Figura 1). É por isso que as doses de N, P e K foram ajustadas anualmente durante o experimento, a fim de contabilizar as exportações por meio das colheitas e, principalmente, para suprir a demanda da planta devido ao seu desenvolvimento. O aumento linear da produção com a adição de N (Figura 1a) foi bem modesto, podendo ser devido à competição entre os micro-organismos do solo e a frutífera pelo N disponível, relacionada com uma rápida taxa de reciclagem da matéria orgânica do solo em condições tropicais (KRULL, 2002) e associada à diminuição na relação C/N (ZHANG; HE, 2004). Os experimentos proporcionaram um amplo espectro de produção de frutos e balanços de nutrientes foliares ao longo dos anos.

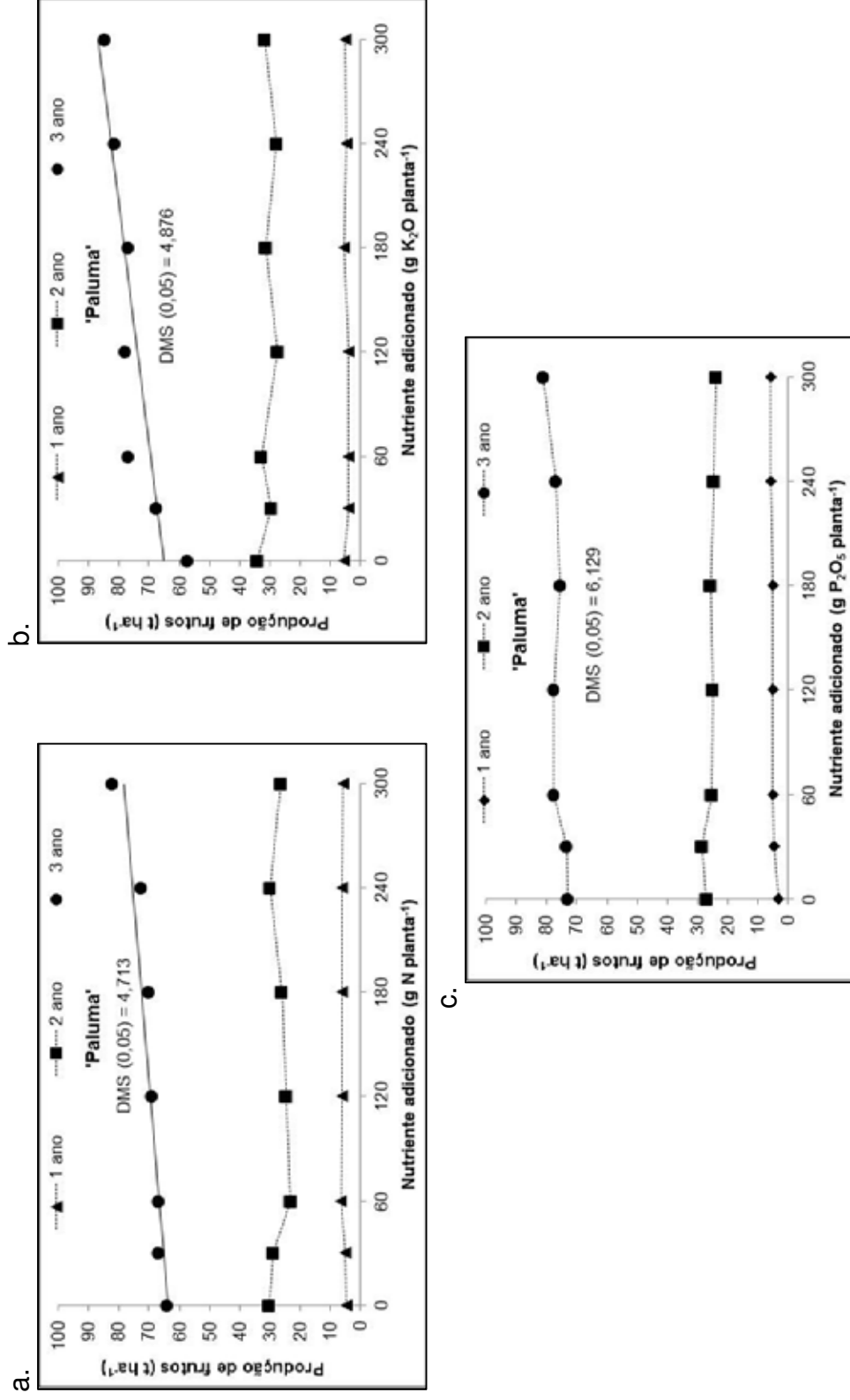


Figura 1. Produção de goiabas em resposta à adição de N (1a), K (1b) e P (1c). DMS = diferença mínima significativa a 0,05 de probabilidade. † Doses de N e K no 1º ano: zero, 30, 60, 120, 180, 240 e 300g de N ou $K_2O\ planta^{-1}$ respectivamente, no 2º e 3º anos o dobro e o triplo das doses iniciais, respectivamente. Doses de P no 1º ano: zero, 30, 60, 120, 180, 240 e 300g de $P_2O_5\ planta^{-1}$, no 2º e 3º anos o dobro das doses iniciais.

