

**Universidade de São Paulo  
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Sensoriamento remoto laboratorial na detecção de alterações químicas no solo  
pela aplicação de corretivos**

**Suzana Romeiro Araújo**

**Dissertação apresentada para obtenção do título de  
Mestre em Agronomia. Área de concentração: Solos e  
Nutrição de Plantas**

**Piracicaba  
2008**

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

Suzana Romeiro Araújo  
Engenheira Agrônoma

**Sensoriamento remoto laboratorial na detecção de alterações químicas no solo pela  
aplicação de corretivos**

Orientador:  
Prof. Dr. **JOSÉ ALEXANDRE MELO DEMATTÊ**

**Dissertação apresentada para obtenção do título de  
Mestre em Agronomia. Área de concentração: Solos e  
Nutrição de Plantas**

**Piracicaba  
2008**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP**

Araújo, Suzana Romeiro

Sensoriamento remoto laboratorial na detecção de alterações químicas no solo pela aplicação de corretivos / Suzana Romeiro Araújo. - - Piracicaba, 2008.  
130 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2008.  
Bibliografia.

1. Agricultura de precisão 2. Corretivos do solo 3. Química do solo 4. Radiometria  
5. Sensoriamento remoto I. Título

CDD 631.3  
A663s

**“Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor”**

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida.

Ao professor **Dr. José Alexandre Melo Demattê**, pela orientação, confiança, paciência e fundamental ajuda, sem a qual não seria possível terminar este trabalho.

À **Comissão do Programa de Pós-graduação em Solos e Nutrição de Plantas** da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, da Universidade de São Paulo, pela oportunidade concedida, Prof. Dr. Álvaro Pires da Silva, Prof. Dr. Luis Reynaldo Ferracciú Alleoni e Prof. Dr. Pablo Vidal-Torrado.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (**CNPq**) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (**CAPES**) por conceder a bolsa de estudos essencial à condução deste trabalho.

À **Embracal e Calcários Diamante** pelo apoio financeiro.

A todos os **colegas da pós-graduação**, em especial **Leonardo Ramirez, Fernando Garbuio, Marcelo Alves, Henrique Bellinaso, Rodrigo Coqui, Maísa Bellizário, Carolina Lisboa, Marco Bortoletto, Fabrício Terra, Adriana Guirado** e aos estagiários do **Laboratório de Sensoriamento Remoto**, pelos bons momentos, troca de conhecimentos e convivência durante o mestrado.

Ao professor **Dr. José Carlos Alcarde** pela contribuição e atenção dispensada.

A todos os **funcionários** do Departamento de Ciência do Solo.

Aos meus pais **Luiz Fernando e Maria Léa** e aos meus irmãos **Alexandre e Helena** pelo incentivo e ensinamentos de vida.

Ao **Fabrício** pelo apoio e companhia.

A todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram pela realização deste trabalho.

## SUMÁRIO

RESUMO .....	7
ABSTRACT .....	8
1 INTRODUÇÃO.....	9
Referências .....	11
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
2.1 Calagem.....	14
2.2 Agricultura de precisão.....	17
2.3 Sensoriamento Remoto Aplicado a Solos .....	18
2.4 Comportamento espectral dos solos .....	20
2.5 Estimativa de atributos químicos de solos através de sua resposta espectral.....	21
Referências .....	23
3 ALTERAÇÕES QUÍMICAS NO SOLO CULTIVADO COM MILHO PROVOCADAS PELA APLICAÇÃO DE CALCÁRIO COM DIFERENTES GRAUS DE REATIVIDADE .....	31
Resumo .....	31
Abstract.....	31
3.1 Introdução.....	33
3.2 Desenvolvimento.....	35
3.2.1 Material e Métodos.....	35
3.2.1.1 Caracterização do experimento .....	35
3.2.1.2 Descrição dos tratamentos.....	36
3.2.1.3 Análises químicas.....	38
3.2.1.4 Análises estatísticas .....	39
3.2.2 Resultados e Discussão.....	39
3.2.2.1 Latossolo Vermelho textura argilosa.....	39
3.2.2.1.1 Efeito dos tipos e doses de calcário nos atributos químicos do solo e matéria seca .....	39
3.2.2.1.2 Efeito residual dos calcários no experimento dois .....	50
3.2.2.2 Neossolo Quartzarênico.....	53
3.2.2.2.1 Efeito dos tipos e doses de calcários nos atributos químicos do solo e matéria seca.....	54

3.2.2.2.2 Efeito residual dos calcários no experimento dois .....	61
3.3 Conclusões.....	63
Referências .....	64
<b>4 SENSORIAMENTO REMOTO ESPECTRAL NA DETECÇÃO DE ALTERAÇÕES QUÍMICAS NO SOLO CULTIVADO COM MILHO PROVOCADAS PELA APLICAÇÃO DE DIFERENTES CALCÁRIOS .....</b>	
<b>Resumo .....</b>	<b>70</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>71</b>
4.1 Introdução.....	72
4.2 Desenvolvimento.....	75
4.2.1 Material e Métodos.....	75
4.2.1.1 Caracterização do experimento .....	75
4.2.1.2 Descrição dos tratamentos.....	76
4.2.1.3 Análises laboratoriais .....	77
4.2.1.3.1 Análises químicas.....	77
4.2.1.3.2 Obtenção de dados espectrais.....	78
4.2.1.4 Análise das informações.....	78
4.2.1.4.1 Fase de calibração.....	79
4.2.1.4.2 Fase de validação.....	82
4.2.2 Resultados e Discussão.....	83
4.2.2.1 Análises de componentes principais.....	84
4.2.2.2 Calibração dos modelos de predição .....	86
4.2.2.3 Validação dos modelos.....	95
4.3 Conclusões.....	98
Referências .....	99
<b>5 APLICAÇÃO DE CORRETIVOS POR SENSORIAMENTO REMOTO ESPECTRAL COMO BASE A AGRICULTURA DE PRECISÃO.....</b>	
<b>Resumo .....</b>	<b>106</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>106</b>
5.1 Introdução.....	108
5.2 Desenvolvimento.....	109

5.2.1 Material e Métodos .....	109
5.2.1.1 Caracterização do experimento .....	109
5.2.1.2 Descrição dos tratamentos .....	110
5.2.1.3 Análises laboratoriais .....	111
5.2.1.3.1 Análises químicas .....	111
5.2.1.3.2 Obtenção de dados espectrais .....	112
5.2.1.4 Análises das informações .....	112
5.2.2 Resultados e discussão .....	116
5.2.2.1 Calibração dos modelos .....	116
5.2.2.2 Validação dos modelos .....	117
5.2.2.3 Necessidade de calagem .....	118
5.3 Conclusões .....	122
Referências .....	123
APÊNDICES .....	127



## RESUMO

### **Sensoriamento remoto laboratorial na detecção de alterações químicas no solo pela aplicação de corretivos**

O conhecimento detalhado da distribuição espacial dos solos e principalmente seus atributos torna-se essencial com a implantação da Agricultura de Precisão. Neste sentido, há a demanda por um grande número de análises químicas de solos. Porém, o custo destas análises é elevado, sendo um dos principais entraves para a avaliação da variabilidade espacial dos solos, tanto na área de manejo químico como em levantamentos pedológicos. Logo, o sensoriamento remoto surge como uma técnica alternativa e eficaz na obtenção de informações sobre a variabilidade espacial dos solos e de seus atributos químicos, físicos e mineralógicos nos diferentes tipos de aquisição de dados, mostrando-se promissor não só pela sua rapidez, mas também por ser uma técnica não destrutiva das amostras e livre de qualquer reagente químico. Desta forma, este trabalho tem por objetivos avaliar através de métodos convencionais de análise de terra e de sensoriamento remoto, as variações químicas ocorrentes em dois tipos de solos cultivados com milho, pela aplicação de corretivos com diferentes graus de reatividade. Além disso, este trabalho visa identificar bandas espectrais relacionadas com as mudanças químicas ocorridas no solo devido à aplicação de calcário, assim como calibrar e avaliar modelos de estimativa de atributos do solo, além de quantificar os valores de corretivos necessários numa amostra de terra. Para tal, dados químicos foram obtidos em laboratório através de métodos já consagrados e permitiram avaliar três calcários com diferentes reatividades. Já os dados radiométricos foram obtidos através do sensor FieldSpec Pro em laboratório na faixa de 350 – 2500 nm, para amostras de solos coletadas durante quatro ciclos de cultivo do milho. Os dados obtidos através da espectrorradiometria permitiram identificar possíveis bandas relacionadas com alguns atributos químicos dos solos; determinar os teores de atributos químicos dos solos a partir da metodologia utilizada; obter modelos de estimativa específicos para cada atributo químico dos dois solos estudados, assim como estimar a necessidade de calagem destes através de técnicas de sensoriamento remoto, havendo a possibilidade de redução das numerosas e demoradas análises químicas tradicionais, contribuindo desta forma para viabilização da prática da agricultura de precisão.

Palavras-chave: Espectrorradiometria; Calagem; Agricultura de Precisão

## ABSTRACT

### **Laboratory remote sensing on soil chemical alteration by lime application**

The detailed knowledge of spatial distribution of soils and mainly its attributes became essential with the Precision Agriculture implementation. Therefore, there is the demand for a high number of soil chemical analyses. However, these analyses cost is high, being one of the main impediments to evaluate the soil spatial variability, as in chemical management as in pedological surveys. However, the remote sensing rises as an alternative and efficient technique to obtain information about the soil spatial variability and its chemical, physical and mineralogical attributes in different kinds of data acquisition. Showing itself promising not just by its speed, but also because it is a non-destructive technique for the samples and do not uses any chemical reagents. In this way, the objectives of this work are to evaluate through conventional methods of soil analyses and remote sensing, the chemical modifications occurred in two soils cultivated with corn, by the lime application with products of different reaction degrees. Besides, this work seeks to identify spectral bands related to the chemical changes occurred in soil due to the lime application, as to calibrate and to evaluate the soil attributes estimation models, beyond to quantify the lime rate needed in a soil sample. For that, chemical data were obtained in lab through methods already consecrated and allowed to evaluate three lime products with different degrees of reaction. The radiometric data were obtained with the FieldSpec Pro sensor in lab in the range of 350 – 2500 nm, for soil samples collected during four corn cycles. The data obtained by spectroradiometry allowed to identify possible bands related with some soil chemical attributes; to determine the content of chemical attributes from the used methodology; to obtain specific estimative models for each chemical attribute of both studied soils, as to estimate the need of lime application using remote sensing techniques, with the possibility to reduce the amount of conventional chemical analyses, beyond to contribute to development of the practice of precision agriculture.

Keywords: Spectroradiometry; Lime application; Precision Agriculture

## 1 INTRODUÇÃO

O solo é um dos principais fatores a ser considerado na sustentabilidade agro-ecológica. É a base para produção de alimentos e sua utilização aumenta gradativamente. Por se tratar de um recurso natural não renovável em curto prazo, inúmeros esforços são necessários para sua preservação. Além disso, o Brasil situa-se na zona tropical, que apresenta, de forma geral, alta precipitação, temperaturas elevadas e intensa radiação solar durante praticamente todo ano. Tais fatores condicionam o processo de intemperização, criando no solo características nem sempre favoráveis à agricultura. Para tanto, o conhecimento da fertilidade do solo é essencial para adoção de técnicas de manejo que visam o sucesso de empreendimentos agrícolas, florestais e pecuários.

A análise química de terra constitui o método mais difundido para avaliar a fertilidade dos solos agricultáveis. Mediante estudos prévios de correlação, calibração e curvas de resposta, é possível, com esta “ferramenta”, definirem-se doses adequadas de corretivos e fertilizantes a serem aplicados em cada situação de solo e cultura, objetivando-se produtividades econômicas. No Brasil citam-se, dentre outras, as metodologias adotadas por Camargo et al. (1986), Raij et al. (1987) e Embrapa (1997). Entretanto, o custo destas análises é um dos principais entraves nas áreas de manejo químico e levantamentos pedológicos e para prática da agricultura de precisão. Estima-se que no Brasil o número de análises químicas de terra tenha atingido um milhão de amostras no ano de 2001, resultando em uma grande quantidade de reagentes gastos e resíduos produzidos (RAIJ et al., 2001), além do alto custo, tempo para se obter os resultados e da destinação inadequada deste material, podendo contaminar águas e solos. Outro aspecto a se considerar é a aplicação excessiva e inadequada de corretivos e fertilizantes, que leva à alterações significativas das propriedades físicas e químicas do solo em função da sua característica mineralógica. Este é resultado do desconhecimento do efeito residual dos produtos, uma vez que suas avaliações são feitas, na maioria das vezes, em termos de capacidade de reação no solo por curtos períodos de tempo, desconsiderando-se o efeito residual.

Desta forma, são necessários métodos práticos que estimem rapidamente e de maneira eficiente as propriedades do solo para melhorar a avaliação quantitativa dos problemas de manejo da terra (SHEPHERD E WALSH, 2002). Observa-se que novas técnicas têm sido estudadas, e conseqüentemente algumas começam a despontar. Dentre elas, o sensoriamento remoto (SR) mostrou-se promissor não só pela sua rapidez, mas também por ser uma técnica não destrutiva

das amostras e livre de qualquer reagente químico (PALACIOS-ORUETA E USTIN, 1996; JANIK et al., 1998; REEVES et al., 1999; DUNN et al., 2002, BROWN et al., 2006; VISCARRA ROSSEL et al., 2006a). A utilização de dados de sensores em geral, para o estudo do solo, é um desafio que vem sendo buscado por pesquisadores, dentre outras razões, por ser uma tecnologia alternativa para avaliação dos atributos do solo e que resulta em um menor impacto ambiental

A espectroscopia de reflectância difusa tem sido utilizada em Ciência do Solo desde os anos cinquenta e sessenta (BROOKS, 1952; BOWERS E HANKS, 1965). No entanto, apenas nos últimos 20 anos, muito provavelmente coincidindo com o estabelecimento da quimiometria e técnicas de estatística multivariada em análises químicas, que sua utilidade e importância foram destacadas. A maioria destes trabalhos tem envolvido o uso das regiões do visível e infravermelho próximo do espectro eletromagnético (400-2500 nm) (DALAL E HENRY, 1986; STENBERG et al., 1995; REEVES et al., 1999; CHANG et al., 2001; DUNN et al., 2002). Surgem aplicações com o uso da espectroscopia de reflectância difusa e bidirecional, como em levantamentos de solos (DEMATTÊ et al., 2004), quantificação mineralógica (VISCARRA ROSSEL, 2006b), avaliação da qualidade do solo (VÅGEN et al., 2006), sensoriamento remoto (BEN DOR et al., 1997) e agricultura de precisão (STENBERG et al., 2002; WETTERLIND et al., 2008).

Sendo assim, tendo em vista os transtornos causados pela aplicação inadequada de adubos e corretivos e da carência de informações sobre os efeitos residuais destes produtos em longo prazo, além, do alto custo das análises químicas de terra, surge o enfoque deste estudo.

Teria o SR, utilizando-se de dados de reflectância obtidos em nível de laboratório, condições de discriminar e/ou quantificar os atributos químicos de dois solos submetidos a diferentes tratamentos, auxiliando desta forma, os procedimentos adotados nas recomendações de calagem e adubações?

As hipóteses testadas foram: (a) A partir da energia eletromagnética refletida pelo solo pode-se identificar e estimar seus atributos, uma vez que cada solo apresenta atributos diferenciadores, neste caso, de acordo com os tratamentos a que foram submetidos, quando interagem com a energia incidente; (b) É possível identificar faixas de comprimentos de onda específicas do espectro-eletromagnético, fortemente relacionadas com cada atributo químico do solo, sendo essencial para o sucesso de modelos estatísticos de calibração e validação.

Para tanto o presente trabalho foi conduzido no município de Piracicaba, em casa de vegetação situada no Campus da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, tendo como objetivos: (a) Avaliar através de métodos convencionais de análise de solo e de SR, as variações químicas ocorrentes nos solos e na cultura do milho pela aplicação de corretivos com diferentes graus de reatividade, bem como verificar a possibilidade de um sensor remoto em laboratório detectar e quantificar os valores de corretivos necessários numa amostra de terra; (b) Verificar os efeitos residuais dos mesmos ao longo do tempo, e a resposta do milho aos tratamentos realizados, avaliando um método de detecção automática da variação de elementos químicos do solo, que possa gerar resultados rápidos e eficientes, diminuído assim o número das custosas e demoradas análises químicas tradicionais.

## Referências

- BEN-DOR, E.; IMBAR, Y.; CHEN, Y. The Reflectance spectra of organic matter in the visible near infrared and short wave infrared region (400-2500nm) during a control decomposition process. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.61, p.1-15, 1997.
- BOWERS, S.A.; HANKS, R.J. Reflectance of radiant energy from soils. **Soil Science**, Baltimore, v.100, n.2, p.130-138, 1964-65.
- BROWN, D.J.; SHEPHERD, K.D.; WALSH, M.G.; MAYS, M.D.; REINSCH, T.G. Global soil characterization with VNIR diffuse reflectance spectroscopy. **Geoderma**, Amsterdam, v.132, p. 273-290, 2006.
- CAMARGO, A.O. de; A.C. MONIZ; J.A. JORGE; J.M. VALADARES. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do IAC**. Campinas: Instituto Agrônômico, 1986. 94p. (IAC. Boletim técnico, 106).
- CHANG, C.W.; LAIRD, D.A.; MAUSBACH, M.J.; HURBURGH JUNIOR, C.R. Near-infrared reflectance spectroscopy – principal components regression analyses of soil properties. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.65, p.480-490, 2001.
- DALAL, R.C.; HENRY, R. J. Simultaneous determination of moisture, organic carbon and total nitrogen by near infrared reflectance spectrophotometry. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 50, p.120-123, 1986.
- DEMATTÊ, J.A.M.; CAMPOS, R.Co.; ALVES, M.C. ; FIORIO, P.R. ; NANNI, M.R. Visible-NIR reflectance: a new approach on soil evaluation. **Geoderma**, Amsterdan, v. 121, p. 95-112, 2004.

DUNN, B. W.; BEECHER, H. G.; BATTEN, G. D.; CIAVARELLA, S. The potencial of near-infrared reflectance spectroscopy for soil analysis – a case study from the Riverine Plain of south-eastern Australia. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, Melbourne, v.42, p.607-614, 2002.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2 ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997. 212p.

JANIK, L.J.; MERRY, R.H.; SKJEMSTAD, J.O. Can mid infrared diffuse reflectance analysis replace soil extractions. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, Melbourne, v. 38, p.681-696, 1998.

PALACIOS-ORUETA, A.; USTIN, S. Multivariate statistical classification of soil spectra. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 57, p. 108-118, 1996.

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

RAIJ, B. van.; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. **Análise química para avaliação de solos tropicais**. Campinas: IAC, 2001. 285p.

REEVES, J.B., III, MCCARTY, G.W.; MEISENGER, J.J. Near infrared reflectance spectroscopy for the analysis of agricultural soils. **J. Near Infrared Spectroscopy**, New York, v. 7, p.179–193, 1999.