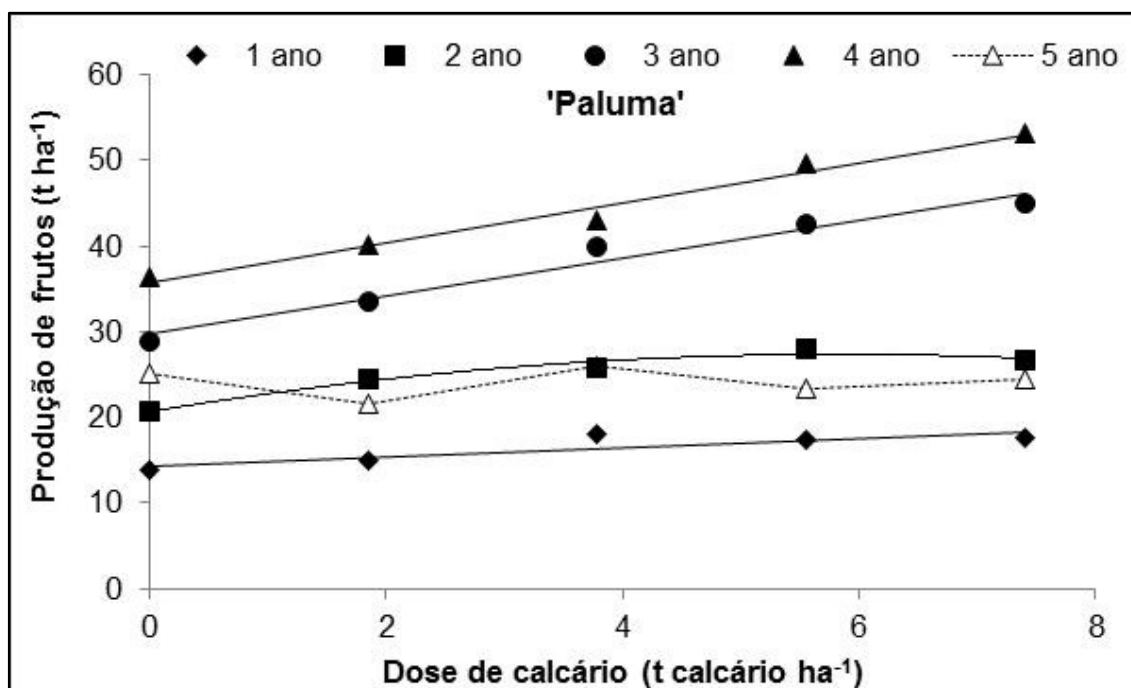


Figura 2. Produção de goiabas em resposta à adição de calcário.

Intervalos críticos de equilíbrio

As faixas de balanços de nutrientes foliares obtidas pela combinação de teores-padrão de nutrientes relatados por Natale et al. (2002b) e Maia et al. (2007) são apresentados na Tabela 3. As faixas de balanços foliares, calculadas a partir das indicações de Maia et al. (2007), estavam fora do alcance dos balanços foliares das frutíferas de maiores rendimento deste estudo (Figura 3). Em particular, os balanços foliares [N, P, K | Ca, Mg] (Figura 3a), [N | P] (Figura 3c) e [Ca | Mg] (Figura 3d) foram demasiadamente elevados, impulsionados por teores foliares inferiores de Ca, Mg e P e teores foliares mais elevados de K. Os padrões derivados de Natale et al. (2002b) parecem ser suficientes para os balanços foliares [N, P, K | Ca, Mg] (Figura 3a) e [N,P|K] (Figura 3b), mas poderiam ser ajustados para os balanços foliares [N | P] (Figura 3c) e [Ca | Mg] (Figura 3d), como sugerido na Tabela 3, a fim de englobar dados que também apresentaram alta produção.

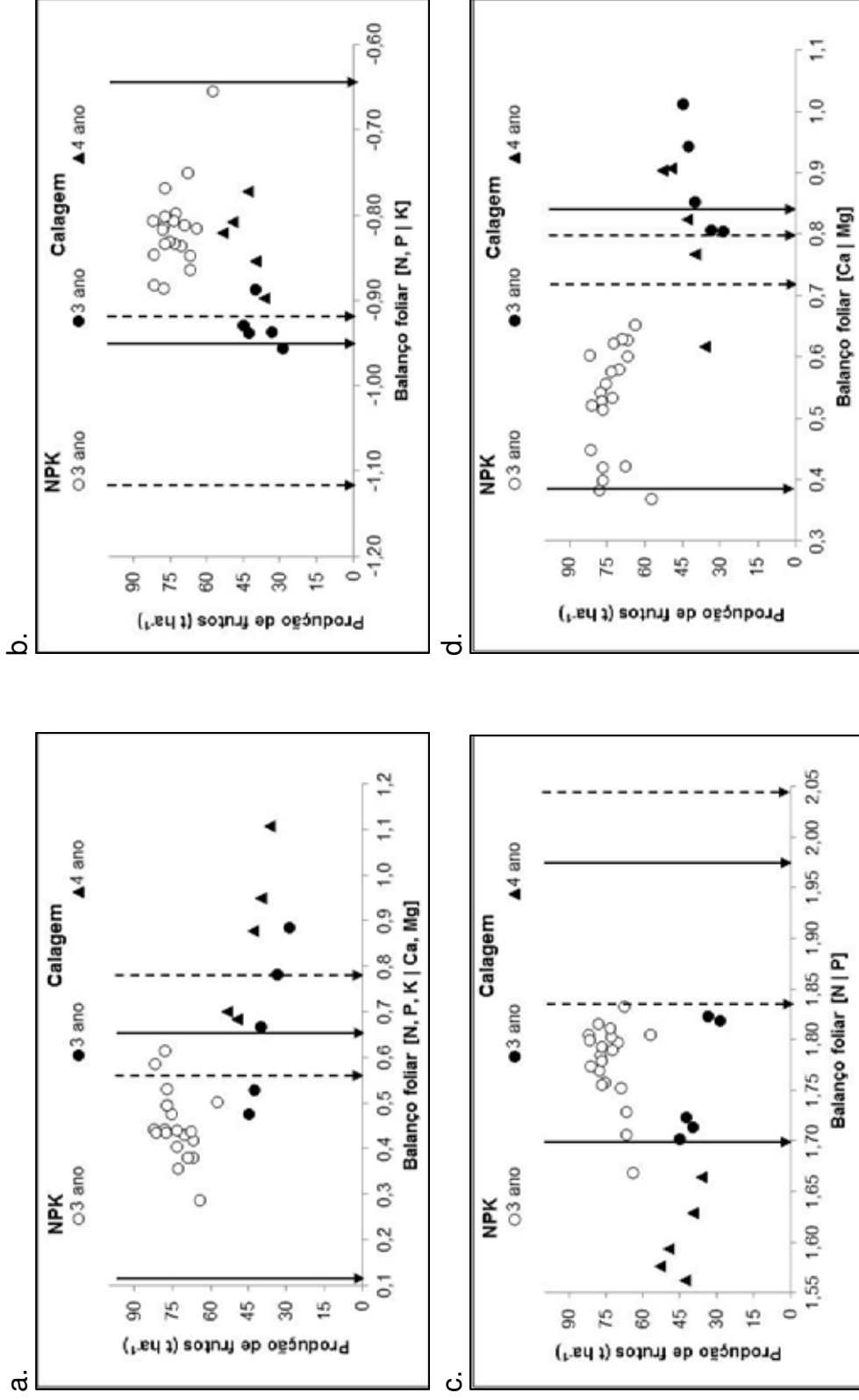


Figura 3. Relações entre os balanços de nutrientes foliares e o rendimento de goiabeiras 'Paluma'. As setas são as faixas de balanços de nutrientes (LI e LS) calculadas a partir de Natale (2002b) (setas cheias) e Maia et al. (2007) (setas tracejadas).

Tabela 3. Melhores faixas de balanços de nutrientes de acordo com as faixas de suficiência de nutrientes descritas por Natale et al. (2002a) e Maia et al. (2007)

Balanço Foliar	Faixa de Balanços de Nutrientes Foliares					
	NATALE et al. (2002a)		MAIA et al. (2007)		NATALE et al. (2002a) Ajustado	
	LI	LS	LI	LS	LI	LS
[N, P, K Ca, Mg]	0,108	0,658	0,572	0,789	0,108	0,658
[N, P K]	-0,953	-0,635	-1,148	-0,920	-0,953	-0,635
[N P]	1,703	1,979	1,839	2,047	1,65	1,85
[Ca Mg]	0,396	0,830	0,715	0,794	0,35	0,65

[†] LI = limite inferior e LS = limite superior.

As variações sazonais nos balanços foliares de nutrientes são apresentadas nas Figuras 4 a 7. Os balanços foliares de N não parecem ser limitantes (Figura 4), apesar da resposta significativa da produção de frutos à adição de N no terceiro ano (Figura 1a). Do mesmo modo, o fósforo não foi deficiente (Figura 5). O potássio começou a ser limitante, como mostrado pelo balanço foliar [N, P | K], excessivamente elevado (Figura 6). A goiabeira é, em geral, sensível às adubações potássicas (NATALE et al., 1996), já que a colheita extrai 1.554 g K por tonelada de fruta fresca (NATALE et al., 2002b). Em comparação, foi reportado que outras cultivares de goiabeiras podem extrair de 726 a 3130 g de K por tonelada de fruta fresca (HAAG et al, 1993; NATALE et al, 2002b). Assim, 80 t ha⁻¹ de frutos da cultivar Paluma extraem 124 kg K ha⁻¹ ou, aproximadamente 150 kg de K₂O ha⁻¹. Como a resposta da cultura e o balanço foliar de nutrientes foram satisfatórios com as aplicações de K de 30 a 60 g K₂O planta⁻¹, as reservas de K no solo parecem suportar em grande parte os requisitos de K pela cultura em nível de alto rendimento. Natale et al. (2001) mostraram que o feldspato na fração silte e as micas na fração argila contribuíram mais para a concentração total de K do solo em um Latossolo brasileiro sob produção de goiabas. A elevada densidade de carga superficial da caulinita resulta em elevada afinidade desta por potássio (LEVY et al., 1988).