SHEPHERD, K. D.; WALSH, M. G. Development of reflectance spectral libraries for characterization of soil properties. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.66, May-June, p.988-998, 2002.

STENBERG, B.; NORDKVIST, E.; SALOMONSSON, L. Use of near infrared reflectance spectra of soils for objective selection of samples. **Soil Science**, Baltimore, v. 159, p.109-114, 1995.

STENBERG, B.; JONSSON, A.; BORJESSON, T. Near infrared technology for soil analysis with implications for precision agriculture. In: DVIES, A.M.C.; CHO, R.K. (Ed.). In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON NEAR INFRARED SPECTROSCOPY, 10., 2002. Chichester. **Proceedings...** Chichester: NIR Publications, 2002. p. 279–284.

VAGEN, T.G. Remote sensing of complex land use change trajectories – a case study from the highlands of Madagascar. **Agriculture Ecosystems and Environment**, New York, v. 115, p. 219–228, 2006.

VISCARRA ROSSEL, R.A.; McGLYNN, R.N.; McBRATNEY, A.B. Determining the composition of mineral-organic mixes using UV–vis-NIR diffuse reflectance spectroscopy, **Geoderma**, Amsterdam, v. 137, p.70–82, 2006.

VISCARRA ROSSEL, R.A.; WALWORT, D.J.J.; McBRATNEY, A.B.; JANIK, L.J.; SKJESMSTAD, J.O. Visible near infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. **Geoderma**, Amsterdam, v.131, p.59-75. 2006.

WETTERLIND, J.; STENBERG, B.; SODERSTROM, M. The use of near infrared (NIR) spectroscopy to improve soil mapping at the farm scale. **Precision Agriculture**, New York, v.9, p. 57–69, 2008.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Calagem

A acidez do solo é um dos fatores mais limitantes da produtividade das culturas em várias partes do mundo. Os solos brasileiros, na sua maioria, são ácidos, destacando-se aqueles sob vegetação de cerrado. Estes solos são caracterizados por baixas concentrações de cálcio e magnésio, elementos diretamente envolvidos no desenvolvimento de raízes e, por valores elevados de alumínio trocável, além da baixa disponibilidade de fósforo. Os solos sob cerrado apresentam baixa produtividade natural e capacidade de retenção de água (FAGERIA E STONE, 1999; SILVEIRA et al., 2000). São solos naturalmente ácidos devido ao material de origem, que têm baixo teor de cátions básicos. Há também os solos que podem tornar-se ácidos, nas regiões em que a precipitação pluvial é maior que a evapotranspiração, responsável pela lixiviação de bases no perfil (FAGERIA E GHEYI, 1999). O problema acentua-se pelo cultivo, pois as plantas, ao absorverem cátions, deixam quantidades equivalentes de hidrogênio ( $H^+$ ). A acidificação também pode ocorrer pela ação dos microorganismos ou pela aplicação de fertilizantes, principalmente nitrogenados, como nitrato e sulfato de amônio (MALAVOLTA, 1984; VITTI E LUZ, 1997).

Para se obterem altas produtividades das culturas, a correção da acidez do solo se faz necessária para eliminar o alumínio tóxico (SOUZA et al., 1985) e reduzir as perdas de nutrientes dos fertilizantes. A calagem é uma das práticas menos dispendiosas e efetivas na correção desta acidez, e no Brasil existem vastas reservas calcárias distribuídas em todo o território nacional. Segundo Werner (1986), além do fornecimento de cálcio e magnésio, a calagem tem, entre outras funções, a de elevar o pH do solo, aumentando a disponibilidade de fósforo e molibdênio que, em pH baixo, não são assimiláveis, e a neutralização do alumínio, manganês e ferro que, em pH baixo, podem estar em formas e quantidades tóxicas às plantas.

Os calcários variam geralmente quanto às características mineralógicas, composições químicas e granulométricas, que conjuntamente determinam a capacidade total de neutralização da acidez do solo. Dentre as características relacionadas com a qualidade dos corretivos da acidez, apenas duas têm sido consideradas: o teor de neutralizantes e a granulometria. Na avaliação desses produtos, no que tange ao aspecto granulometria, a mesma tem sido feita em



termos de capacidade de reação no solo por curtos períodos de tempo, desconsiderando-se o efeito residual. Em vista disso, a reatividade apresenta apenas uma relação parcial com a qualidade, não devendo refletir necessariamente na eficiência de um corretivo. Neste sentido, a determinação das frações não trocáveis de Ca e Mg no solo, que teoricamente representam a fração do corretivo remanescente, que ainda não foi dissolvido no solo (“calcário residual”), descrita por Raij et al. (1982), Quaggio et al. (1982) e Quaggio et al. (1995), aliada às características químicas contidas na análise de fertilidade, é uma ferramenta importante para definição do momento correto para reaplicação do corretivo, especialmente no sistema plantio direto (RAIJ et al., 1982; QUAGGIO et al., 1982; LIMA, 2004).

Em vista disso, ao traçar estratégias quanto à correção da acidez do solo, é também importante o conhecimento da residualidade do corretivo. Azevedo et al. (1996) observaram que, mesmo após 23 anos da calagem, o solo ainda mantinha o pH e os teores de Ca e Mg trocáveis mais elevados e de Al trocável mais baixo, em relação ao solo natural. Esse comportamento leva ao discernimento de que o solo amortece o impacto do distúrbio provocado pela adição do calcário de tal forma que, dificilmente, a magnitude da acidez retornará aos patamares do solo original.

Alcarde (1983) relata que a velocidade de reação dos corretivos no solo, neutralizando a acidez, depende do tamanho de suas partículas e da natureza química dos seus constituintes neutralizantes. Assim, é de suma importância a avaliação da composição química do material calcário, pois quanto maior os teores de óxidos de cálcio e magnésio, maior o poder neutralizante (PN), menor a quantidade a ser utilizada e maior a economia. Embora Alcarde e Rodella (1996) terem verificado que a granulometria da amostra tem influência significativa no resultado do PN, mostraram também que nem todo o cálcio e magnésio dos calcários devem estar associados às bases químicas. Estes elementos podem estar associados também a outras bases inexpressivas, assim como, os constituintes neutralizantes podem estar aprisionados em cristais de outros componentes como sílica, que apenas são atingidos por um ataque enérgico da amostra. Shaw e Robinson (1960), estudando a eficiência de calcários de diferentes granulometrias, concluíram que aqueles corretivos com grau de finura menor que 60 mesh dissolviam-se em um ano e aqueles que passavam em peneira de 30 mesh dissolviam-se em apenas dois anos, já os calcários mais grosseiros (8 mesh) levavam de três a quatro anos para se dissolverem.

A resposta das culturas à calagem depende de fatores ligados à planta, ao solo e ao corretivo empregado, de tal forma que esta interação direcione a máxima eficiência da prática. A correção da acidez do solo é muito importante para o adequado desenvolvimento do milho, embora existam materiais genéticos mais tolerantes às condições de acidez (CANTARELLA, 1993). No caso da soja, sua resposta à calagem é bastante conhecida na literatura quando se trata de cultivo convencional; são vários os trabalhos que mostram aumentos consideráveis da produção devido a aplicação de calcário (MASCARENHAS et al., 1969; RAIJ et al., 1977; QUAGGIO et al., 1993). Tem-se verificado graus distintos de tolerância ao alumínio para várias espécies agrícolas, até entre genótipos dentro de uma mesma espécie (SILVA, 2002). O aumento do pH do solo altera a disponibilidade de nutrientes, causando aumentos na absorção de N (GOODROAD E JELLUM, 1988), P, K, Ca e Mg (LUTZ JUNIOR. et al., 1972) pelo milho. São vários os trabalhos que demonstram aumentos consideráveis na produção de milho com a aplicação de calcário incorporado ao solo em sistema de preparo convencional (GONZALES-ERICO et al., 1979; CAMARGO et al., 1982; RAIJ et al., 1983; ERNANI et al., 1998). Mesmo os genótipos de milho com tolerância ao Al e que conseguem aprofundar seu sistema radicular em solos ácidos, também, normalmente, apresentam respostas positivas à calagem (RAIJ et al., 1998). Quanto ao ganho na produção de matéria seca e de grãos, a calagem é uma prática destacada nos trabalhos de Forestieri e De-Polli (1990) e Nwachuku e Loganathan (1991), os quais concluíram que além do aumento da produção de grãos houve aumentos significativos dos teores de Ca e Mg na matéria seca de folhas e colmos de milho.

Logo, tendo conhecimento sobre a forma como o corretivo de acidez se comporta no solo, os atributos químicos a serem manejados e a cultura que se desenvolverá no local, torna-se possível constatar a necessidade de calagem (NC) do mesmo. O cálculo da NC leva em conta entre outros, a elevação da saturação por bases e tem como vantagens a facilidade de cálculo e a flexibilidade de adaptação para diferentes culturas (QUAGGIO, 1984). A calagem deve ser feita com cautela, uma vez que, em doses elevadas, favorece a imobilização de micronutrientes como Zn, Fe, Mn e Cu (PAULINO et al., 1994; WERNER, 1986), dificulta a mobilização do K, além de modificar a estrutura natural do solo, em função da sua característica mineralógica e da dose de calcário aplicada (ROCHA et al., 1971). Portanto, os critérios para recomendação de calagem incluem a decisão de aplicar ou não o corretivo de acidez e a definição da dose a ser aplicada para atingir objetivo especificado, ou seja, elevação do pH ou da saturação por bases em um nível

predeterminado (NOLLA E ANGHINONI, 2006). O teor de Al trocável, a acidez potencial, o índice SMP, o pH e as saturações por bases e por Al são características do solo que podem ser utilizadas para estimativa da sua necessidade de calagem (RAIJ et al., 1996; CFSEMG, 1999; CQFSRS/SC, 2004; NOLLA E ANGHINONI, 2004; SOUSA E LOBATO, 2004).

## 2.2 Agricultura de precisão

A agricultura de precisão é um método de administração cuidadosa e detalhada do solo e da cultura para adequar as diferentes condições encontradas em cada pedaço da lavoura, tendo em vista a desuniformidade intrínseca dos solos (SCHUELLER, 1992; WEIDA E BORGELT, 1993). Com surgimento do *Global Position System* (GPS) na década de oitenta como uma ferramenta de trabalho sofisticada disponível e de grande utilidade para atingir os objetivos desta nova filosofia de exploração e administração da produção, juntamente com as idéias de Lisle e Bauer (1929), pesquisadores verificaram o real uso de dados georreferenciados na agricultura. Há uma evidência bem comprovada que tanto a qualidade quanto a produtividade são espacialmente variáveis no campo e sistemas estão sendo desenvolvidos para explorar esta variação e aumentar o rendimento das culturas (STAFFORD, 1999).

Houve a partir deste momento avanços tecnológicos nos equipamentos GPS e tratores automatizados na aplicação diferenciada de insumos. De acordo com Molin (2001), a investigação da variabilidade espacial pode ser feita por amostragens de solo georreferenciadas ou pelo uso do sensoriamento remoto. Os mapas de análises da fertilidade do solo sempre foram realizados por amostragem no campo e análises em laboratório. Durante este período, muitos debates surgiram quanto ao número de amostras necessárias para montagem do grid que daria base ao mapeamento da fertilidade da área. Inicialmente foi utilizado o grid de uma amostra por hectare (WOLKOWSKI E WOLLENHAUPT, 1994), chegando a quatro amostras por hectare para solos tropicais conforme verificado por Demattê e Demattê (1993). Para a aquisição desta informação há necessidade de se fazer a coleta no campo, enviar ao laboratório, realizar as análises pelos métodos químicos tradicionais e esperar os resultados, para posteriormente fazer a recomendação e inserir nos equipamentos automatizados. Logo, notou-se um entrave no sistema: o alto valor gasto com análises de solo no sistema de produção, que incrementa o custo de produção agrícola. Demattê et al. (2000) verificaram que os custos com análises de solo foram

superiores no processo de agricultura pontual comparada com a convencional. Portanto, a racionalização no estabelecimento de locais para a amostragem de terra, ou a diminuição do valor gasto com as mesmas torna-se imprescindível. Neste aspecto, Demattê (2000) estabelece a importância da utilização de novas tecnologias, como o sensoriamento remoto, que venham a auxiliar nesta empreitada. De fato, Odeh e MacBratney (2000) comprovaram que a utilização do sensoriamento remoto e técnicas estatísticas, foram as mais eficientes e menos onerosas, na avaliação de solos.

Logo, somada à necessidade de redução de custos, o advento da Agricultura de Precisão em meados da década de 80 (SEARCY et al., 1989), e sua popularização na década de 90 (SCHUELLER, 2000), fez com que a comunidade científica se deparasse com um sistema agrícola atrelado à necessidade de automatização e velocidade na obtenção de informações (HUMMEL et al., 1996). Portanto, apesar dos atributos dos solos serem rotineiramente quantificados pelos métodos tradicionais em laboratório, estes em geral, demandam tempo para serem realizados. Portanto, é necessária a adoção de métodos automáticos para aumentar a eficiência do processo de análise do solo e diminuição dos custos. De fato, Hummel et al. (1996) destacam a importância do uso de sensores na estimativa da CTC, umidade e outros nutrientes no manejo de sítios específicos.

Passou-se então a verificar que o sensoriamento remoto poderia ser um meio rápido e eficiente na obtenção de informações quantitativas sobre os solos, o que incrementaria de maneira ainda mais eficaz o uso de agricultura de precisão em sistemas de produção.

### **2.3 Sensoriamento Remoto Aplicado a Solos**

O sensoriamento remoto é definido como uma técnica de aquisição e de aplicações das informações sobre um objeto sem nenhum contato físico com ele. A informação é adquirida pela detecção e medição das mudanças que o objeto impõe ao campo ao seu redor, e este sinal pode incluir um campo eletromagnético emitido e/ou refletido, ondas acústicas refletidas e/ou perturbadas pelo objeto ou as perturbações do campo de gravidade ou potencial magnético com a presença do objeto. Geralmente a aquisição de informações é baseada na captação dos sinais eletromagnéticos que cobrem o espectro inteiro das ondas eletromagnéticas desde a onda longa

de rádio, passando pelas microondas, submilímetro, infravermelho termal, médio e próximo, visível, ultravioleta, raios X até os raios gama (LIU, 2007).

Os sensores utilizados pelo sensoriamento remoto são dispositivos capazes de detectar e registrar a radiação eletromagnética em determinada faixa do espectro eletromagnético e gerar informações que possam ser transformadas num produto passível de interpretação, quer seja na forma de imagem, gráfica ou de tabelas. Os sistemas sensores são basicamente formados por uma parte óptica (coletor), constituída por lentes e espelhos, que tem o objetivo de captar e direcionar a energia proveniente dos alvos para os detectores. Quando o sistema sensor emite radiação e, após ter interagido com o alvo, capta a parte que voltou, o sistema é denominado ativo, pois possui sua própria fonte de radiação. Neste caso, o sensor pode operar durante o dia ou à noite (MOREIRA, 2005). A iluminação natural nem sempre está disponível (à noite ou em presença de nuvens), o que pode variar a intensidade e características espectrais dos alvos quando se utiliza sensores passivos. Além disso, em decorrência das alterações do terreno, ocorrem variações na intensidade da radiação eletromagnética que são comumente manifestadas pela variação de brilho e luminância sobre as imagens (SABINS, 2000).

Informações espectrais do solo podem ser obtidas em três níveis cada um com suas vantagens e desvantagens: (i) terrestre, utilizando sensores no campo ou em laboratório, (ii) aéreos, utilizando sensores a bordo de aeronaves e (iii) orbital que utiliza sensores a bordo de satélites. Os sensores de laboratório apresentam alta resolução espectral, podendo ser muito mais detalhados que aqueles colocados em órbita. Além disso, a aquisição dos dados espectrais neste caso é realizada sob condições controladas, não sofrendo interferências atmosféricas e alterações de iluminação. Os sensores terrestres são os principais responsáveis pela obtenção de padrões espectrais “puros” dos solos, para posterior validação por sensores orbitais (HUETE E ESCADAFAL, 1991; BEN DOR, 1999). Portanto, a utilização de um sensor ou de outro, em determinado nível de coleta de informações espectrais, depende, sobretudo de fatores relacionados ao objeto da pesquisa (MOREIRA, 2003).

A espectroscopia de reflectância difusa tem sido utilizada em Ciência do Solo desde os anos cinquenta e sessenta (BROOKS, 1952; BOWERS E HANKS, 1965). No entanto, apenas nos últimos 20 anos, muito provavelmente coincidindo com o estabelecimento da quimiometria e técnicas de estatística multivariada em análises químicas, que sua utilidade e importância foi destacada (VISCARRA ROSSEL et al., 2008). A maioria destes trabalhos tem envolvido o uso

das regiões do visível e infravermelho próximo do espectro eletromagnético (400-2500 nm) (GHOSH, 1978; HUNT, 1982; DALAL E HENRY, 1986; OSBORNE, 1993; STENBERG et al., 1995; REEVES et al., 1999; CLARK, 1999; CHANG et al., 2001; DUNN et al., 2002), porém há o aumento de pesquisas utilizando a região do infravermelho médio (2500-25000 nm).

Logo, surgem diversas aplicações com o uso da espectroscopia de reflectância difusa e bidirecional, como em levantamentos de solos (DEMATTÊ et al., 2004), mapeamento digital de solos (McBRATNEY et al., 2003; BRULAND E RICHARDSON, 2004; VISCARRA ROSSEL E McBRATNEY, 2008), quantificação mineralógica e química (CHANG et al., 2001; PIRIE et al., 2005; COHEN et al., 2005; VISCARRA ROSSEL, 2006), modelagem pedogenética (PARK E VLEK, 2002; HOOSBEEK E BRYANT, 1992), avaliação da qualidade do solo (VÅGEN et al., 2006), monitoramento de grandes áreas (SCHRODER et al., 2003), sensoriamento remoto (BEN DOR et al., 2006), agricultura de precisão (van ALPHEN E STOORVOGEL, 2000; STENBERG et al., 2002; WETTERLIND et al., 2007), dentre outros.

## **2.4 Comportamento espectral dos solos**

A medida dos valores de reflectância de um corpo ou alvo ao longo do espectro eletromagnético é definida como seu comportamento espectral e diferentes alvos apresentam respostas espectrais características, podendo ser identificados na natureza (SABINS, 2000).

Segundo Stoner e Baumgardner (1981) a reflectância do solo é uma propriedade cumulativa derivada do comportamento espectral inerente da combinação heterogênea de seus componentes, tais como, umidade, tamanho de partícula, estrutura do solo, porcentagem de matéria orgânica, quantidade de minerais carbonatados, presença ou não de óxidos de ferro e quartzo. Sendo assim, o comportamento espectral é afetado por diversos fatores, destacando-se: a cor, a classe de solos, composição mineralógica, teor de umidade e granulometria (EPIPHANIO et al., 1991). No entanto, em laboratório, torna-se possível isolar estes componentes e estudar seu efeito sobre a resposta espectral do solo. Logo, para poder quantificar os atributos do solo a partir de sua resposta espectral é necessário ter um bom entendimento das relações existentes entre seus componentes e sua radiação eletromagnética (REM).