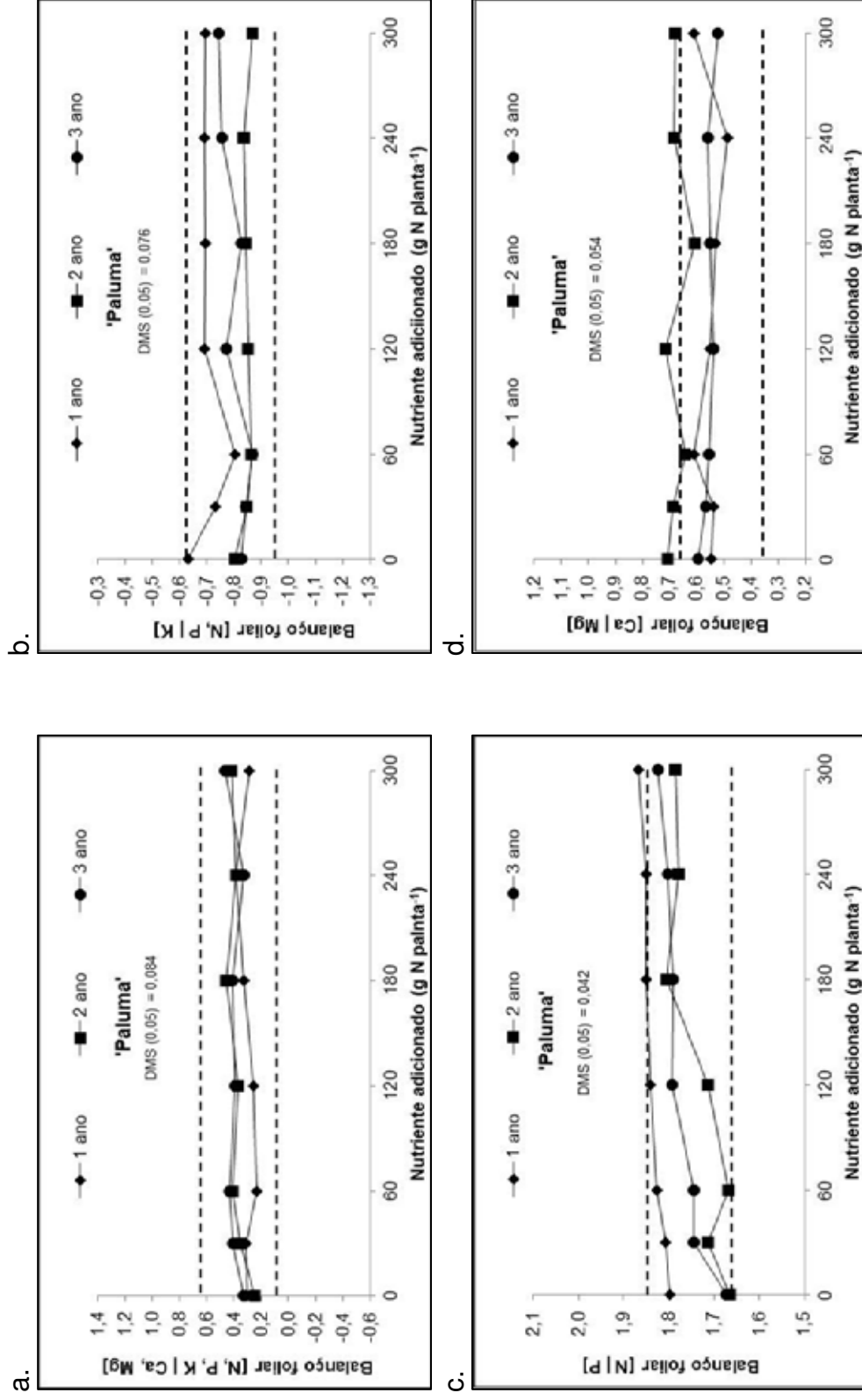


Figura 4. Balanços foliares de nutrientes da goiabeira 'Paluma' em resposta à adição de N. As linhas pontilhadas indicam a faixa de balanço crítico. DMS = diferença mínima significativa a 0,05 de probabilidade. † Doses de N no 1º ano: zero, 30, 60, 120, 180, 240 e 300g de N planta⁻¹, no 2º e 3º anos o dobro e o triplo das doses iniciais, respectivamente.

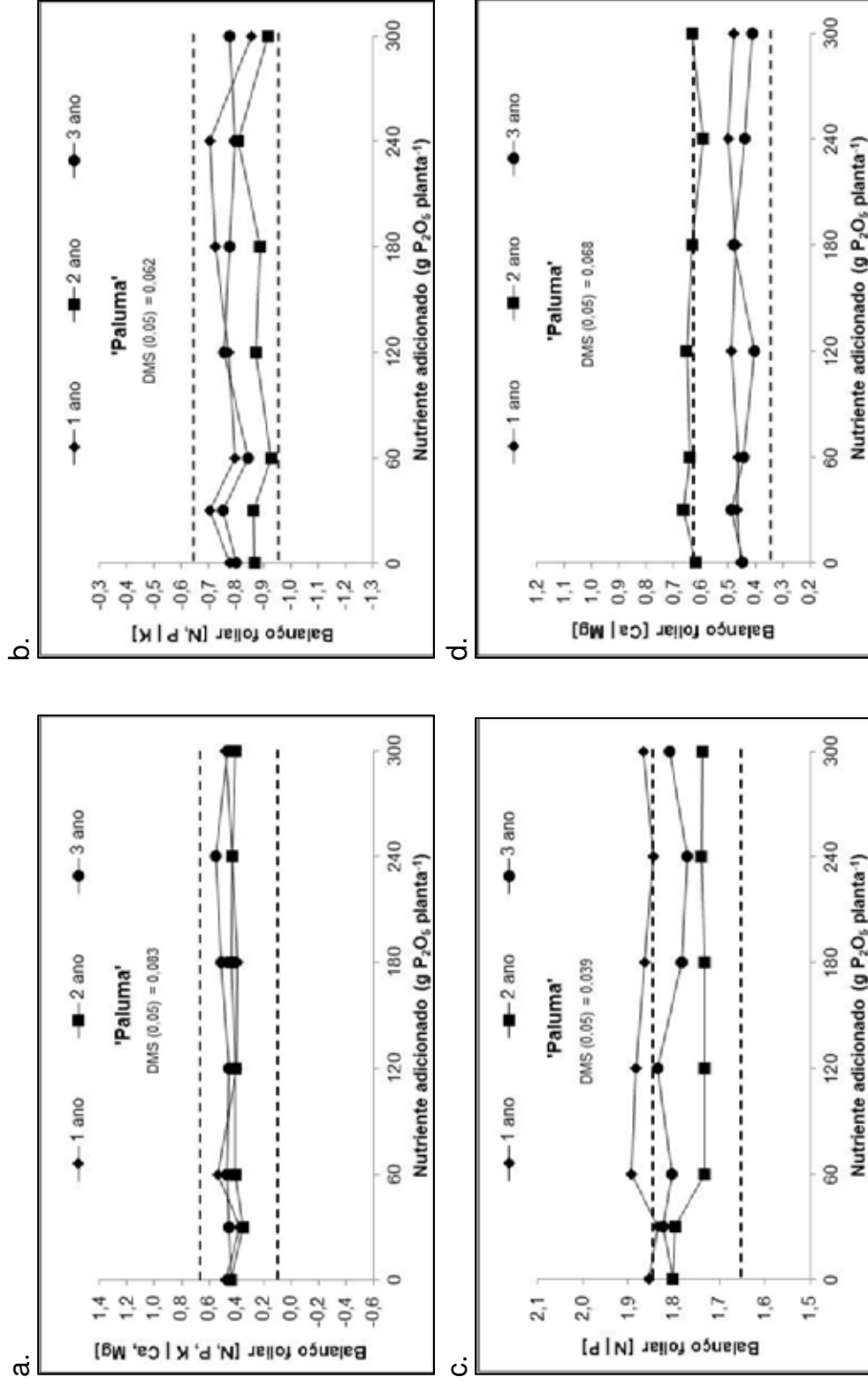


Figura 5. Balanços foliares de nutrientes da goiabeira 'Paluma' em resposta à adição de P. As linhas pontilhadas indicam a faixa de balanço crítico. DMS = diferença mínima significativa a 0,05 de probabilidade. † Doses de P no 1º ano: zero, 30, 60, 120, 180, 240 e 300g de P_2O_5 planta⁻¹, no 2º e 3º anos o dobro das doses iniciais.