Trabalhos como o de Thomasson et al. (2001) e Dunn et al. (2002) indicam que a energia eletromagnética, quando estudada de maneira pormenorizada pelas bandas, pode detectar as

variações dos elementos trocáveis, como potássio e alumínio. As regiões ultravioleta (UV, 250-400 nm) e visível (VIS, 400-700 nm) do espectro eletromagnético, têm sido utilizadas para identificar minerais como óxidos e hidróxidos de ferro e titânio (STRENS E WOOD, 1979), especialmente para classificação de solos. Algumas bandas são associadas a minerais de argila, como por exemplo, o OH livre da água a 1400 e 1900 nm, e camadas de OH a 1400 e 2200 nm (HUNT, 1980). A intensidade de reflectância na região de 500-640 nm é inversamente proporcional ao conteúdo de ferro no solo (OBUKHOV E ORLOV, 1964). Islam et al. (2003) encontraram altos coeficientes de correlação para o ferro livre a 382,4 nm. No entanto, a região do visível tem sido também utilizada para prever matéria orgânica do solo. Krishnan et al. (1980) observaram que os comprimentos de onda 632,6 e 564,4 nm tiveram melhores previsões para matéria orgânica do solo que aqueles na região do infravermelho próximo (NIR). Enquanto que para Pirie et al. (2005), as bandas que melhor correlação tiveram com este atributo foram 610 a 615 nm. Resultados semelhantes foram encontrados por Islam et al. (2003), que obtiveram melhores coeficientes de correlação para MO em 587 e 585 nm. Análises de solo na região NIR têm sido utilizada para determinação de pH, condutividade elétrica, umidade do solo, carbono orgânico, CTC, nitrogênio total e cátions trocáveis (DALAL E HENRY, 1986; MORRA et al., 1991; BEN DOR E BANIN, 1995; CHANG et al., 2001).

Várias são as razões para se utilizar a REM como método de análise: preparação mínima das amostras, análises rápidas, determinação simultânea de vários constituintes dos solos, método não destrutivo das amostras, não há utilização de reagentes químicos tóxicos ao ser humano e ambiente e, ainda pode-se obter resultados onde o erro na estimativa dos atributos é tão igual ou menor que o erro cometido por um laboratório de análises químicas convencionais (COHEN et al., 2007).

## **2.5 Estimativa de atributos químicos de solos através de sua resposta espectral**

Com o avanço no conhecimento das relações existentes entre reflectância espectral e os atributos dos solos, pode-se prever, de maneira rápida e confiável, várias características químicas e físicas do solo, conforme constatado por Sheperd e Walsh (2002), que obtiveram uma ampla base de dados de reflectância espectral de solos, denominadas de bibliotecas espectrais.

Em estudo sobre a quantificação de atributos do solo a partir de técnicas de sensoriamento remoto, vários autores vêm buscando respostas pelas análises de correlações entre atributos do solo e reflectâncias espectrais (GALVÃO et al., 1997; DEMATTÊ E GARCIA, 1999; VISCARRA-ROSSEL et al., 2006a, VISCARRA-ROSSEL et al., 2006b). Da mesma forma, modelos de previsão de atributos dos solos têm apresentado alto potencial (MORRA et al., 1991; BEN-DOR et al., 1997). Baseado nos conceitos entre reflectância e atributos dos solos determinados com sensores em laboratório, Coleman et al. (1991) obtiveram bons resultados na estimativa de argila. Chang et al. (2001) avaliaram a eficiência da espectroscopia de reflectância do infravermelho próximo para prever múltiplas propriedades do solo. Foram estimados valores de CTC, areia e silte com  $r^2 > 0,80$ , enquanto que  $K^+$ , argila e pH foram estimados com menor acurácia ( $0,50 < r^2 < 0,80$ ). Moron e Cozzolino (2003), utilizando esta mesma região do espectro eletromagnético, avaliaram o conteúdo de areia e argila em solos do Uruguai. Obtiveram na calibração, valores de  $r^2$  de 0,81, 0,83 e 0,92 para frações de areia, silte e argila respectivamente. Lee et al. (2003), avaliaram características espectrais e químicas de propriedades de solos da Flórida e, os modelos contabilizaram para mais de 72% de variação observada no conjunto de validação para o pH, P, Ca e Mg dos solos, porém para menos de 50% de variação para K e MO.

As técnicas utilizadas são altamente sensíveis a compostos orgânicos e inorgânicos do solo, tornando-se uma ferramenta potencialmente útil na avaliação e monitoramento do solo. Bogrekcı e Lee (2007) avaliaram as regiões espectrais do ultravioleta, infravermelho próximo e do visível na predição de fósforo em amostras de terra chegando à conclusão que a melhor região a ser utilizada na estimativa de teores de fósforo é a região do infravermelho próximo.

Nanni e Demattê (2001) utilizando equações lineares de regressão múltipla estimaram valores de atributos dos solos com dados radiométricos em dois níveis de aquisição, laboratorial e orbital, sendo esses dados comparados com valores determinados por análises químicas e físicas. Os resultados não apresentaram diferenças significativas, a 1% de probabilidade entre as médias dos valores estimados e valores determinados para conteúdo de argila, soma de bases e CTC.

No Brasil, o interesse de pesquisadores pelo estudo do comportamento espectral de solos vem crescendo, sendo esta linha de pesquisa relativamente jovem e necessita de suporte de pesquisa para melhorar o entendimento dos efeitos da interação da energia eletromagnética entre os diferentes componentes dos solos.



## Referências

- ALCARDE, J.C. Características de qualidade dos corretivos da acidez do solo. IN: SIMPÓSIO SOBRE "ACIDEZ E CALAGEM", 15., REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO, Campinas, 1983; **Anais...** Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1983. p. 11-23,
- ALCARDE, J.C.; BARBIN, D. Método simplificado de solubilização de calcários agrícolas para a determinação de cálcio e magnésio. **Anais da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"**, Piracicaba, v. 35, p. 509-519, 1978.
- ALCARDE, J.C.; PAULINO, V.T.; DERNARDIN, J.S. Avaliação da reatividade de corretivos da acidez do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.13, n.3, p.387-392, 1989.
- ALCARDE, J.C.; RODELLA, A.A. O equivalente em carbonato de cálcio dos corretivos da acidez dos solos. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.53, n.2/3, p.6-12, maio/dez, 1996.
- AZEVEDO, A.C.; KÄMPF, N.; BOHNEN, H. Alterações na dinâmica evolutiva de latossolo bruno pela calagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.20, p.191-198, 1996.
- BEN-DOR, E.; INBAR, Y.; CHEN, Y. The reflectance spectra of organic matter in the visible near infrared and short wave infrared region (400-2500 nm) during a control decomposition process. **Remote sensing of environment**, New York, v. 61, p.1-15, 1997.
- BEN-DOR, E.; IRONS, J. R.; EPEMA, G. F. Soil reflectance. In: RENCZ, A. N. (Ed.). **Remote Sensing for the earth sciences: Manual of remote sensing**. 3rd ed. New York: John Wiley, **American Society for Photogrammetry and Remote Sensing**, New York, v.3, p. 11-188, 1999.
- BEN-DOR, E.; LEVIN, N.; SINGER, A.; KARNIELI, A.; BRAUN, O.; KIDRON, G. Quantitative Mapping of the Soil Rubification Process on Sand Dunes Using an Airborne CASI Hyperspectral Sensor, **Geoderma**, Amsterdam, v.131, p. 1-21, 2006.
- BOGREKCI, I. ; LEE, W.S. Comparison of ultraviolet, visible, and near infrared sensing for soil phosphorus. **Biosystems Engineering** , Cambridge, v.92, p.293–299, 2007.
- BOWERS, S.A.; HANKS, R.J. Reflectance of radiant energy from soils. **Soil Science**, Baltimore, v.100, n.2, p.130-138, 1964-65.
- BRULAND, G.L., AND C.J. RICHARDSON.. A spatially-explicit investigation of phosphorus sorption and related soil properties in two riparian wetlands. **Journal of Environmental Quality**, Stanford, v. 33, p.785–794, 2004.
- CAMARGO, O. A.; RAIJ, B. van. Movimento do gesso em amostras de Latossolos com diferentes propriedades eletroquímicas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.13, p.275-280, 1989.

- CANTARELLA, H. Calagem e adubação do milho. In: BÜLL, L.T.; CANTARELLA, H. (Ed.). **Cultura do milho**: fatores que afetam a produtividade. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1993. p.147-196.
- CHANG, C.W.; LAIRD, D.A.; MAUSBACH, M.J.; HURBURGH J.C.R.. Near-infrared reflectance spectroscopy principal components regression analysis of soil properties. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 65, p. 480-490, 2001.
- CLARK, R.N. Remote sensing for the earth sciences In: RENCZ, A.N. (Ed.) **Manual of remote sensing**. New York: John Wiley, 1999. v.3 chap1: Spectroscopy of rocks and minerals, and principles of spectroscopy: p. 3–58.
- COHEN, M.; PRENGER, J.P.; DEBRUSK, W.F. Visible-near infrared reflectance spectroscopy for rapid, non-destructive assessment of wetland soil quality. **Journal of Environmental Quality**, Stanford, v. 34, p.1422–1434, 2005.
- COHEN, M.; MYLAVARAPU, R.S.; BOGREKCI, I.; LEE, W.S.; CLARK, M.W. Reflectance Spectroscopy For Routine Agronomic Soil Analyses. **Soil Science**, Baltimore, v.172, p.469-485, 2007.
- COLEMAN, T.L.; AGBU, P.A.; MONTGOMERY, O.L.; GAO, T.; PRASAD, S. Spectral band selection for quantifying selected properties in highly weathered soils. **Soil Science**, Baltimore, v.151, n.5, p.355-361, 1991.
- COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS - CFSEMG. 5 aproximação. Viçosa, 1999. 360p.
- COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO – CQFS RS/SC. Manual de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Porto Alegre, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – Núcleo Regional Sul, ,2004. 400p
- DALAL, R. C.; HENRY, R. J. Simultaneous determination of moisture, organic carbon and total nitrogen by near infrared reflectance spectrophotometry. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 50, p.120-123, 1986.
- DEMATTÊ, J.A.M.; DEMATTÊ, J.L.I. Comparações entre as propriedades químicas dos solos de floresta (região Amazônica) e de cerrado do Brasil Central. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 50, n. 2, p. 272-286, 1993.
- DEMATTÊ, J.A.M.; GARCIA, G.J. Alteration of soil properties through a weathering sequence as evaluated by spectral reflectance. **Soil Science of America Journal**, Madison, v. 63, n. 2, p.327-342, Mar./Apr. 1999.
- DEMATTÊ, J.A.M.; CAMPOS, R.C.; ALVES, M.C. ; FIORIO, P. R. ; NANNI, M.R. Visible-NIR reflectance: a new approach on soil evaluation. **Geoderma**, Amsterdam, v. 121, p. 95-112, 2004.

- DEMATTÊ, J.A.M.; HUETE, A.R.; FERREIRA JUNIOR, L.G.; ALVEZ, M.C.; NANNI, M.R.; CERRI, C.E. Evaluation of tropical soils through ground and orbital sensors. In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF GEOSPATIAL INFORMATION IN AGRICULTURE AND FORESTRY, 2., 2000, Lake Buena Vista. **Proceedings...** Lake Buena Vista: Erim, 2000. p.34-41.
- DUNN, B. W.; BEECHER, H. G.; BATTEN, G. D.; CIAVARELLA, S. The potencial of near-infrared reflectance spectroscopy for soil analysis – a case study from the Riverine Plain of south-eastern Australia. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, Melbourne, v.42, p.607-614, 2002.
- ERNANI, P.R.; NASCIMENTO, J.A.L.; OLIVEIRA, L.C. Increase of grain and green matter of corn by liming. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.22, p.275-280, 1998.
- EPIPHANIO, J.C.N.; FORMAGGIO, A.R.; VALERIANO, M.; OLIVEIRA, J.B. **Comportamento espectral de solos do Estado de São Paulo**. São José dos Campos: INPE, 1992. 131p.
- FAGERIA, N.K.; STONE, L.F. **Manejo da acidez dos solos de cerrado e de várzea do Brasil. Santo Antônio de Goiás: EMBRAPA Arroz e Feijão**, 1999. 42 p. (Embrapa arroz e feijão. Documentos, 92).
- FAGERIA, N.K.; GHEYI, H.R. **Efficient crop production**. Campina Grande: UFPB, 1999. 548 p.
- FORESTIERI, E.F.; DE-POLLI, H. Calagem, enxofre e micronutrientes no crescimento do milho e da mucuna preta num Podzólico Vermelho-amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.14, p. 167-172, 1990.
- GALVÃO, L.S.; VITORELLO, I.; FORMAGGIO, A.R. Relationships of spectral reflectance and color among surface and subsurface horizons of tropical soil profiles. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.61, p.24-33, 1997.
- GONZALEZ-ERICO, E.; KAMPRATH, E.J.; NADERMAN, G.C.; SOARES, W.V. Effect of Depth of Lime Incorporation on the Growth of Corn on an Oxisol of Central Brazil. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v.43, p.1155-1158, 1979.
- GOODROAD, L.L.; JELLUM, M.D. Effect of N fertilizer rate and soil pH on N efficiency in corn. **Plant Soil**, Dordrecht, v.106, p.85-89, 1988.
- GHOSH, S.N. Infra-red spectra of some selected minerals, rocks and products. **Journal Science**, New York, v.13, p.1877–1886, 1978.
- HOSSBEEK, M.R.; BRYANT, R.B. Towards the Quantitative modeling of pedogenesis – A review, **Geoderma**, Amsterdam, v.55, p.183-210, 1992.

HUETE, A.R.; ESCADAFAL, R. Assessment of biophysical soil properties through spectral decomposition techniques. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.35, n. 2/3, p.149-159, Fev./Mar. 1991.

HUMMEL, J.W.; GAULTNEY, L.D.; SUDDUTH, K.A. Soil property sensing for site-specific management. **Computers and Electronics in Agriculture**, London, v.14, p.121-136, 1996.

HUNT, G.R. Spectroscopic properties of rocks and minerals. In: CARMICHAEL, R.S. (Ed.). **Handbook of physical properties analysis of rocks**. Boca Raton: CRC Press, 1982. p.295-385.

ISLAM, K.; SINGH, B.; McBRATNEY, A. Simultaneous estimation of several properties by ultra-violet, visible, and near-infrared reflectance spectroscopy. **Australian Journal of Soil Research**, Sidney, v. 41, p. 1101-1114, 2003.

LEE, W.S.; SANCHEZ, T.F.; MYLAVARAPU, R.S.; CHOE, J.S. Estimating chemical properties of florida soils using spectral reflectance. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, St. Joseph, v.46, n.5, p.1443-1453, 2003.

LIMA, E.V. **Plantas de cobertura e calagem superficial na fase de implantação do sistema de plantio direto em região de inverno seco**. 2004. 125p. Tese de (Doutorado na área de Fitotecnia) - Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho", Botucatu, 2004.

LISLEY, C.M.; BAUER, F.C. **Test your soil for acidity**. University . of Illinois: Agricultural Experiment Station, 1929. p 14-28 (Circular 346).

LIU, W.T.H. **Aplicações de sensoriamento remoto**. Campo Grande: Editora Uniderp, 2007. 908 p.

LUTZ Jr., J.A.; GENTER, C.F.; HAWKINS, G.W. Effect of soil pH on element concentration and uptake by maize: I. P, K, Ca, Mg and Na. **Agronomy Journal**, Madison, v.64, p.581-583, 1972.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. de. **Avaliação do estado nutricional das plantas, princípios e aplicações**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa do Potássio e do Fosfato, 1984. 215p.

MASCARENHAS, H.A.A.; MIYASAKA, S.; IGUE, T.; FREIRE, E.S.; SORDI, G.De. Resposta da soja à calagem e à adubação mineral com fósforo e potássio em um Latossolo Roxo. **Bragantia**, Campinas, v.28, p.17-21, 1969.

McBRATNEY, A.B.; SANTOS, M.L.M.; MINASNY B. On digital soil mapping. **Geoderma**, Amsterdam, v.117, p. 3-52, 2003.

MOLIN, J.P. **Agricultura de precisão: o gerenciamento da variabilidade**. Piracicaba: O autor, 2001. 83 p.

MOREIRA, A.M. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. 2.ed. Viçosa: UFV, 2003. 307p.

MOREIRA, M.A.; RUDORFF, B.F.T; FELÍCIO, J.F.; FREITAS, J.G.; TARGA, M.S. Variação espectral e eficiência de uso da radiação fotossinteticamente ativa em ensaio com genótipos de trigo. **Bragantia**, Campinas, v.64, p.331-338, 2005.

MORON, A.; COZZOLINO, D. The potential of near-infrared reflectance spectroscopy to analyze soil chemical and physical characteristics. **Journal of Agricultural Engineering**, St. Joseph, v.140, p. 65-71, 2003.

MORRA, M.J.; HALL, M.H.; FREEBORN, L.L. Carbon and nitrogen analysis of soil fractions using near-infrared reflectance spectroscopy. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.55, p. 288-291, 1991.

NANNI, M.R.; DEMATTÊ, J.A.M. Quantification and discrimination of soils developed from basalt as evaluated by terrestrial, airborne and orbital sensors. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 10., 2001. Foz do Iguaçu. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2001. 1 CDROM

NOLLA, A.; ANGHINONI, I. Métodos utilizados para correção da acidez do solo no Brasil. **Revista Brasileira de Ciências Exatas Naturais**, Guarapuava, v. 6, p.97-111, 2004.

NOLLA, A.; ANGHINONI, I. Critérios de calagem para a soja no sistema plantio direto consolidado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.30, p. 475-483 , 2006.

NWACHUKU, D. A.; LOGANATHAN, P. The effect of liming on maize yield and soil properties in Southern Nigeria. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Philadelphia, v.22, p. 623-639, 1991.

ODEH, I.O.A.; McBRATNEY, A.B. Using AVHRR images for spatial prediction of clay content in the lower Namoi Valley of eastern Australia. **Geoderma**, Amsterdam, p. 237-254, 2000.

OSBORNE, B.G. Near-infrared reflectance spectroscopy in the analysis of cereal products. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, New York, v.34, p.1027-1028, 1983.

PAULINO, V.T.; MALAVOLTA, E.; COSTA, N.L. Resposta de *Nenotonia wightii* à calagem e aplicação de micronutrientes. **Pasturas Tropicais**, Cali, v.16, p.23-33, 1994.

PARK, S.; VLEK, P. Environmental correlation of three-dimensional soil spatial variability: a comparison of three adaptive techniques. **Geoderma**, Amsterdam, v.109, p.117-140, 2002.