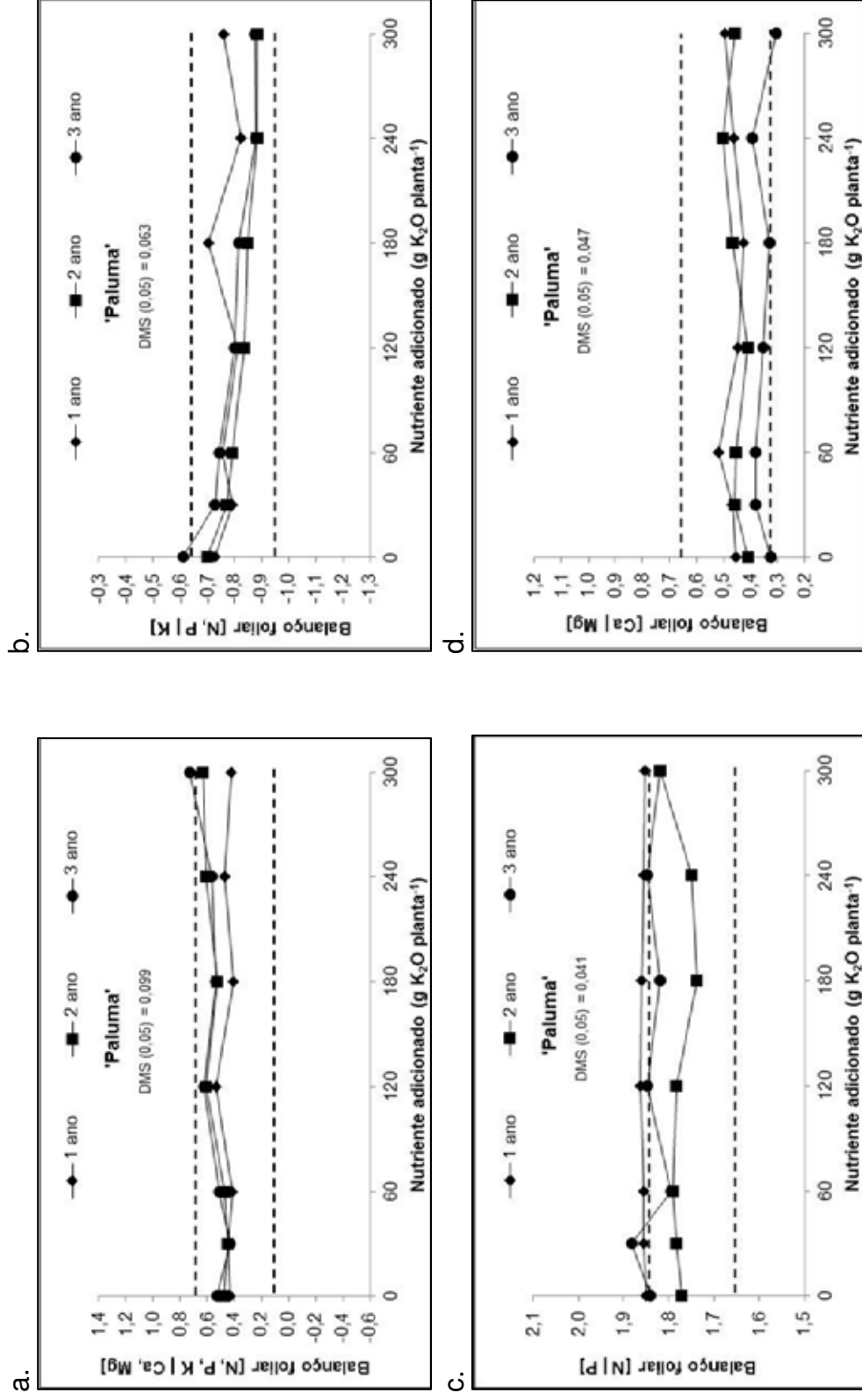


Figura 6. Balanços foliares de nutrientes da goiabeira 'Paluma' em resposta à adição de K. As linhas pontilhadas indicam a faixa de balanço crítico. DMS = diferença mínima significativa a 0,05 de probabilidade. † Doses de K no 1º ano: zero, 30, 60, 120, 180, 240 e 300g de K₂O planta⁻¹, no 2º e 3º anos o dobro e o triplo das doses iniciais, respectivamente.

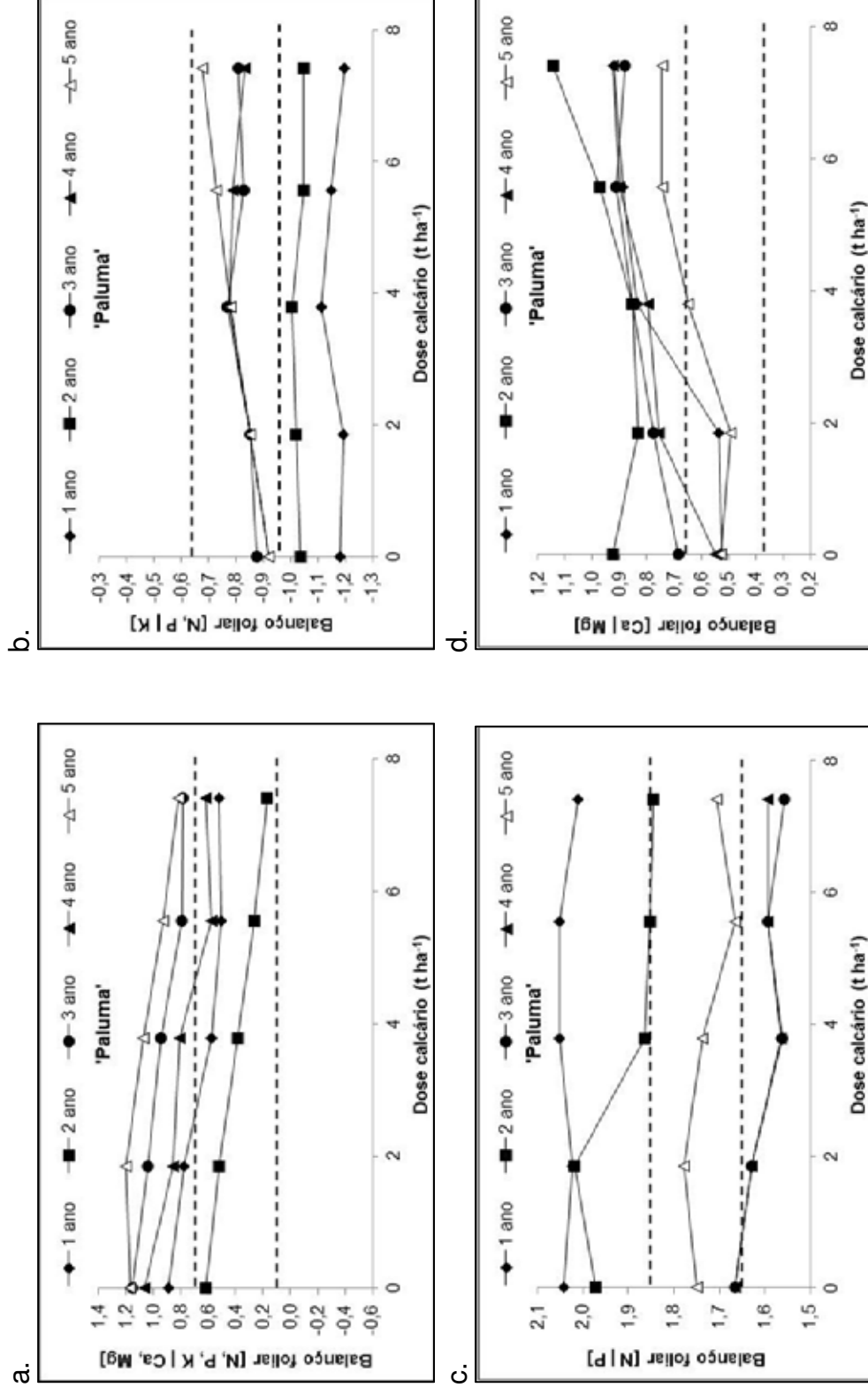


Figura 7. Balanços foliares de nutrientes da goiabeira 'Paluma' em resposta à aplicação de calcário. As linhas pontilhadas indicam a faixa de balanço crítico.

Casos de desequilíbrio de nutrientes ocorreram durante os primeiros dois anos de colheita no experimento de calagem (Figura 7) devido, provavelmente, ao sistema radicular limitado decorrente do nível de acidez do solo. De fato, a expansão do sistema radicular de goiabeiras recém-cultivadas é muito sensível à acidez do solo (PRADO; NATALE, 2004). O balanço foliar [N, P, K | Ca, Mg] (Figura 7a) foi melhorado no quinto ano depois da calagem na dose mais elevada, devido ao aumento da disponibilidade de Ca e Mg. O balanço foliar [N, P | K] (Figura 7b) e [N | P] (Figura 7c) foi próximo às faixas de balanços foliares ajustadas, relatadas por Natale et al. (2002b), no segundo ano após a calagem, indicando um efeito positivo da calagem sobre a disponibilidade de P e K. O balanço foliar [Ca | Mg] esteve acima da faixa ideal (Figura 7d), exceto no quinto ano, quando a dose de calcário não ultrapassou $3,8 \text{ t ha}^{-1}$ (tratamento D₂). Apesar de o calcário utilizado conter tanto Ca quanto Mg, a relação Ca/Mg foi aparentemente muito alta. Embora a dose de calcário de $3,8 \text{ t ha}^{-1}$ possa ser suficiente para atingir o nível de produção de goiabas mais alto e, os balanços foliares de nutrientes adequados, uma dose mais elevada de calcário pode ser necessária quando elevadas doses de fertilizantes contendo amônio são aplicadas. Natale et al. (2007) e Prado e Natale (2004) recomendam uma dose mínima de calcário de $5,6 \text{ t ha}^{-1}$ para manter a saturação por base da CTC próxima a 55% e o pH (CaCl₂) acima de 5,3 durante pelo menos 40 meses após a aplicação do corretivo.

Conclusão

A produção de goiabas e o balanço de nutrientes foliares, através de um grande espectro de regime de adubação e calagem, permitiram definir faixas de balanços foliares que tendem a diferir das atuais, tanto nos limites inferiores como superiores. A goiabeira foi mais responsiva à adição de K e à calagem, do que aos outros nutrientes. A calagem mostrou ser de extrema importância na nutrição mineral da goiabeira, mostrando maior influência na variação anual do balanço de nutrientes foliares, quando comparado à influência da fertilização. O *ilr* demonstrou ser um índice viável e confiável para cálculos de balanços de nutrientes foliares.

Referências

AITCHISON, J. **The statistical analysis of compositional data**. London: Chapman & Hall, 1986. 416 p.

ANJANEYULU, K.; RAGHUPATHI, H. B. Identification of yield-limiting nutrients through DRIS leaf nutrient norms and indices in guava (*Psidium guajava*). **Indian Journal of Agricultural Sciences**, New Delhi, v. 79, p. 418-421, 2009.

ARORA, J. S.; SINGH, J. R. Effect of nitrogen, phosphorus and potassium sprays on guava (*Psidium guajava* L.). **Journal of the Japanese Society for Horticultural Science**, Kyoto, v. 39, p. 55-62, 1970.

BATAGLIA, O. C.; FURLANI, A. M. C.; TEIXEIRA, J. P. F; FURLANI, P. R.; GALLO, J. R. **Métodos de análise química de plantas**. Campinas: Instituto Agrônômico, 1983. 48 p.

BATES, T. E. Factors affecting critical nutrient concentrations in plants and their evaluation: a review. **Soil Science**, Baltimore, v. 112, p. 116-130, 1971.

BERGMANN, W. **Ernährungs-störungen bei Kulturpflanzen**. 2nd. ed. Stuttgart: Auflage, Gustav Fischer Verlag, 1988. 762 p.

BOULD, C. Leaf analysis as a diagnostic method and advisory aid in crop production. **Experimental Agriculture**, Dundee, v. 4, p. 17-27, 1968.

EGOZCUE, J. J.; PAWLOWSKY-GLAHN, V. Análisis composicional de datos en Ciencias Geoambientales. **Boletín Instituto Geológico y Minero**, Madrid, v. 122, p. 439-452, 2011.

EGOZCUE, J. J.; PAWLOWSKY-GLAHN, V. Groups of parts and their balances in compositional data analysis. **Mathematical Geology**, New York, v.37, p. 795-828, 2005.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de classificação de solos**. 2nd. ed. Rio de Janeiro, Brasil: Embrapa Solos, 2006. 306 p.

HAAG, H. P.; MONTEIRO, F. A.; WAKAKURI, P. Y. Frutos de goiaba: desenvolvimento e extração de nutrientes. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 50, p. 413-418, 1993.

IHAKA, R.; GENTLEMAN, R. R: A language for data analysis and graphics. **Journal of Computational and Graphical Statistics**, Alexandria, v. 5, p. 299-314, 1996.

ISAGI, Y.; SUGIMURA, K.; SUMIDA, A.; ITO, H. How does masting happen and synchronize?. **Journal of Theoretical Biology**, Amsterdam, v. 187, p. 231-239, 1997.

KRULL, E. Soil organic matter decomposition and turnover in a tropical Ultisol: evidence from $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ and geochemistry. **Radiocarbon**, Tucson, v. 44, p. 93-112, 2002.

LAGATU, H.; MAUME, L. The variations of the sum $\text{N} + \text{P}_2\text{O}_5 + \text{K}_2\text{O}$ per 100 parts of dry material of the leaf of a cultivated plant. **Comptes Rendus de l'Académie D'Agriculture de France**, Paris, v. 21, p. 85-92, 1935.

LEVY, G. J.; van der WATT, H. V. H.; SHAINBERG, I.; du PLESSIS, H. M. Potassium-calcium and sodium-calcium exchange on kaolinite and kaolinitic soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 52, p. 1259-1264, 1988.