PIRIE, A.; SINGH, B.; ISLAM, K. ultra-violet, visible, nearinfrared and midinfrared diffuse reflectance spectroscopic techniques to predict several soil properties. **Australia Journal of Soil Research**, Melbourne, v.43, p. 713-721, 2005.

QUAGGIO, J.A. Resposta das culturas à calagem. In: SEMINÁRIO SOBRE CORRETIVOS AGRÍCOLAS. 1984. Piracicaba. **Anais...** Piracicaba:Cargill, 1984. p. 123-154.

QUAGGIO, J.A.; MASCARENHAS, H.A.A.; BATAGLIA, O.C. Resposta da soja à aplicação de doses crescentes de calcário em Latossolo Roxo distrófico de cerrado. II – Efeito Residual. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.6, p.113-118, 1982.

RAIJ, B. van; QUAGGIO, J.A. Métodos de análise de solo para fins de fertilidade. Campinas: IAC, 1983. p.1-31. ( Boletim técnico, 81).

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, M.C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agrônômico, 1997. 285p. (Boletim, 100)

RAIJ, B. van; FURLANI, P.R.; QUAGGIO, J.A.; PETTINELLI Jr., A. Gesso na produção de cultivares de milho com tolerância diferencial a alumínio em três níveis de calagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.22, p.101-108, 1998.

REEVES, J.B.; McCARTY, G.W.; MEISINGER, J.J. Near infrared reflectance spectroscopy for the analysis of agricultural soils. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, New York, v. 9, n.1, p.25-34, 1999.

ROCHA, G.L.; WERNER J.C.; MATTOS, H.B.; PEREIRA, J.V.S. As leguminosas e as pastagens tropicais. In: SEMINÁRIO SOBRE METODOLOGIA E PLANEJAMENTO DE PESQUISA COM LEGUMINOSAS TROPICAIS, IPECS, 1971. Rio Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro, 1971. p. 1-27.

SABINS, F.F. **Remote sensing: principles and interpretations**. 3<sup>rd</sup>. ed. New York: W. H. Freeman , 2000. 494p.

SEARCY, S.W.; SCHULLER, Y.H.; BAE, S.C.; BORGELT, S.C.; STOUT, B.A. Mapping of spatially-variable yield during grain combining. **Transactions of the ASAE**, St.Joseph, v.32, n.3, p.826-829, 1989.

SHAW, W.M. E ROBINSON, B. Reaction efficiencies of liming as indicated by lisimeter leachate composition. **Soil Science**, New Jersey, v.89, p.209-218, 1960.

SCHUELLER, J.K. A review and a integrating analysis of spatially-variable crop control of crop production. **Fertilizer Research**, The Hagere, v. 33, p. 1-34, 1992.

SCHUELLER, J.K. O Estado-da-arte da agricultura de precisão nos Estados Unidos da América.BALASTREIRE, L.A.( Ed.). **O Estado-da-Arte da Agricultura de Precisão no Brasil**, Piracicaba, 2000. p. 8-16.

SCHRODER, W.; SCHMIDT, G.; PESCH, R. Spatial representativity and methodical comparability of data and sites of soil monitoring. **Journal Plant Nutritions**, New York, v. 166, p.649–659, 2003.

SILVEIRA, P. M.; ZIMMERMANN, F. J. P.; SILVA, S. C.da; CUNHA, A. A. da. Amostragem e variabilidade espacial de características químicas de um latossolo submetido a diferentes sistema de preparo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n.10, p. 2057-2064, out. 2000.

SOUSA, D.M.G.; LOBATO, E. Correção da acidez do solo. In: \_\_\_\_\_. **Cerrado: correção do solo e adubação**. Brasília: **EMBRAPA**, 2004. p. 81-96.

SOUZA, D.M.G.; CARVALHO L.J.C.B.; MIRANDA, L.N.. Correção da acidez do solo. In: GOEDERT, W. J. (Ed.) **Solos de cerrados: tecnologias e estratégias de manejo**. São Paulo: Nobel, 1985. p. 99-127.

STAFFORD, J.V. An investigation into the within-field spatial variability of grain quality. In: EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 2., 1999, Odense. **Proceedings** ... Sheffield: Sheffield Academic Press, 1999. p. 353-361.

STENBER, G. B.; NORDKVIST, E.; SALOMONSSON, L. Use of near infrared reflectance spectra of soils for objective selection of samples. **Soil Science** , New Jersey, v.159, p.109-114, 1995.

STENBERG, B., JONSSON, A.; BORJESSON, T. Near infrared technology for soil analysis with implications for precision agriculture. In:DVIES, A.M.C. ; CHO, R.K. (Ed.). In:INTERNATIONAL CONFERENCE ON NEAR INFRARED SPECTROSCOPY, 10., 2002. Chichester. **Proceedings...** Chichester: NIR Publications, 2002. p. 279–284.

STONER, E.R.; BAUMGARDNER, M.F. Data acquisition through remote sensing. In: BEATTY, M.T. (Ed.). **Planning the uses and management of land**. Madison: American Society of Agronomy, 1986. p. 159-185.

THOMASSON, J. A.; SUI, R.; COX, M. S.; AI-RAJEHY. Soil reflectance sensing for determining soil properties in precision agriculture. **ASAE**, St. Joseph, n. 44, p.1445-1453, 2001.

VAGEN, T.G Remote sensing of complex land use change trajectories – a case study from the highlands of Madagascar. **Agriculture Ecosystems and Environment**, New York, v. 115, n.1/4

VAN ALPHEN, B.J.; STOORVOGEL, J.J. A functional approach to soil characterization in support of precision agriculture. **Soil Science Society of the American Journal**, Madison, v.64, p.1706–1713, 2000.

VISCARRA ROSSEL, R.A.; WALWORT, D.J.J.; McBRATNEY, A.B.; JANIK, L.J.; SKJESMSTAD, J.O.. Visible near infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. **Geoderma**, Amsterdam, v.131,n.1/2, p.59-75, 2006a.

VISCARRA ROSSEL, R.A.; McGLYNN, R.N.; McBRATNEY, A.B. Determining the composition of mineral-organic mixes using UV–vis-NIR diffuse reflectance spectroscopy, **Geoderma**, Amsterdam, v. 137, p. 70–82, 2006.

VISCARRA-ROSSEL, R.A.; JEON, Y.S.; ODEH, I.O.A.; McBRATNEY, A.B. Using a legacy soil sample to develop a mid-IR spectral library. **Australian Journal of Soil Research**, Sidney, v. 46, p. 1-16, 2008

VITTI, G.C.; LUZ, P.H.C. Calagem e uso do gesso agrícola em pastagens. In: SIMPÓSIO SOBRE ECOSSITEMA DE PASTAGENS, 3., 1997. **Proceedings...** Piracicaba: Editora, 1995. p. 63-111.

WERNER, J.C.; Calagem para plantas forrageiras. In: SIMPÓSIO SOBRE MANEJO DE PASTAGENS, 8., 1986, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: FEALQ, 1986. p. 191-198.

WETTERLIND, J.; STENBERG, B.; SODERSTROM, M. The use of near infrared (NIR) spectroscopy to improve soil mapping at the farm scale. **Precision Agriculture**, New York, n.9, p.57–69, 2007.

WIEDA, R.; BORGELT., S.T.; Geoestatistical analysis of plant nutrients from sample nested grids. St. Joseph., 1993. p. 14. ASAE Paper MCR93-131

WOLKOWSKI, R.P.; WOLLENHAUPT, N.C. Grid soil Sampling. **Better Crops**, Falls, v. 78, n.4, p. 6-9, 1994.



### **3 ALTERAÇÕES QUÍMICAS NO SOLO CULTIVADO COM MILHO PROVOCADAS PELA APLICAÇÃO DE CALCÁRIO COM DIFERENTES GRAUS DE REATIVIDADE**

#### **Resumo**

Com a correção da acidez, nutrientes importantes para o desenvolvimento do milho tornam-se mais disponíveis à planta, promovendo o aumento de produtividade. Objetivou-se com este estudo, avaliar as variações químicas ocorrentes em dois solos e na cultura do milho pela aplicação de corretivos com diferentes graus de reatividade. Foi realizado um primeiro experimento em casa de vegetação, aplicando-se doses de três calcários comerciais, sendo um com reatividade média denominado **A** (RE = 85,72%; PRNT = 88,29 %), outro com reatividade baixa denominado **B** (RE = 83,72 %; PRNT = 76,21) e outro **C** (RE = 99,10 %; PRNT = 105,26 %) altamente reativo, em quatro cultivos sucessivos de milho. Os solos utilizados foram Neossolo Quartzarênico e Latossolo Vermelho textura argilosa. Os tratamentos, dispostos inteiramente ao acaso, com 4 repetições, constaram de 3 doses de calcário, calculadas para elevar a saturação por bases para 40, 60 e 80 %, além da testemunha. Paralelamente, outro experimento foi realizado por incubação para verificar o efeito residual dos corretivos ao longo do tempo. A calagem implicou em aumentos dos valores de pH,  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  e redução de  $\text{Al}^{3+}$ . O melhor desenvolvimento do milho foi observado no Latossolo Vermelho textura argilosa. Neste solo, os calcários A e B foram mais eficientes na elevação do pH durante os quatro cultivos, enquanto que o produto C teve menor eficiência na redução do  $\text{Al}^{3+}$  nos últimos ciclos, devido a sua maior reatividade. Os calcários A e C apresentaram comportamentos semelhantes quando se avaliaram simultaneamente todos os atributos químicos do solo e matéria seca, através da análise de componentes principais. Houve queda na produção de matéria seca aérea com os cultivos sucessivos de milho. No experimento de incubação, os teores de cálcio trocável foram maiores que os residuais. Ressalte-se a necessidade futura de estudos para validação do método de estimativa do calcário residual.

Palavras-chave: Calagem; Efeito residual; Milho

### **3 CHEMICAL CHANGES IN SOIL CULTIVATED WITH CORN BY THE LIME APPLICATION WITH DIFFERENT DEGREES OF REACTION**

#### **Abstract**

With the acidity correction, important nutrients for the corn development became more available to the plant, increasing yield. The objective of this work was to evaluate chemical changes occurred in two soils and in the corn crop by the lime application with different degrees of reaction. It was realized an experiment in greenhouse, applying rates of three commercial limes, one with mean reactivity named **A** (RE = 85,72%; PRNT = 88,29 %), another with low reactivity named **B** (RE = 83,72 %; PRNT = 76,21) and **C** (RE = 99,10 %; PRNT = 105,26 %)

with high reactivity, in four successive cycles of corn. The used soils were a Ferrasol and an Arenosols. The treatments, placed completely random, with four replications, were three rates of lime, calculated to rise the bases saturation to 40, 60 and 80 %, besides the control treatment. In parallel, another experiment was realized by incubation to verify the lime's residual effect during time. The lime application increased the values of pH,  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{Mg}^{2+}$  and reduced  $\text{Al}^{3+}$ . The best development of corn was observed in the Oxisol. In this soil, the limes A e B were more efficient in the pH elevation during the four cycles, while the product C had the lower efficiency in the  $\text{Al}^{3+}$  reduction in the last cycles, due its higher reactivity. The limes A and C had similar behaviors when evaluating simultaneously all the soil chemical attributes and dry matter, through the analyses of principal components. There was reduction in the aerial dry matter with the successive corn cycles. In the incubation experiment, the content of exchangeable calcium was higher than the residual. There is still the absence of studies to validate the estimation of residual calcium.

Keywords: Lime application; Residual effect; Corn

### 3.1 Introdução

A acidez do solo é um dos fatores mais limitantes da produtividade das culturas em várias partes do mundo. Os solos brasileiros, na sua maioria, são ácidos, destacando-se aqueles sob vegetação de cerrado. Estes solos são caracterizados por baixas concentrações de cálcio e magnésio, elementos diretamente envolvidos no desenvolvimento de raízes e, por valores elevados de alumínio trocável, além da baixa disponibilidade de fósforo. A acidez natural destes solos é proporcionada por diversos fatores, tais como, material de origem com baixo teor de cátions básicos, precipitação pluvial maior que a evapotranspiração, lixiviação de bases no perfil (FAGERIA E GHEYI, 1999), absorção de nutrientes catiônicos, na qual a planta libera quantidades equivalentes de hidrogênio ( $H^+$ ) e acidificação proporcionada pela aplicação de fertilizantes, principalmente nitrogenados, como nitrato e sulfato de amônio (MALAVOLTA, 1984; VITTI E LUZ, 1997).

Para se obterem altas produtividades das culturas, a correção da acidez do solo se faz necessária para eliminar o alumínio tóxico (SOUZA et al., 1985) e reduzir as perdas de nutrientes dos fertilizantes. A calagem é uma das práticas menos dispendiosas e efetivas na correção da acidez, além do fornecimento de cálcio e magnésio (WERNER, 1986). Com a elevação do pH a disponibilidade de fósforo e molibdênio pode aumentar e, a neutralização do alumínio, manganês e ferro que, em pH baixo, podem estar em formas e quantidades tóxicas às plantas. Como o calcário é um produto de baixa solubilidade, sua ação neutralizante depende da superfície de contato e tempo de reação com o solo.

Os calcários variam geralmente quanto às características mineralógicas, composições químicas e granulométricas, que conjuntamente determinam a capacidade total de neutralização da acidez do solo. Dentre as características relacionadas com a qualidade dos corretivos da acidez, apenas duas têm sido consideradas: o teor de neutralizantes e a granulometria. Na avaliação desses produtos, no que tange ao aspecto granulometria, a mesma tem sido feita em termos de capacidade de reação no solo por curtos períodos de tempo, desconsiderando-se o efeito residual. Em vista disso, a reatividade apresenta apenas uma relação parcial com a qualidade, não devendo refletir necessariamente na eficiência de um corretivo. Neste sentido, a determinação das frações não trocáveis de Ca e Mg no solo, que teoricamente representam a fração do corretivo remanescente, que ainda não foi dissolvido no solo (“calcário residual”),

descrita por Raij et al. (1982), Quaggio et al. (1982) e Quaggio et al. (1995), aliada às características químicas contidas na análise de fertilidade, é uma ferramenta importante para definição do momento correto para reaplicação do corretivo, especialmente no sistema de semeadura direta (RAIJ et al., 1982; QUAGGIO et al., 1982; LIMA, 2004, SORATTO et al., 2008).

Segundo Alcarde (1992), quanto maior a reatividade, menor o efeito residual, isto é, quanto mais rápida a ação do corretivo, menor é a duração da calagem. Portanto, reatividade e efeito residual são duas características antagônicas. Alcarde (1983) relata ainda que a velocidade de reação dos corretivos no solo, neutralizando a acidez, depende do tamanho de suas partículas e da natureza química dos seus constituintes neutralizantes. Assim, é de suma importância a avaliação da composição química do material calcário, pois quanto maior os teores de óxidos de cálcio e magnésio, maior o poder neutralizante (PN), menor a quantidade a ser utilizada e maior a economia. Embora Alcarde & Rodella (1996) terem verificado que a granulometria da amostra tem influência significativa no resultado do PN, mostraram também que nem todo o cálcio e magnésio dos calcários devem estar associados às bases químicas. Estes elementos podem estar associados também a outras bases inexpressivas, assim como, os constituintes neutralizantes podem estar aprisionados em cristais de outros componentes como sílica, que apenas são atingidos por um ataque enérgico da amostra.

A correção da acidez do solo é muito importante para o adequado desenvolvimento do milho, embora existam materiais genéticos mais tolerantes às condições de acidez (CANTARELLA, 1993). O aumento do pH do solo altera a disponibilidade de nutrientes, causando aumentos na absorção de N (GOODROAD E JELLUM, 1988), P, K, Ca e Mg (LUTZ Jr. et al., 1972; CAIRES et al., 2002) pelo milho. São vários os trabalhos que demonstram aumentos consideráveis na produção de milho com a aplicação de calcário incorporado ao solo em sistema de preparo convencional (GONZALES-ERICO et al., 1979; CAMARGO et al., 1982; RAIJ et al., 1983; ERNANI et al., 1998). Mesmo os genótipos de milho com tolerância ao Al e que conseguem aprofundar seu sistema radicular em solos ácidos, também, normalmente, apresentam respostas positivas à calagem (RAIJ et al., 1998). Quanto ao ganho na produção de matéria seca e de grãos, a calagem é uma prática destacada nos trabalhos de Forestieri e De-Polli (1990) e Nwachuku e Loganathan (1991), os quais concluíram que além do aumento da produção

de grãos houve aumentos significativos dos teores de Ca e Mg na matéria seca de folhas e colmos de milho.

O cálculo da necessidade de calagem leva em conta entre outros, a elevação da saturação por bases e tem como vantagens a facilidade de cálculo e a flexibilidade de adaptação para diferentes culturas (QUAGGIO, 1984). A calagem deve ser feita com cautela, uma vez que, em doses elevadas, favorece a imobilização de micronutrientes como Zn, Fe, Mn e Cu (PAULINO et al., 1994; WERNER, 1986), dificulta a mobilização do K, além de modificar a estrutura natural do solo, em função da sua característica mineralógica e da dose de calcário aplicada (ROCHA et al., 1971). Portanto, os critérios para recomendação de calagem incluem a decisão de aplicar ou não o corretivo de acidez e a definição da dose a ser aplicada para atingir objetivo especificado, ou seja, elevação do pH ou da saturação por bases em um nível predeterminado (NOLLA E ANGHINONI, 2006). O teor de Al trocável, a acidez potencial, o índice SMP, o pH e as saturações por bases e por Al são características do solo que podem ser utilizadas para estimativa da necessidade de sua calagem (RAIJ et al., 1996; CFSEMG, 1999; CQFSRS/SC, 2004; NOLLA E ANGHINONI, 2004; SOUSA E LOBATO, 2004; CAIRES et al., 2005).

Visando avaliar as variações químicas ocorrentes no solo sem e com a cultura do milho pela aplicação de corretivos, assim como sua correlação com matéria seca, foi realizado um experimento em casa de vegetação aplicando-se doses de calcários com diferentes graus de reatividade em quatro cultivos sucessivos. Espera-se que os calcários menos reativos promovam maior efeito de correção no solo em longo prazo, propiciando melhor desenvolvimento da matéria seca e que, as diferentes doses e tipos de calcários se comportem de maneira diferente nos solos.

## **3.2 Desenvolvimento**

### **3.2.1 Material e Métodos**

#### **3.2.1.1 Caracterização do experimento**

O experimento foi conduzido no município de Piracicaba, São Paulo, em casa de vegetação (Apêndice A). O híbrido de milho utilizado foi o cultivar DOW 2B710, safra 2006/2006, obtido em Jardinópolis/SP (germinação: 85% e pureza mínima: 98%). Foram realizados quatro ciclos de cultivo, sendo o primeiro em maio de 2007, colocando-se oito sementes por vaso de 4 dm<sup>3</sup> e, após o estabelecimento das plântulas efetuou-se o desbaste, mantendo-se duas plantas por vaso durante 57 dias após a emergência. Paralelamente, foi realizado um experimento de incubação sem a cultura, no qual foi avaliado o efeito residual dos corretivos.

Os solos utilizados no ensaio foram o Latossolo Vermelho textura argilosa com 22 % de areia, 9 % de silte e 69 % de argila, coletado no Centro de Citricultura no município de Cordeirópolis, SP (22° 26' 59" S, 47° 24' 18" W), e o Neossolo Quartzarênico coletado no município de Luis Antônio, SP (21° 35' 09" S, 47° 04' 22" W), com 94 % de areia, 2% de silte e 4 % de argila (Embrapa, 2006). Estes solos foram coletados na camada arável (0-20 cm) e apresentavam, antes da instalação do experimento, as seguintes características químicas: pH (em 0,01 M CaCl<sub>2</sub>) = 3,9; MO = 31 g dm<sup>-3</sup>; P = 3 mg dm<sup>-3</sup>; Ca = 7 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; Mg = 3 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; K = 0,6 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; H+AL = 88 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; Al = 13 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; CTC = 98,6 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; V = 10,8 % no Latossolo Vermelho textura argilosa e, pH (em 0,01 M CaCl<sub>2</sub>) = 4,1; MO = 12 g dm<sup>-3</sup>; P = 11 mg dm<sup>-3</sup>; Ca = 1 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; Mg = 1 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; K = 0,07 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; H+AL = 28 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; Al = 5 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; CTC = 30,07 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; V = 6,9 % no Neossolo Quartzarênico.

### 3.2.1.2 Descrição dos tratamentos

Antes da semeadura do milho, as amostras de solos foram secas ao ar, destorroadas, passadas em peneira de malha de 4 mm e acondicionadas em vasos de 4 dm<sup>3</sup> de capacidade. Em seguida foi realizada a calagem com posterior incorporação do calcário apenas no primeiro ciclo da cultura. A adubação NPK foi aplicada nos quatro cultivos utilizando as mesmas doses em todos os tratamentos. Para a calagem foram utilizados três produtos comerciais, todos calcários dolomíticos, identificados como **A**, **B** e **C**, sendo produtos de média, baixa e alta reatividade, respectivamente (Tabela 3.1). As doses de calcário aplicadas foram calculadas para elevar a saturação por bases (V%) a 40%, 60% e 80%. Desta forma, aplicaram-se 1,68 g kg<sup>-1</sup>; 2,75 g kg<sup>-1</sup>; 3,87 g kg<sup>-1</sup> do calcário **A** no solo argiloso e 0,57 g kg<sup>-1</sup>, 0,9 g kg<sup>-1</sup> e 1,25 g kg<sup>-1</sup> no solo arenoso;

1,90 g kg<sup>-1</sup>, 3,19 g kg<sup>-1</sup>, 4,48 g kg<sup>-1</sup> do **B** em solo argiloso e 0,65 g kg<sup>-1</sup>, 1,05 g kg<sup>-1</sup> e 1,45 g kg<sup>-1</sup> em solo arenoso; 1,37 g kg<sup>-1</sup>, 2,31 g kg<sup>-1</sup>, 3,25 g kg<sup>-1</sup> de **C** em solo argiloso e 0,48 g kg<sup>-1</sup>, 0,76 g kg<sup>-1</sup> e 1,05 g kg<sup>-1</sup> em solo arenoso, além da testemunha, sem calcário.

Tabela 3.1 – Caracterização química dos calcários utilizados no experimento

Calcários	CaO	MgO	CaCO <sub>3</sub>	MgCO <sub>3</sub>	Sílica e Insolúveis	Tyler (Mesh) / Abertura (mm)			PRNT	PN	RE
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	10/2,0	20/0,8	50/0,3	(%)	(%)	(%)
<b>A</b>	30,77	20,92	55,09	51,88	3,99	99,72	91,43	73,0	88,29	104,44	85,72
<b>B</b>	28,89	17,18	51,71	42,62	14,83	99,82	91,44	67,94	76,21	91,03	83,72
<b>C</b>	32,54	18,90	58,26	46,86	2,14	100,00	99,98	97,77	105,26	106,21	99,10

Após trinta dias da calagem foram adicionados adubos minerais, sendo as doses calculadas conforme a necessidade da cultura. Para a adubação fosfatada, seguiu-se a recomendação de Malavolta (1980), com a aplicação de 200 mg kg<sup>-1</sup> de N e 200 mg kg<sup>-1</sup> de P. Na semeadura, aplicaram-se 0,84 g kg<sup>-1</sup> de superfosfato simples, 0,79 g kg<sup>-1</sup> de superfosfato triplo e 0,22 g kg<sup>-1</sup> de uréia (45 % N). Estes valores são equivalentes a 1,68 t ha<sup>-1</sup> de superfosfato simples, 1,58 t ha<sup>-1</sup> de superfosfato triplo e 0,44 t ha<sup>-1</sup> de uréia. O restante da dose de nitrogênio foi aplicado em cobertura, aos 25 e 40 dias após a emergência das plântulas (DAE), na forma de sulfato de amônio e uréia. O K foi aplicado na forma de KCl (0,38 g kg<sup>-1</sup> de KCl). Para a adubação com micronutrientes foram aplicados em solução, 10 mg kg<sup>-1</sup> de MnSO<sub>4</sub>H<sub>2</sub>O, ZnSO<sub>4</sub>(7H<sub>2</sub>O) e Fe(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>(6H<sub>2</sub>O); 5 mg kg<sup>-1</sup> de H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> e CuSO<sub>4</sub>(5H<sub>2</sub>O); e 1 mg kg<sup>-1</sup> de (NH<sub>4</sub>)<sub>6</sub>Mo<sub>7</sub>O<sub>24</sub>(4H<sub>2</sub>O).

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, com quatro repetições. Os tratamentos tiveram dois solos, três doses além da testemunha e três fontes de calcário, totalizando 80 vasos. Sendo assim, os tratamentos foram esquematizados da seguinte forma para os dois tipos de solo: **T1**: Testemunha; **T2**: Calcário **A**, V% = 40; **T3**: Calcário **A**, V% = 60; **T4**: Calcário **A**, V% = 80; **T5**: Calcário **C**, V% = 40; **T6**: Calcário **C**, V% = 60; **T7**: Calcário **C**, V% = 80; **T8**: Calcário **B**, V% = 40; **T9**: Calcário **B**, V% = 60; **T10**: Calcário **B**, V% = 80. Aos 57 dias após emergência, as plantas foram colhidas em pleno florescimento, ou seja, no pico de acúmulo de matéria seca e máximo crescimento vegetativo. Após serem colhidas, foram secas em estufa até atingirem massa constante e foi efetuada a pesagem para determinação da produção de matéria seca de folhas e colmos.

No experimento de incubação foram utilizados 400 g de solo e as doses de calcário também foram calculadas baseadas na elevação da saturação por bases para 40, 60 e 80 %. O estudo decorreu durante 180 dias e a cada dois dias os solos foram umedecidos com água. Foram realizadas análises químicas para determinação dos teores de Ca e Mg trocáveis e residuais a cada 60 dias.

### 3.2.1.3 Análises químicas

Nas amostras de solo foram determinados o pH (em  $\text{CaCl}_2$  0,01 Mol  $\text{L}^{-1}$ ), C-orgânico (método colorimétrico), fósforo,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{K}^+$  [resina trocadora de íons (RAIJ et al., 1986)], alumínio ( $\text{KCl}$  1 mol  $\text{L}^{-1}$ ) e H + Al [RAIJ et al. (1987)].

A determinação do calcário residual no solo foi realizada de acordo com Quaggio et al. (1995). Avaliaram-se os teores de Ca e Mg trocáveis, extraídos por percolação com solução de  $\text{KCl}$  1 mol  $\text{L}^{-1}$ , e os teores de Ca e Mg não-trocáveis do solo, ou seja, a fração dos corretivos que ainda não havia reagido. Assim, em tubo percolador foram colocados 10  $\text{cm}^3$  de solo, entre papéis-filtro, sendo posteriormente percolados 100 mL da solução de  $\text{KCl}$  pela amostra (primeira extração). Em uma alíquota de 1 mL do extrato obtido após a percolação, acrescentaram-se 20 mL de La 0,1% e realizaram-se as leituras por espectrofotometria de absorção atômica dos teores de Ca e Mg. Os resultados depois de descontados os valores da testemunha, que não recebeu calcário, indicam os teores de Ca e Mg trocáveis no solo, ou seja, a fração dos corretivos aplicados que já haviam reagido no solo.

Após a primeira extração, o solo foi transferido para um erlenmeyer e adicionaram-se 30 mL de  $\text{H}_2\text{O}$  + 50 mL de  $\text{HCl}$  0,8 mol. $\text{L}^{-1}$ . O conjunto foi fervido em chapa aquecedora por 5 minutos a 200°C. Dessa forma, mediante a fervura do solo, juntamente com a ação do  $\text{HCl}$ , o corretivo remanescente foi forçado a reagir. Na seqüência, após resfriamento, o material foi filtrado (segunda extração); em 1 mL do extrato foram acrescentados 20 mL de La 0,5 %. A leitura foi realizada por espectrofotometria, determinando-se os teores de Ca e Mg, referentes a valores estimados de Ca e Mg não-trocáveis. Os resultados, depois de descontados os valores da testemunha, indicam a fração dos corretivos que ainda não havia reagido no solo (RAIJ et al., 1982; QUAGGIO et al., 1995). A determinação de Ca e Mg nos extratos foi realizada na absorção atômica, diluindo as amostras com Lantânio.



#### **3.2.1.4 Análises estatísticas**

A análise estatística foi feita com o programa Statistical Analysis System (SAS) (SAS, 2001). Os resultados do primeiro experimento foram submetidos à análise de variância pelo teste F para função linear e polinomial, teste das hipóteses nível de significância de 5 e 1 % e cálculo do coeficiente de determinação ( $R^2$ ). Os tipos de calcário foram comparados por meio do teste de Tukey ( $P < 0,05$ ). Entre os elementos do solo como cálcio, magnésio, pH e saturação por bases, juntamente com a produção de matéria seca, foram geradas matrizes de correlação com o coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ) e teste t de Student em níveis de significância de 5% e 1%. Por meio do programa estatístico SPSS foram realizadas análises de componentes principais com o objetivo de avaliar a influência do tipo de calcário sobre o conjunto de atributos químicos do solo e produção de matéria seca simultaneamente.

### **3.2.2 Resultados e Discussão**

#### **3.2.2.1 Latossolo Vermelho textura argilosa**

##### **3.2.2.1.1 Efeito dos tipos e doses de calcário nos atributos químicos do solo e matéria seca**

Os efeitos da calagem nos atributos químicos do solo e matéria seca (MS), durante os quatro ciclos de cultivo são apresentados para os diferentes calcários utilizados no experimento com Latossolo Vermelho textura argilosa (Tabelas 3.2, 3.3 e 3.4). As doses de calcário aumentaram o pH em todos os tratamentos, ajustando-se significativamente a modelos lineares. O aumento do pH do solo com a calagem, resultou na redução dos teores de  $Al^{3+}$ , devido à precipitação do  $Al^{3+}$  na forma de  $Al(OH)_3$  (KINRAID, 1991). O efeito do aumento do pH na redução dos teores de  $Al^{3+}$  foi confirmado pelas relações negativas entre ambos em todas as doses e tipos de calcários utilizados. Abreu Jr. et al. (2003), investigaram os componentes da acidez e suas relações com os atributos químicos de 26 solos de diferentes regiões brasileiras e mostraram

que os teores de  $Al^{3+}$  diminuía com o aumento do pH ( $CaCl_2$  0,01 mol.  $L^{-1}$ ) até 5,5, concordando com os resultados obtidos no presente trabalho. Em pH menor que 5,5 os compostos de  $Al^{3+}$  passam a ser reativos, dificultando a absorção e transporte de diferentes elementos, como o P, K, Ca e Mg (MALAVOLTA, 1984). Os teores máximos de  $Al^{3+}$  foram observados no último ciclo de cultivo. Isso pode ser explicado por meio do processo extrativo de absorção das plantas de milho, uma vez que a aplicação de calcário foi realizada apenas antes da primeira semeadura.

Independentemente dos tratamentos, o pH, os teores trocáveis de cálcio e magnésio, e saturação por bases diminuía com a sucessão dos cultivos. Resultados semelhantes foram observados por Moreira et al. (2005) em um experimento de calagem para produção de alfafa, no qual houve uma redução média de 21, 33 e 58 % nos valores de pH, cálcio e magnésio trocáveis respectivamente, do plantio até o sexto corte da forrageira. Como Ca e Mg não foram repostos pela adubação de cobertura, a absorção destes nutrientes pelas plantas com os cultivos sucessivos proporcionou a reacidificação do solo, mesmo onde foi aplicado calcário. Com a remoção do Ca e Mg da solução do solo pelas raízes das plantas e conseqüentemente, devido ao equilíbrio químico entre fase sólida e líquida, a remoção do complexo de troca liberou sítios de ligação para  $H^+$  e  $Al^+$ . Isto pode ser observado no teor de  $Al^{3+}$ . Em média, os teores de  $Al^{3+}$  aumentaram, em comparação do primeiro com o quarto ciclo, em 12,2, 5,5, 2,1 e 1,3  $mmol_c dm^{-3}$  para testemunha e as doses 1,5, 2,5 e 3,5  $g kg^{-1}$  (doses 1, 2 e 3) de calcário, respectivamente.

Tabela 3.2 – Resultados das análises químicas do Latossolo Vermelho textura argilosa após o primeiro, segundo, terceiro e quarto ciclo com o uso do calcário A. Média de quatro repetições

Tratamentos Doses	Atributos											
	pH	Al	H + Al	Ca	Mg	K	CTC	P	MO	V%	MS	
	mmol.dm <sup>-3</sup>							mg.dm <sup>-3</sup>	g.dm <sup>-3</sup>	g		
<b>Calcário A</b>	<b>0</b>	4.1 b	7.2 a	89.0 a	9.0 c	2.8 b	1.7 a	102.5 a	168.0 a	31.5 a	11.1 c	140.0 c
<b>Ciclo 1</b>	<b>1</b>	4.4 b	3.5 b	67.3 b	43.3 bc	6.0 b	1.2 a	117.7 a	131.7 ab	40.2 a	42.9 b	269.0 a
	<b>2</b>	4.9 a	1.6 c	48.0 c	54.0 ab	16.5 a	1.5 a	120.0 a	81.5 c	37.6 a	60.2 a	188.4 b
	<b>3</b>	5.2 a	1.0 c	40.8 c	59.0 a	20.8 a	1.3 a	121.9 a	97.5 bc	37.0 a	66.2 a	143.0 c
	<b>R<sup>2</sup></b>	0,85**L	0,94**P	0,86**L	0,76**L	0,79**L	0,67**L	0,17ns	0,15ns	0,27ns	0,89**L	0,74**P
<b>Calcário A</b>	<b>0</b>	4.0 d	11.3 a	90.5 a	17.8 c	0.5 d	0.3 b	98.4 a	157.0 a	28.2 c	16.9 d	87.4 b
<b>Ciclo 2</b>	<b>1</b>	4.4 c	4.2 b	68.8 b	24.3 bc	6.5 c	0.6 ab	100.1 a	131.5 b	37.7 a	31.4 c	91.2 b
	<b>2</b>	4.6 b	3.0 bc	57.3 c	30.5 b	10.5 b	0.9 ab	99.1 a	93.0 c	34.4 b	42.2 b	113.4 a
	<b>3</b>	4.9 a	1.5 c	45.8 d	45.8 a	18.0 a	1.7 a	111.2 a	97.5 c	34.4 b	58.9 a	101.1 ab
	<b>R<sup>2</sup></b>	0,98**L	0,93**P	0,92**L	0,89**P	0,94*P	0,76**L	0,45**L	0,44**L	0,78**L	0,96*P	0,44**L
<b>Calcário A</b>	<b>0</b>	3.9 d	13.5 a	95.5 a	8.2 c	0.8 b	1.2 a	105.7 a	86.3 a	36.74 ab	9.6 c	20.0 b
<b>Ciclo 3</b>	<b>1</b>	4.2 c	5.7 b	66.5 b	17.4 b	3.1 b	0.8 b	87.8 b	94.9 a	45.57 a	24.4 b	34.7 a
	<b>2</b>	4.6 b	3.1 c	52.3 c	28.6 a	8.6 a	0.7 b	90.1 b	89.5 a	33.71 ab	41.8 a	33.9 a
	<b>3</b>	4.9 a	2.2 c	44.5 c	31.6 a	11.1 a	0.6 b	87.9 b	99.3 a	31.85 b	49.5 a	35.2 a
	<b>R<sup>2</sup></b>	0,98**P	0,93**P	0,95*P	0,92**P	0,84**L	0,11ns	0,65*P	0,93**L	0,33ns	0,81**L	0,61**L
<b>Calcário A</b>	<b>0</b>	3.6 d	19.4 a	146.3 a	6.5 c	1.0 a	0.6 a	154.3 a	89.3 a	40.69 a	5.2 d	12.8 b
<b>Ciclo 4</b>	<b>1</b>	4.0 c	7.1 b	97.0 b	19.3 b	2.3 a	0.5 a	119.0 b	87.9 a	37.20 a	18.6 c	21.3 ab
	<b>2</b>	4.3 b	3.5 c	80.0 c	25.8 b	8.5 a	0.5 a	114.8 b	82.3 a	37.20 a	30.2 b	23.6 a
	<b>3</b>	4.6 a	2.2 c	68.5 c	32.5 a	7.5 a	0.6 a	109.1 b	89.5 a	36.27 a	37.4 a	27.1 a
	<b>R<sup>2</sup></b>	0,97**L	0,92**P	0,96**P	0,95**L	0,39**L	0,00ns	0,88**P	0,00ns	0,05ns	0,96**L	0,60**L

Médias seguidas por letras iguais nas colunas não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância; 1, 2 e 3 referem-se às doses para elevação da saturação por bases para 40, 60 e 80 %, respectivamente; 0 refere-se à testemunha que não recebeu calcário; (ns) Valor não significativo estatisticamente pelo teste F com nível de significância de 5%; (\*) Valor estatisticamente significativo pelo teste F com nível de significância de 5%; (\*\*) Valor estatisticamente significativo pelo teste F com nível de significância de 1%; (P) e (L) Referem-se respectivamente, ao ajuste polinomial de segundo grau e linear.