MAIA, J. L. T.; BASSOI, L. H.; SILVA, D. J.; LIMA, M. A. C. D.; ASSIS, J. S. D.; MORAIS, P. L. D. D. Assessment on nutrient levels in the aerial biomass of irrigated guava in São Francisco valley, Brazil. **Revista Brasileira Fruticultura**, Jaboticabal, v. 29, p. 705-709, 2007.

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

MONSELISE, S. P.; GOLDSCHMIDT, E. E. Alternate bearing in fruit trees. **Horticultural Review**, New York, v. 4, p. 128-173, 1982.

NATALE, W. **Diagnose da nutrição nitrogenada e potássica em duas cultivares de goiabeira (*Psidium guajava* L.), durante três anos**. 1993. 150 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1993.

NATALE, W. **Resposta da goiabeira à adubação fosfatada**. 1999. 132 p. Tese de Livre-Docência - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias - Unesp, Jaboticabal, 1999.

NATALE, W.; COUTINHO, E. L. M.; BOARETTO, A. E. PEREIRA, F. M. Effect of potassium fertilization in 'Rica' guava cultivation. **Indian Journal of Agricultural Sciences**, New Delhi, v. 66, p. 201-207, 1996.

NATALE, W.; COUTINHO, E. L. M.; BOARETTO, A. E., BANZATTO, D. A. Phosphorus foliar fertilization in guava trees. In: TAGLIAVINI, M. (Ed.). Proceedings ISHS on Foliar Nutrition, **Acta Horticulturae**, Bologna, v. 594, p. 171-177, 2002a.

NATALE, W.; COUTINHO, E. L. M.; BOARETTO, A. E.; BANZATTO, D. A. Nutrient foliar content for high productivity cultivars of guava in Brazil. In: TAGLIAVINI, M. (Ed.). Proceedings ISHS on Foliar Nutrition, **Acta Horticulturae**, Bologna, v. 594, p. 383-386, 2002b.

NATALE, W.; JUNIOR, J. M.; BOARETTO, A. E.; SIMÕES, F. L. Mineralogy and forms of potassium in red yellow latosol of a guava (*Psidium guajava*) tree orchard. **Indian Journal of Agricultural Sciences**, New Delhi, v. 71, p. 166-170, 2001.

NATALE, W.; PRADO, R. M.; MÔRO, F. V. Alterações anatômicas induzidas pelo cálcio na parede celular de frutos de goiabeira. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 40, p. 1239-1242, 2005.

NATALE, W.; PRADO, R. M.; ROZANE, D. E.; ROMUALDO, L. M. Efeitos da calagem na fertilidade do solo e na nutrição e produtividade da goiabeira. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 31, p. 1475-1485, 2007.

OSMAN, S. M.; ABD EL-RAHMAN, A. E. M. Effect of slow release nitrogen fertilization on growth and fruiting of guava under Mid Sinai conditions. **Australian Journal of Basic and Applied Science**, Pakistan, v. 3, p. 4366-4375, 2009.

PARENT, L. E. Diagnosis of the nutrient compositional space of fruit crops. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 33, p. 321-334, 2011.

PARENT, L. E.; DAFIR, M. A theoretical concept of compositional nutrient diagnosis. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, Mount Vernon, v.117, p.239-242, 1992.

PEREIRA, F. M. 'Rica' e 'Paluma': novas cultivares de goiabeira. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE FRUTICULTURA, 7., 1983, Florianópolis. **Proceedings...** Florianópolis: Sociedade Brasileira de Fruticultura/EMPASC, 1984. p. 524-528.

PRADO, R. M.; NATALE, W. Calagem na nutrição de cálcio e no desenvolvimento do sistema radicular da goiabeira. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, p. 1007-1012, 2004.

PRADO, R. M.; NATALE, W. Effect of liming on the mineral nutrition and yield of growing guava trees in a typic Hapludox soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Philadelphia, v. 39, p. 2191-2204, 2008.

RAIJ, B. van; QUAGGIO, J. A.; CANTARELLA, H.; FERREIRA, M. E.; LOPES, A. S.; BATAGLIA, O. C. **Análise química do solo para fins de fertilidade**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. 170 p.

SANTOS, R. R.; QUAGGIO, J. A. Goiaba. In: RAIJ, B.van.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. (Ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agrônômico, 1996. p. 143.

SAS INSTITUTE. **SAS/STAT**: user's Guide. Version 9.2. Cary: SAS Institute, 2009. 7869 p.

SMITH, G. S.; ASHER, G. J.; CLARK, C. J. **Kiwifruit nutrition**: diagnosis of nutritional disorders. Southern Horticulture, 1985. 56 p.

TOLOSANA-DELGADO, R.; van den BOOGART, K. G. Linear models with compositions in R. In: PAWLOWSKY-GLAHN, V.; BUCCIANTI, A. (Eds.). **Compositional data analysis**: theory and applications. New York: John Wiley and Sons, 2011. p. 356-371.

van den BOOGART, K. G.; TOLOSANA-DELGADO, R. "Compositions": a unified R package to analyze compositional data. **Computers & Geosciences**, [S.l.], v. 34, p. 320-338, 2008.

WALWORTH, J. L.; SUMNER, M. E. Foliar diagnosis: a review. **Advances in Plant Nutrition**, New York, v. 539, p. 193-240, 1988.

ZHANG, M.; HE, Z. Long-term changes in organic carbon and nutrients of an Ultisol under rice cropping in southeast China. **Geoderma**, Amsterdam, v. 118, p. 167-179, 2004.