Tabela 3.3 – Resultados das análises químicas do Latossolo Vermelho textura argilosa após o primeiro, segundo, terceiro e quarto ciclo com o uso do calcário B. Média de quatro repetições

Tratamentos Doses	Atributos											
	pH	Al	H + Al	Ca	Mg	K	CTC	P	MO	V%	MS	
	mmol.c.dm <sup>-3</sup>							mg.dm <sup>-3</sup>	g.dm <sup>-3</sup>		g	
<b>Calcário B</b>	<b>0</b>	4.1 b	7.2 a	89.0 a	9.0 c	2.8 b	1.7 a	102.5 a	168.0 a	31.5 a	11.1 c	140.0 c
<b>Ciclo 1</b>	<b>1</b>	4.9 b	2.2 b	53.8 b	47.0 b	9.4 b	2.1 a	112.3 a	88.0 b	37.0 a	52.1 b	195.7 a
	<b>2</b>	5.3 a	1.7 bc	42.0 b	54.8 b	17.7 a	1.4 a	115.8 a	90.5 b	36.5 a	63.8 a	125.7 b
	<b>3</b>	5.4 a	0.6 c	39.3 b	70.3 a	18.1 a	1.9 a	129.5 a	92.6 b	36.5 a	69.8 a	143.6 b
	<b>R<sup>2</sup></b>	0,93*P	0,95**P	0,90**P	0,87**L	0,85**L	0,82*P	0,00ns	0,43**P	0,18ns	0,93**L	0,82**P
<b>Calcário B</b>	<b>0</b>	4.0 d	11.3 a	90.5 a	17.8 c	0.5 d	0.3 c	98.4 a	157.0 a	28.2 b	16.9 d	87.4 a
<b>Ciclo 2</b>	<b>1</b>	4.5 c	4.1 b	64.8 b	24.8 b	7.0 c	1.9 b	109.1 a	81.3 b	34.4 a	34.3 c	65.4 b
	<b>2</b>	4.9 b	3.0 bc	52.3 c	34.8 a	12.0 b	3.2 a	102.2 a	94.8 b	34.4 a	48.9 b	66.3 b
	<b>3</b>	5.1 a	1.3 c	44.0 d	36.5 a	15.5 a	3.0 a	99.0 a	97.6 b	34.4 a	55.6 a	79.8 ab
	<b>R<sup>2</sup></b>	0,98**L	0,95**P	0,94*P	0,84**L	0,96**L	0,87**P	0,88*P	0,26ns	0,91**P	0,96**L	0,86**P
<b>Calcário B</b>	<b>0</b>	3.9 d	13.5 a	95.5 a	8.2 c	0.8 b	1.2 a	105.7 a	86.3 a	36.7 a	9.6 d	20.0 b
<b>Ciclo 3</b>	<b>1</b>	4.1 c	6.8 b	64.8 b	19.8 b	1.8 b	0.8 b	87.1 b	94.0 a	32.3 a	25.7 c	29.3 ab
	<b>2</b>	4.6 b	2.3 c	51.0 c	30.3 a	3.9 b	0.7 b	85.8 b	81.2 a	30.2 a	40.6 b	31.3 ab
	<b>3</b>	5.0 a	1.3 c	37.8 d	37.8 a	8.0 a	0.6 b	85.0 b	87.8 a	28.8 a	55.1 a	34.8 a
	<b>R<sup>2</sup></b>	0,95**P	0,86**L	0,95**L	0,23ns	0,23ns	0,01ns	0,94**L	0,28ns	0,44**L	0,97**P	0,74*P
<b>Calcário B</b>	<b>0</b>	3.6 d	19.4 a	146.3 a	6.5 a	1.0 b	0.6 a	154.3 a	89.3 a	40.7 a	5.2 c	12.8 b
<b>Ciclo 4</b>	<b>1</b>	4.0 c	7.7 b	101.0 b	11.0 a	3.0 b	0.6 a	115.6 b	85.6 a	44.6 a	12.6 b	22.7 a
	<b>2</b>	4.5 b	2.7 c	76.0 c	7.3 a	3.8 b	0.6 a	87.7 c	100.2 a	35.1 a	13.3 b	24.9 a
	<b>3</b>	4.8 a	2.1 c	58.0 d	5.9 a	8.5 a	0.5 a	73.0 c	85.6 a	34.4 a	20.5 a	24.1 a
	<b>R<sup>2</sup></b>	0,95**L	0,93**P	0,95**L	0,89**L	0,59**L	0,00ns	0,89*P	0,00ns	0,12ns	0,95**L	0,77**P

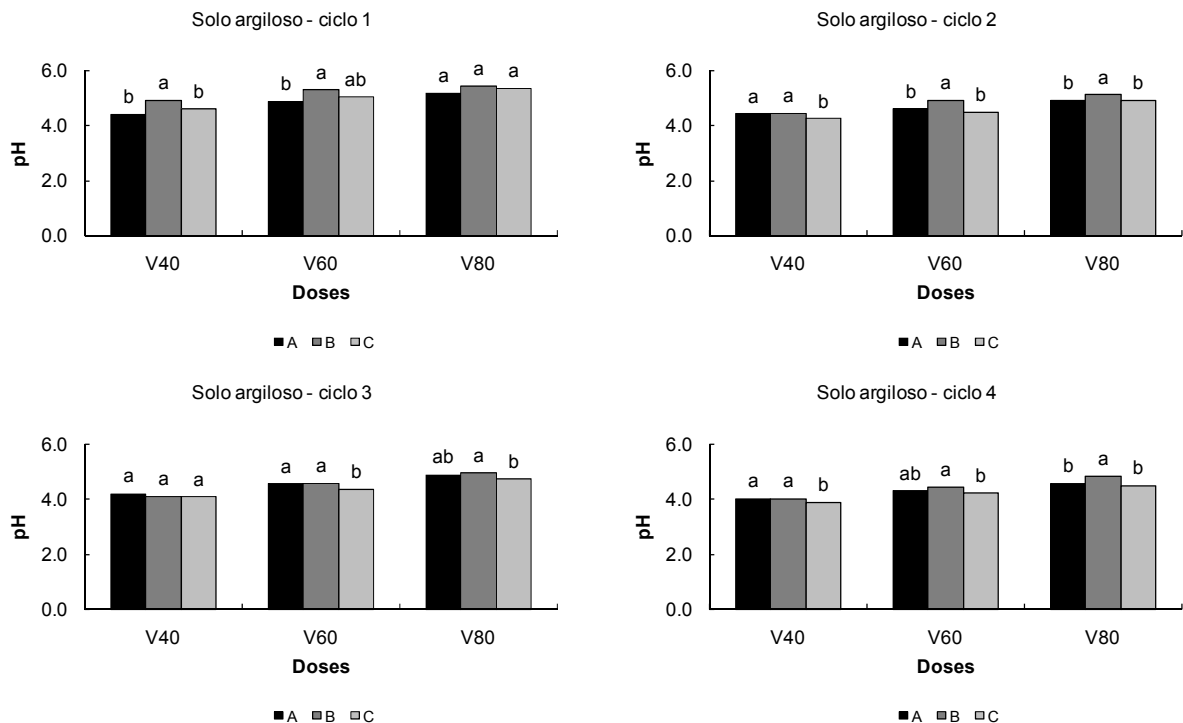
Médias seguidas por letras iguais nas colunas não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância; 1, 2 e 3 referem-se às doses para elevação da saturação por bases para 40, 60 e 80 %, respectivamente; 0 refere-se à testemunha que não recebeu calcário; (ns) Valor não significativo estatisticamente pelo teste F com nível de significância de 5%; (\*) Valor estatisticamente significativo pelo teste F com nível de significância de 5%; (\*\*) Valor estatisticamente significativo pelo teste F com nível de significância de 1%; (P) e (L) Referem-se respectivamente, ao ajuste polinomial de segundo grau e linear.

Tabela 3.4 – Resultados das análises químicas do Latossolo Vermelho textura argilosa após o primeiro, segundo, terceiro e quarto ciclo com o uso do calcário C. Média de quatro repetições

Tratamentos Doses	Atributos											
	pH	Al	H+ Al	Ca	Mg	K	CTC	P	MO	V%	MS	
	mmol.c.dm <sup>-3</sup>				mg.dm <sup>-3</sup>			g.dm <sup>-3</sup>		g		
<b>Calcário C</b>	<b>0</b>	4.1 b	7.2 a	89.0 a	9.0 c	2.8 b	1.7 a	102.5 a	168.0 a	31.5 a	11.1 c	140.0 c
<b>Ciclo 1</b>	<b>1</b>	4.6 b	2.4 b	59.5 b	41.5 bc	7.4 bc	1.3 a	109.7 ab	109.3 ab	33.3 a	45.6 c	157.9 a
	<b>2</b>	5.1 a	1.5 c	45.0 bc	49.8 ab	11.5 b	1.6 a	107.8 b	57.7 b	36.3 a	58.3 b	192.9 a
	<b>3</b>	5.3 a	0.9 c	36.3 c	55.0 a	17.8 a	1.6 a	110.7 ab	80.5 b	36.3 a	67.3 a	183.9 a
	<b>R<sup>2</sup></b>	0,90**L	0,98**P	0,88**L	0,76**L	0,84**L	0,58**L	0,17ns	0,33*L	0,14ns	0,93**L	0,93**L
<b>Calcário C</b>	<b>0</b>	4.0 d	11.3 a	90.5 a	17.8 c	0.5 c	0.3 b	98.4 a	157.0 a	28.2 a	16.9 c	87.4 a
<b>Ciclo 2</b>	<b>1</b>	4.3 c	5.1 b	70.0 b	23.8 bc	4.5 b	2.2 a	100.5 a	116.7 b	30.6 a	30.3 b	96.2 a
	<b>2</b>	4.5 b	2.6 c	67.0 b	27.5 ab	6.5 b	2.3 a	103.3 a	116.7 c	26.0 a	35.7 b	72.9 a
	<b>3</b>	4.9 a	1.5 c	47.5 c	34.5 a	11.8 a	2.3 a	96.0 a	74.2 c	33.9 a	50.6 a	97.7 a
	<b>R<sup>2</sup></b>	0,96**P	0,96**P	0,75**L	0,74**L	0,84*L	0,87**L	0,77**P	0,21ns	0,17ns	0,86**L	0,42*P
<b>Calcário C</b>	<b>0</b>	3.9 d	13.5 a	95.5 a	8.2 b	0.8 c	1.2 a	105.7 a	86.3 a	36.7 a	9.6 d	20.0 b
<b>Ciclo 3</b>	<b>1</b>	4.1 c	7.2 b	68.0 b	14.6 b	2.2 bc	0.9 ab	85.7 b	85.2 a	31.4 a	20.6 c	35.4 a
	<b>2</b>	4.4 b	3.4 c	56.8 c	22.9 a	4.7 b	0.8 b	85.1 b	92.1 a	30.7 a	33.3 b	34.1 a
	<b>3</b>	4.7 a	1.7 c	41.0 d	30.1 a	9.2 a	0.7 b	81.0 b	101.7 a	31.4 a	49.1 a	38.9 a
	<b>R<sup>2</sup></b>	0,96**P	0,93**P	0,97**L	0,85**L	0,85*P	0,26ns	0,85**P	0,93**P	0,28ns	0,76**L	0,63**L
<b>Calcário C</b>	<b>0</b>	3.6 d	19.4 a	146.3 a	6.5 d	1.0 b	0.6 a	154.3 a	89.3 ab	40.7 a	5.2 d	12.8 b
<b>Ciclo 4</b>	<b>1</b>	3.9 c	9.9 b	103.5 b	14.8 c	1.5 b	0.5 a	120.2 b	72.3 b	45.6 a	14.0 c	18.8 ab
	<b>2</b>	4.2 b	4.8 c	88.5 c	23.8 b	2.5 ab	0.5 a	115.2 bc	83.0 ab	47.2 a	23.3 b	25.1 a
	<b>3</b>	4.5 a	2.1 c	68.0 d	31.3 a	4.8 a	0.7 a	104.7 c	79.5 a	42.5 a	35.1 a	23.7 a
	<b>R<sup>2</sup></b>	0,97**L	0,90**L	0,95**L	0,95**L	0,58**L	0,07ns	0,91*P	0,50**P	0,01ns	0,97**P	0,66**L

Médias seguidas por letras iguais nas colunas não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância; 1, 2 e 3 referem-se às doses para elevação da saturação por bases para 40, 60 e 80 %, respectivamente; 0 refere-se à testemunha que não recebeu calcário; (ns) Valor não significativo estatisticamente pelo teste F com nível de significância de 5%; (\*) Valor estatisticamente significativo pelo teste F com nível de significância de 5%; (\*\*) Valor estatisticamente significativo pelo teste F com nível de significância de 1%; (P) e (L) Referem-se respectivamente, ao ajuste polinomial de segundo grau e linear.

Entre os produtos testados, os calcários A (PRNT = 88,29 %; PN = 104,44 %; RE = 85,72 %) e B (PRNT = 76,21 %; PN = 91,03 %; RE = 83,72 %) foram mais eficientes na elevação do pH durante os quatro cultivos (Figura 3.1), enquanto que o produto C (PRNT = 105,26 %; PN = 106,21 %; RE = 99,10 %) teve menor eficiência na redução do alumínio trocável nos dois últimos ciclos, provavelmente por ser um produto mais reativo que os demais (Figura 3.2) e conseqüentemente, possuir menor efeito residual. A presença de maiores concentrações de Al<sup>3+</sup> nos dois últimos ciclos pode ter influenciado o desenvolvimento das plantas (Figura 3.3), que foi menor neste período (ciclos três e quatro), sem, no entanto, haver diferenças significativas entre os produtos testados na produção de MS. Ainda assim os corretivos mostraram-se apresentar reação no solo até o último ciclo. Oliveira e Pavan (1996) relataram redução de acidez, revelado pela elevação do pH e diminuição de Al<sup>3+</sup>, até 40 cm de profundidade, após 32 meses da aplicação de calcário na superfície em sistema de cultivo sem preparo do solo.



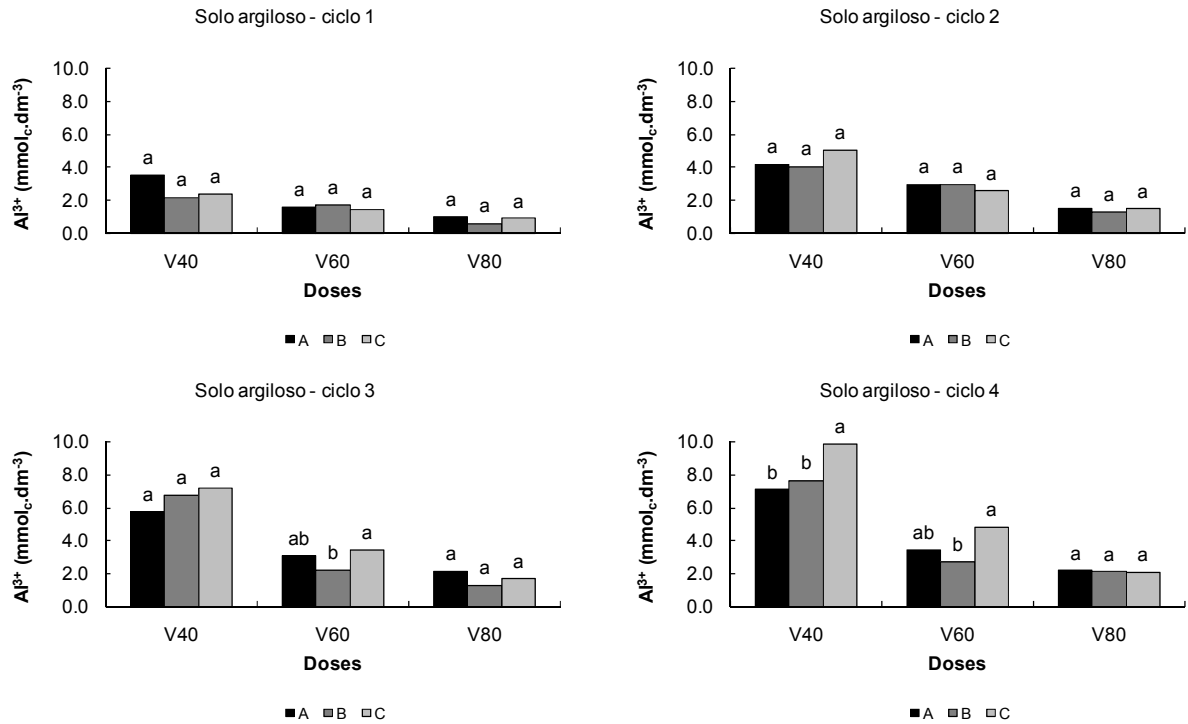
Médias seguidas de letras iguais numa mesma dose, não diferem entre si pelo teste Tukey ( $P < 0,05$ ); V40, V60, V80 referem-se às doses de calcário para elevação da saturação por bases para 40, 60 e 80%.

Figura 3.1 - Efeito dos diferentes calcários numa mesma dose sobre os valores de pH do Latossolo Vermelho textura argilosa

A calagem alterou significativamente a produção de MS da parte aérea das plantas de milho (Figura 3.3), discordando de Carvalho et al. (1993) que pesquisaram os efeitos da calagem sobre o crescimento do capim gordura e concluíram que não houve resposta da planta forrageira à aplicação do corretivo, porém não descartaram sua utilização, por evitar a presença de sintomas de deficiência de cálcio nas folhas e baixa concentração deste elemento na parte aérea da planta.

Para o primeiro ciclo, o aumento da MS proporcionado pela calagem foi de forma quadrática e para os cultivos seguintes a resposta foi linear. Provavelmente no primeiro ciclo, a aplicação de altas doses de calcário proporcionou desequilíbrio entre os nutrientes. A maior disponibilidade de Ca e Mg podem ter dificultado a absorção de K pelas plantas de milho. Caires et al. (2002) observaram que o aumento da relação Ca+Mg/K no solo, reduziu o teor de K nas folhas de milho. Devido à absorção de Ca e Mg pelas plantas, e conseqüente redução da relação Ca+Mg/K, a calagem aumentou a produção de MS de forma linear. O comportamento dos calcários A e C foi semelhante no terceiro ciclo para a produção de MS com a primeira dose de

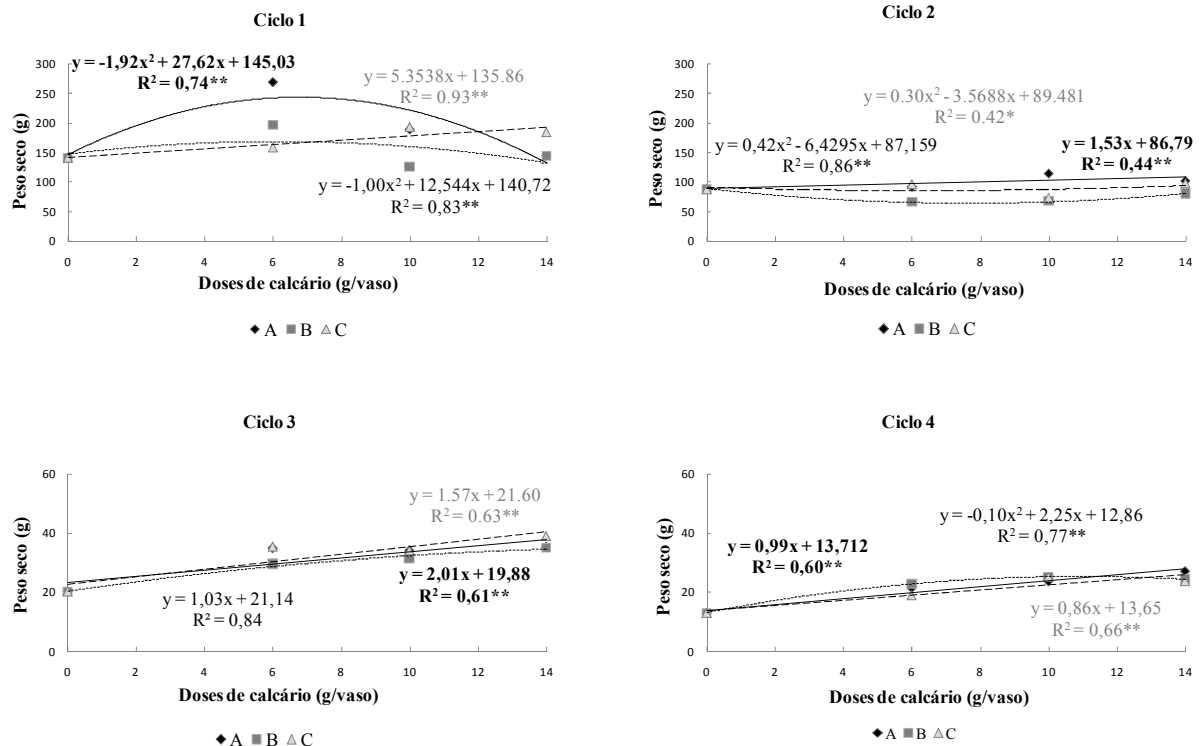
calagem. Já no último cultivo, essa semelhança foi observada para os três calcários e houve correlação significativa da MS com os teores de Ca, Mg, V e pH do solo (Tabela 3.5).



Médias seguidas de letras iguais numa mesma dose, não diferem entre si pelo teste Tukey ( $P < 0,05$ ); V40, V60, V80 referem-se às doses de calcário para elevação da saturação por bases para 40, 60 e 80 %.

Figura 3.2 - Efeito dos diferentes calcários numa mesma dose sobre os teores de  $Al^{3+}$  do Latossolo Vermelho textura argilosa

O efeito da calagem na disponibilidade de fósforo no solo e na sua absorção pelas plantas tem sido estudado, mostrando resultados bastante variáveis e até mesmo conflitantes (HAYNES, 1984). No entanto, neste estudo não houve diferenças significativas na maioria dos tratamentos. Embora a calagem possa otimizar o aproveitamento do fósforo pelas plantas, contribuindo para reduzir as quantidades de fertilizantes a serem aplicadas (COUTO et al., 1985), maiores teores de fósforo foram encontrados no solo com as menores doses de calcário aplicadas (0 e 1) nos dois primeiros ciclos de cultivo (Tabelas 3.2, 3.3 e 3.4).



(\*) Valor estatisticamente significativo pelo teste F com nível de significância de 5%.

(\*\*) Valor estatisticamente significativo pelo teste F com nível de significância de 1%.

Figura 3.3 – Representação gráfica do comportamento dos calcários nos quatro ciclos da cultura do milho no Latossolo Vermelho textura argilosa

De maneira geral, houve redução dos teores de K, P e V % do solo ao longo dos cultivos, com a utilização de todos os calcários estudados. Os maiores teores de saturação por bases foram encontrados no primeiro ciclo, na maior dose de calagem, com o uso de B (V = 69,76 %), seguido de C (V = 67,27 %) e A (V = 66,22 %). É pertinente comentar o poder tampão deste solo, uma vez que a calagem fora calculada para elevar a saturação por bases para 80 %. Ocorreu redução do V % a cada ciclo e, após o quarto cultivo, a saturação por bases foi maior com uso do calcário A, que por sua vez, possui efeito residual maior, devido a sua baixa reatividade e alto poder de neutralização. Provavelmente a presença de parte dos 16,15 % (PN – PRNT) deste calcário, de ação mais lenta no solo, reagiu neste período. Ou seja, após os três primeiros meses no solo, ainda havia 16,15 % de resíduo para continuar reagindo no solo, ao contrário do que ocorreu com o produto B e C com 14,82 % e 0,95 % de resíduo, respectivamente. Segundo Alcarde (1992), a reatividade é o percentual da ação do corretivo em um período de três meses devido à sua granulometria e o PRNT é a quantidade do seu PN que agirá neste período.



Tabela 3.5 – Correlações entre os atributos pH, Ca, Mg, V% e MS do Latossolo Vermelho textura argilosa para os calcários A, B e C no primeiro, segundo, terceiro e quarto ciclos

Ciclo 1																	
Calcário A					Calcário B					Calcário C							
pH	Ca	Mg	V%	MS	pH	Ca	Mg	V%	MS	pH	Ca	Mg	V%	MS			
pH	1				pH	1				pH	1						
Ca	0,85**	1			Ca	0,83**	1			Ca	0,84**	1					
Mg	0,93**	0,88**	1		Mg	0,92**	0,84**	1		Mg	0,91**	0,87**	1				
V%	0,97**	0,93**	0,96**	1	V%	0,98**	0,91**	0,93**	1	V%	0,98**	0,93**	0,93**	1			
MS	0,00	0,05	-0,11	0,05	1	MS	-0,03	-0,40	-0,18	-0,12	1	MS	0,92**	0,84**	0,84**	0,93**	1
Ciclo 2																	
Calcário A					Calcário B					Calcário C							
pH	Ca	Mg	V%	MS	pH	Ca	Mg	V%	MS	pH	Ca	Mg	V%	MS			
pH	1				pH	1				pH	1						
Ca	0,91**	1			Ca	0,93**	1			Ca	0,87**	1					
Mg	0,95**	0,92**	1		Mg	0,99**	0,91**	1		Mg	0,95**	0,85**	1				
V%	0,97**	0,97**	0,96**	1	V%	0,99**	0,96**	0,98**	1	V%	0,95**	0,93**	0,96**	1			
MS	0,62**	0,46	0,60**	0,55*	1	MS	-0,26	-0,27	-0,20	-0,30	1	MS	0,52*	0,35	0,49*	0,45	1
Ciclo 3																	
Calcário A					Calcário B					Calcário C							
pH	Ca	Mg	V%	MS	pH	Ca	Mg	V%	MS	pH	Ca	Mg	V%	MS			
pH	1				pH	1				pH	1						
Ca	0,96**	1			Ca	-0,33	1			Ca	0,94**	1					
Mg	0,94**	0,97**	1		Mg	-0,16	0,88**	1		Mg	0,94**	0,96**	1				
V%	0,97**	0,99**	0,96**	1	V%	0,46	0,65**	0,67**	1	V%	0,98**	0,99**	0,97**	1			
MS	0,86**	0,79**	0,75**	0,80**	1	MS	0,86**	-0,20	0,00	0,50*	1	MS	0,78**	0,77**	0,73**	0,81**	1
Ciclo 4																	
Calcário A					Calcário B					Calcário C							
pH	Ca	Mg	V%	MS	pH	Ca	Mg	V%	MS	pH	Ca	Mg	V%	MS			
pH	1				pH	1				pH	1						
Ca	0,97**	1			Ca	0,96**	1			Ca	0,99**	1					
Mg	0,61**	0,53*	1		Mg	0,71**	0,69**	1		Mg	0,94**	0,74**	1				
V%	0,98**	0,97**	0,70**	1	V%	0,99**	0,98**	0,78**	1	V%	0,99**	0,99**	0,80**	1			
MS	0,74**	0,69**	0,65**	0,74**	1	MS	0,74**	0,78**	0,40	0,73**	1	MS	0,81**	0,80**	0,59**	0,77**	1

(\*) Valor estatisticamente significativo pelo teste t de Student com nível de significância de 5%.

(\*\*) Valor estatisticamente significativo pelo teste t de Student com nível de significância de 1%.

Apesar da interação existente entre o Al e a MO, não foi verificada correlação significativa ( $P < 0,05$ ) entre estes atributos em praticamente nenhuma das doses estudadas, já que a calagem neste estudo não alterou significativamente os teores de MO do solo (Tabela 3.2, 3.3 e 3.4). No entanto, nos primeiro e segundo ciclos, quando foram utilizados os calcários A e B, observou-se que os menores valores de MO correspondiam aos maiores teores de  $Al^{3+}$  (testemunha). Tais resultados concordam com Mendonça (1995), para o qual a matéria orgânica possui capacidade de complexar o  $Al^{3+}$  na solução do solo. Além disso, a ação da MO em reduzir o  $Al^{3+}$  por complexação já foi demonstrado por Ernani e Gianello (1983), em um experimento com aplicação de esterco bovino e cama de frango, como alternativa de adubação de culturas em solo Litólico distrófico.

A aplicação de doses de calcário exerceu influência significativa sobre os valores de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  em todos os ciclos avaliados no ensaio. Houve aumento de Ca e Mg trocáveis à medida que se aumentaram as doses do corretivo, assim como houve uma redução destes teores após o primeiro ciclo da planta. A dose 3 (V = 80%) foi a que apresentou maiores teores destes elementos, sendo que o calcário B (baixa reatividade) forneceu as maiores concentrações de  $\text{Ca}^{2+}$  no primeiro ciclo e, diferentemente do que se esperava, atingiu menores valores no último. Os calcários A e C tiveram comportamentos semelhantes, sendo o A (reatividade média) mais eficiente no fornecimento de  $\text{Mg}^{2+}$ , uma vez que possui maiores porcentagens de MgO e  $\text{MgCO}_3$  em sua composição (Tabela 3.1). Cabe ressaltar que independente do tipo e dose de calcário utilizado, houve elevação dos teores de cálcio e magnésio, que eram muito baixos.

A semelhança entre calcário A e C pode ser observada principalmente no terceiro ciclo quando se analisaram todos os atributos do solo simultaneamente, mediante a análise de componentes principais (PCA) através do programa estatístico SPSS (Figuras 3.4 e 3.5). Esta análise permite avaliar a influência do tipo de calcário sobre o conjunto de atributos químicos do solo e produção de matéria seca simultaneamente, assim como pode agrupar os calcários por semelhança. Foi possível a separação dos calcários nos três primeiros ciclos de cultivo, através das componentes 1 e 2 (99 % de representabilidade da variabilidade dos dados), quando aplicaram-se doses para elevar a saturação por bases para 40, 60 e 80 %, ou seja, doses 1, 2 e 3 respectivamente (Figuras 3.4 e 3.5). Cada ponto representa uma repetição de todos os atributos avaliados simultaneamente em cada tratamento. Destaca-se a semelhança entre os produtos A e C, especialmente com a maior dosagem de corretivo. Após o último ciclo, apenas as testemunhas foram separadas dos demais tratamentos para todos os calcários avaliados (Figura 3.5).

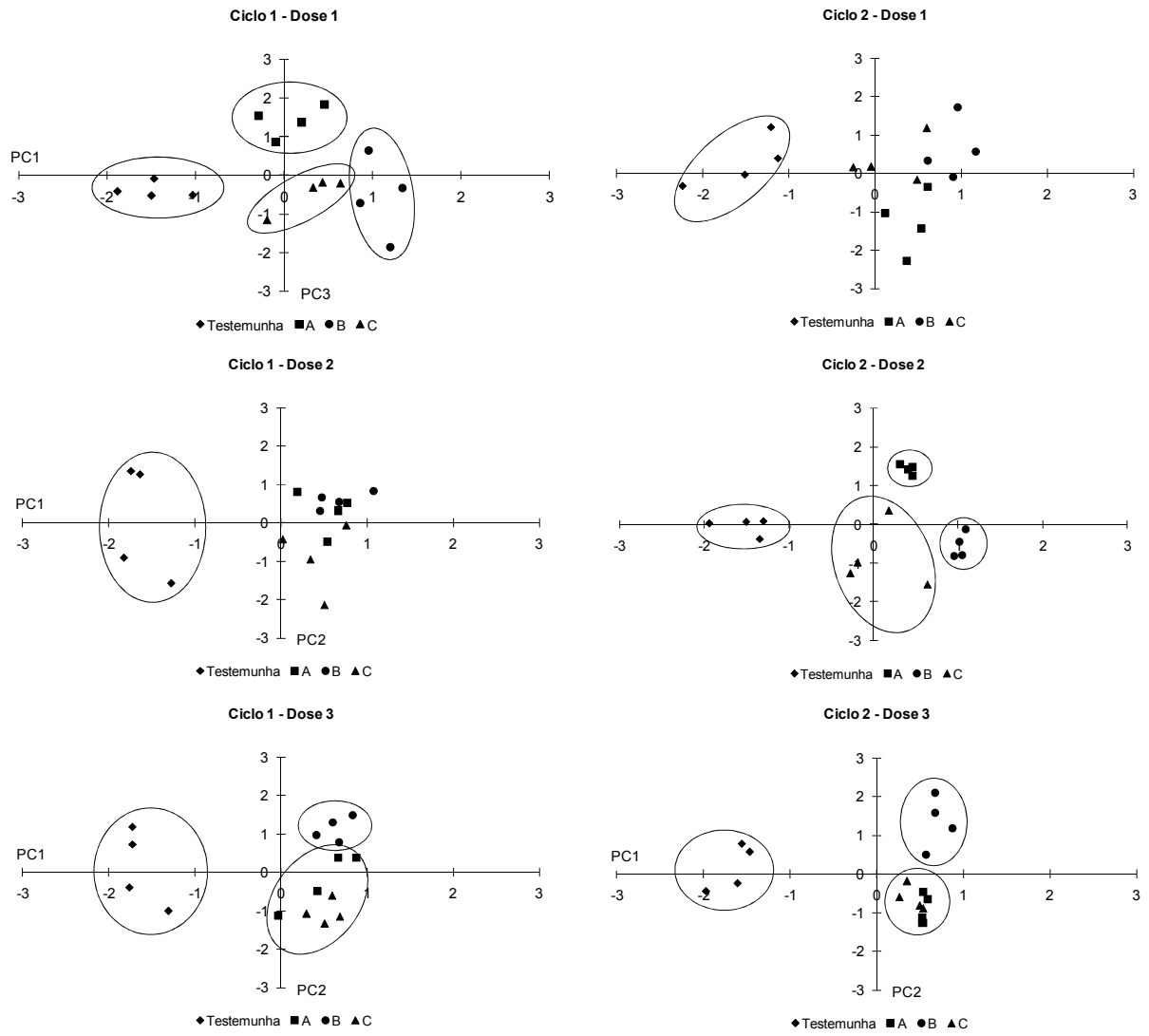


Figura 3.4 – Componentes principais das três doses e tipos de calcário nos ciclos um e dois do Latossolo Vermelho textura argilosa

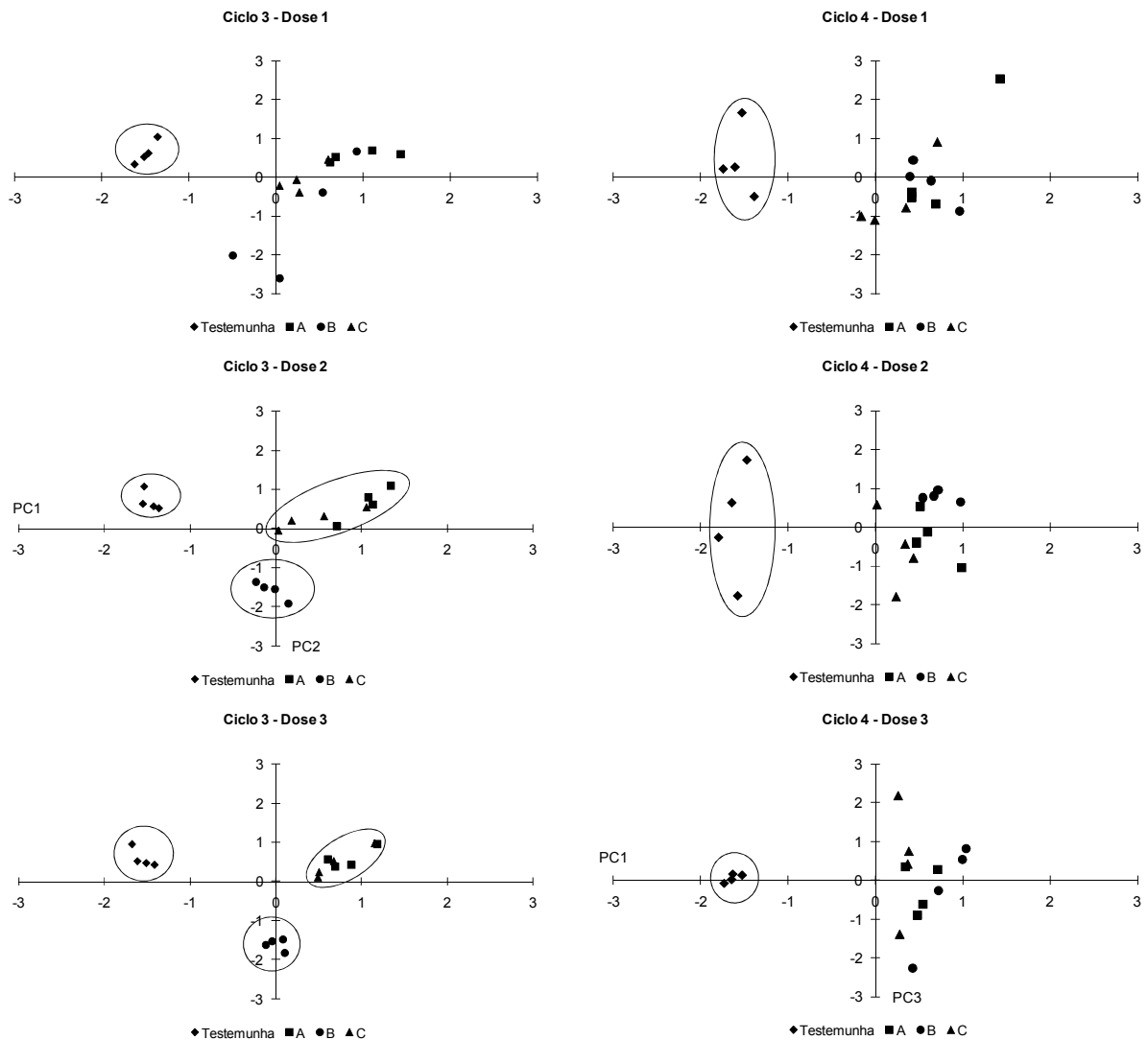


Figura 3.5 – Componentes principais das três doses e tipos de calcário nos ciclos três e quatro do Latossolo Vermelho textura argilosa

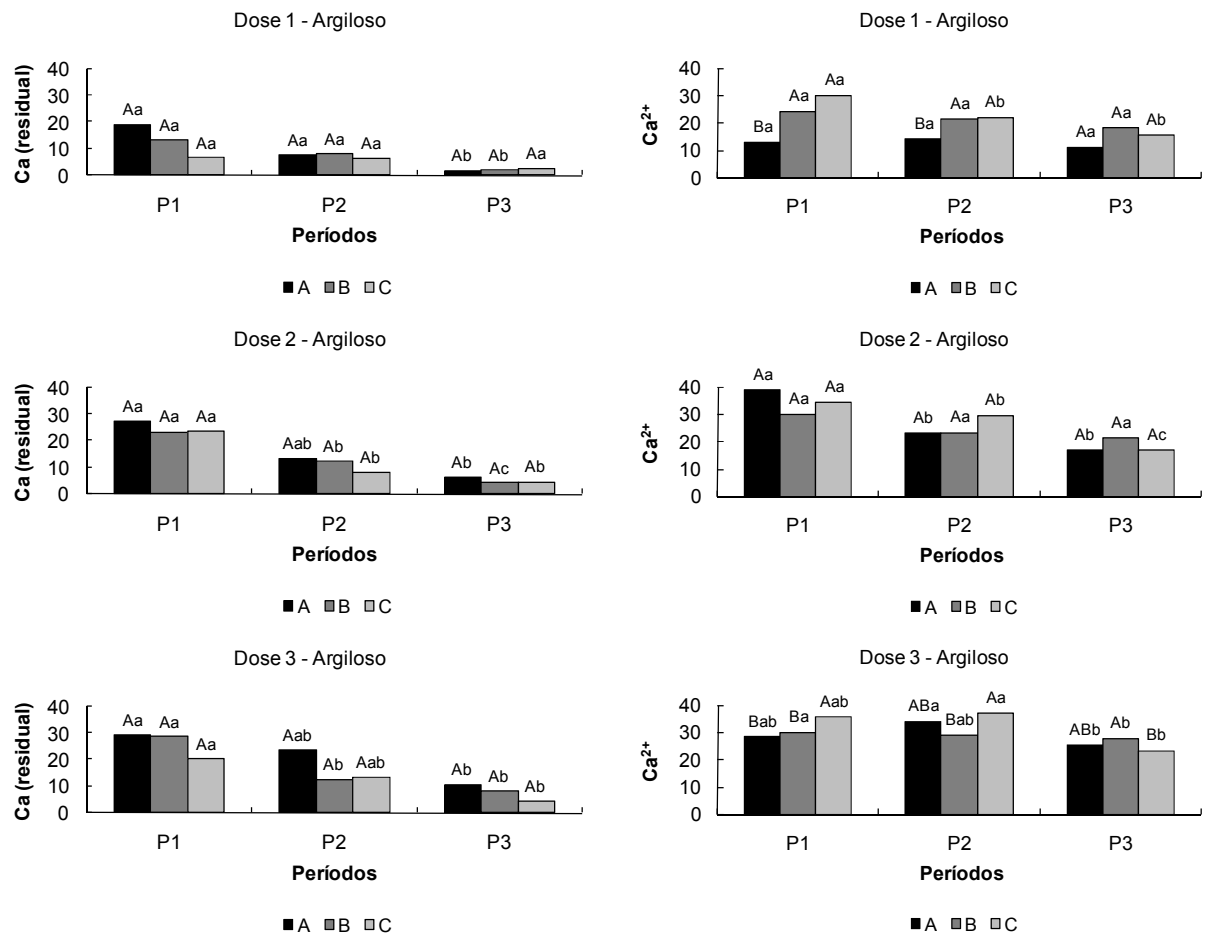
### 3.2.2.1.2 Efeito residual dos calcários no experimento dois

Os valores obtidos para o cálcio residual no solo argiloso do experimento de incubação não variaram significativamente dentro de um mesmo período, ou seja, os três calcários foram semelhantes quanto aos teores deste atributo em todas as doses avaliadas (Figura 3.6). Porém, ao avaliar separadamente o comportamento de cada calcário ao longo do tempo, observou-se que, com a aplicação da menor dose dos produtos A (RE = 85,72 %) e B (RE = 83,72 %), houve um decréscimo na quantidade de cálcio residual no último período, enquanto que com o uso de C

(RE = 99,10 %), os teores permaneceram constantes. No entanto, quando as doses utilizadas foram maiores, calculadas para elevar a saturação por bases para 60 e 80 % (Doses 2 e 3), este decréscimo foi evidente com o uso dos três produtos.

Os valores de  $\text{Ca}^{2+}$  foram maiores quando comparados com valores residuais num mesmo período avaliado e tenderam a um equilíbrio, já que não havia planta para extrair os nutrientes. Soratto et al. (2008) também encontraram maiores teores de cálcio trocável que os residuais em um trabalho realizado em campo, 18 meses após aplicação de calcário na implantação do sistema de semeadura direta, indicando que a dissolução dos corretivos foi rápida. Para Mello et al. (2003), mesmo quando aplicados em superfície, a maior parte da fração granulométrica mais fina (menor que 0,30 mm) do calcário reage no solo em três meses, enquanto que a fração com maior dimensão continua reagindo posteriormente, concordando com os resultados obtidos neste trabalho com a aplicação da maior dose de calagem (dose 3). No último período avaliado (P3), as maiores concentrações de  $\text{Ca}^{2+}$  foram obtidas com a aplicação de B, seguida de A e C. Em média, 68 % do corretivo B passaram pela peneira de abertura 0,30 mm (Tabela 1), enquanto que 73 % e 98 % dos calcários A e C respectivamente, passaram pela mesma abertura. Já para Quaggio et al. (1995), um calcário tradicional, com cerca de 25 % de suas partículas maiores que a peneira de 0,30 mm, sempre proporcionou maiores valores de cálcio e magnésio não trocáveis no solo.

Os calcários B e C apresentaram maiores concentrações de  $\text{Ca}^{2+}$  na menor dose aplicada (Figura 3.6). Isto demonstra que apesar do produto B ser menos reativo que o C, forneceu quantidades equivalentes de  $\text{Ca}^{2+}$  numa mesma dose e período avaliados. Com a maior dose de calagem (V = 80 %) no último período (P3), os teores mais elevados de  $\text{Ca}^{2+}$  encontrados foram com o uso de B, seguido de A e C. Avaliando-se os três produtos ao longo do tempo, nota-se que na menor dose (V = 40 %), apenas o calcário mais reativo (C) teve suas concentrações de  $\text{Ca}^{2+}$  reduzidas, enquanto que o produto B, com teores máximos equivalentes a C, manteve valores constantes de  $\text{Ca}^{2+}$  durante os três períodos avaliados. Nas doses mais elevadas de calagem, os calcários A e B se comportaram de forma semelhante.



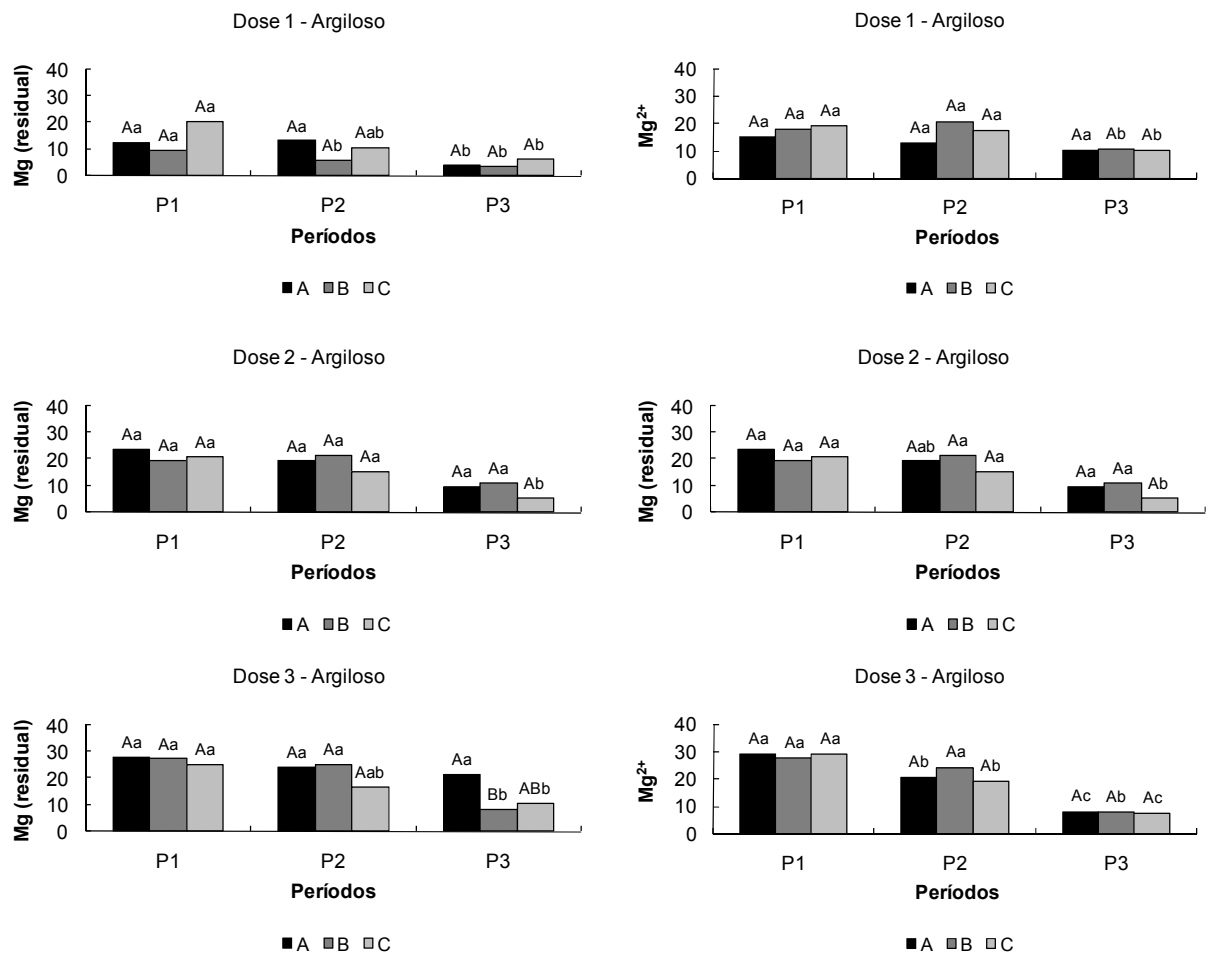
Letras maiúsculas iguais dentro de um mesmo período não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância; Letras minúsculas iguais para um mesmo calcário ao longo dos três períodos não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância.

Figura 3.6 – Efeito dos diferentes calcários numa mesma dose sobre os teores de cálcio trocável e residual no Latossolo Vermelho textura argilosa (valores em  $\text{mmol}_c.\text{dm}^{-3}$ )

Os valores obtidos para o magnésio residual no solo argiloso do experimento de incubação variaram significativamente dentro de um mesmo período, apenas com a aplicação da maior dose de calcário (Figura 3.7). Desta forma, no último período avaliado, o produto A apresentou maior concentração de magnésio residual. Este valor mais elevado pode ser atribuído ao resíduo (16,15 %), que pode não ter reagido no solo.

Quanto aos teores de  $\text{Mg}^{2+}$ , avaliando-se separadamente cada período, não houve diferenças significativas entre os três produtos testados. Porém, foi observado diferenças entre eles ao longo do tempo (Figura 3.7). Com o calcário A (PRNT = 88,29; PN = 104,44; RE = 85,72), os teores de  $\text{Mg}^{2+}$  se mantiveram constantes no decorrer dos períodos com a aplicação da menor dose de calagem, diferentemente de B e C, que tiveram estes valores reduzidos no último

período. No entanto, não se seguiu o mesmo padrão para as maiores doses. Na dose dois, calculada para elevar a saturação por bases para 60 %, os teores deste elemento se mantiveram constantes com o uso do produto B. De maneira geral, observou-se uma tendência destes valores se manterem constantes, assim como foi observado para os valores de  $\text{Ca}^{2+}$ . Também foram verificados maiores teores de  $\text{Mg}^{2+}$  do que não trocável, concordando com Soratto et al. (2008).



Letras maiúsculas iguais dentro de um mesmo período não diferem entre si pelo teste de tukey ao nível de 5% de significância. Letras minúsculas iguais para um mesmo calcário ao longo dos três períodos não diferem entre si pelo teste de tukey ao nível de 5% de significância.

Figura 3.7 – Efeito dos diferentes calcáries numa mesma dose sobre os teores de magnésio trocável e residual no Latossolo Vermelho textura argilosa (valores em  $\text{mmol}_c.\text{dm}^{-3}$ )

### 3.2.2.2 Neossolo Quartzarênico

### 3.2.2.2.1 Efeito dos tipos e doses de calcários nos atributos químicos do solo e matéria seca

As doses de calcário aplicadas no solo arenoso aumentaram linearmente o pH em  $\text{CaCl}_2$  concordando com Premazzi (1991) e Mitidieri (1995), e reduziram significativamente os teores de  $\text{Al}^{3+}$  (Tabelas 3.6, 3.7 e 3.8). Essa redução de  $\text{Al}^{3+}$  foi observada pelos valores obtidos principalmente na testemunha comparada às demais doses. Porém, não houve diferenças significativas entre as três doses aplicadas, principalmente do calcário A. No entanto, para o B e C verificaram-se diferenças entre as doses, sendo que as maiores reduções nos teores do  $\text{Al}^{3+}$  ocorreram nas doses mais elevadas de corretivos aplicadas.

Tabela 3.6 – Resultados das análises químicas do Neossolo Quartzarênico após o primeiro, segundo, terceiro e quarto ciclo com o uso do calcário A. Média de quatro repetições

Tratamentos Doses	Atributos											
	pH	Al	H + Al	Ca	Mg	K	CTC	P	MO	V%	MS	
	mmol <sub>e</sub> .dm <sup>-3</sup>					mg.dm <sup>-3</sup>		g.dm <sup>-3</sup>		g		
<b>Calcário A</b>	<b>0</b>	4.3 b	4.5 a	27.8 a	2.0 b	0.7 b	2.1 b	32.5 b	20.1 b	12.5 a	14.7 b	25.3 b
<b>Ciclo 1</b>	<b>1</b>	5.4 a	0.9 b	18.3 b	15.0 a	3.1 ab	4.3 a	40.6 a	91.2 a	13.0 a	55.0 a	60.2 a
	<b>2</b>	5.6 a	0.9 b	16.5 b	18.0 a	4.6 a	4.5 a	43.6 a	93.9 a	13.0 a	62.1 a	48.0 a
	<b>3</b>	5.4 a	1.0 b	17.0 b	16.0 a	3.7 ab	4.8 a	41.4 a	106.3 a	13.0 a	58.9 a	56.2 a
	<b>R<sup>2</sup></b>	0,11ns	0,83**P	0,07ns	0,73**P	0,51*P	0,66*P	0,63**P	0,82**P	0,19ns	0,81**P	0,82**P
<b>Calcário A</b>	<b>0</b>	4.3 b	17.2 a	28.8 a	4.8 c	0.2 b	0.3 a	34.0 a	49.9 b	11.4 a	15.5 c	79.2 a
<b>Ciclo 2</b>	<b>1</b>	4.6 b	1.4 b	17.3 b	6.8 bc	0.3 b	0.3 a	24.6 a	73.4 a	13.3 a	29.9 b	122.9 a
	<b>2</b>	5.0 a	1.8 b	14.5 b	9.5 ab	0.8 a	0.3 a	25.1 a	60.8 ab	13.0 a	42.2 a	78.6 a
	<b>3</b>	5.2 a	1.9 b	14.5 b	9.5 a	1.5 a	0.3 a	25.8 a	78.3 a	11.3 a	43.9 a	79.9 a
	<b>R<sup>2</sup></b>	0,87**L	0,51**L	0,71**L	0,80**L	0,30*L	0,37*L	0,00ns	0,24ns	0,36*L	0,92**L	0,12ns
<b>Calcário A</b>	<b>0</b>	4.4 b	17.6 a	28.9 a	4.8 a	0.6 c	0.5 a	34.8 a	58.0 a	11.6 a	16.9 b	11.0 b
<b>Ciclo 3</b>	<b>1</b>	4.5 b	2.6 b	17.3 b	5.4 a	0.7 bc	0.3 a	23.7 a	59.5 a	11.2 b	27.2 ab	23.8 a
	<b>2</b>	4.8 a	2.4 b	16.5 b	6.6 a	1.3 a	0.3 a	24.7 a	48.9 a	12.1 a	33.3 a	28.8 a
	<b>3</b>	4.8 a	2.3 b	16.0 b	6.4 a	1.1 ab	0.2 a	23.8 a	44.2 a	12.1 a	32.7 a	25.7 a
	<b>R<sup>2</sup></b>	0,68**L	0,50**L	0,59**L	0,31*L	0,39*L	0,30*L	0,01ns	0,47**L	0,25**L	0,94**P	0,26*L
<b>Calcário A</b>	<b>0</b>	4.3 b	19.0 a	29.0 a	2.2 b	0.2 b	0.2 a	31.6 a	60.5 ab	8.6 a	8.3 b	7.6 b
<b>Ciclo 4</b>	<b>1</b>	4.4 b	3.8 b	22.0 b	5.4 a	0.8 a	0.1 a	28.3 a	73.2 a	11.6 a	22.2 a	16.0 a
	<b>2</b>	4.8 a	3.1 b	20.3 b	3.5 a	1.0 a	0.1 a	24.9 a	55.7 b	10.7 a	18.6 a	11.3 ab
	<b>3</b>	4.8 a	2.9 b	20.0 b	4.5 a	1.0 a	0.2 a	25.7 a	58.5 ab	10.9 a	22.1 a	15.9 a
	<b>R<sup>2</sup></b>	0,65**L	0,54**L	0,45**L	0,81*P	0,78**P	0,02ns	0,08ns	0,04ns	0,11ns	0,36*L	0,31*L

Médias seguidas por letras iguais nas colunas não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância; 1, 2 e 3 referem-se às doses para elevação da saturação por bases para 40, 60 e 80 %, respectivamente; 0 refere-se à testemunha que não recebeu calcário; (ns) Valor não significativo estatisticamente pelo teste F com nível de significância de 5%; (\*) Valor estatisticamente significativo pelo teste F com nível de significância de 5%; (\*\*) Valor estatisticamente significativo pelo teste F com nível de significância de 1%; (P) e (L) Referem-se respectivamente, ao ajuste polinomial de segundo grau e linear.



Tabela 3.7 – Resultados das análises químicas do Neossolo Quartzarênico após o primeiro, segundo, terceiro e quarto ciclo com o uso do calcário B. Média de quatro repetições

Tratamentos Doses	Atributos											
	pH	Al	H + Al	Ca	Mg	K	CTC	P	MO	V%	MS	
	mmol.c.dm <sup>-3</sup>				mg.dm <sup>-3</sup>		g.dm <sup>-3</sup>		g			
<b>Calcário B</b>	<b>0</b>	4.3 b	4.5 a	27.8 a	2.0 b	0.7 c	2.1 b	32.5 b	20.1 b	12.5 a	14.7 b	25.3 b
<b>Ciclo 1</b>	<b>1</b>	5.3 a	1.0 b	16.8 b	14.0 bc	2.0 b	4.4 ab	37.2 b	88.0 a	13.0 a	55.0 a	48.2 c
	<b>2</b>	5.5 a	1.0 b	16.0 b	17.5 ab	4.0 a	4.2 ab	41.6 ab	98.3 a	13.0 a	61.6 a	107.5 a
	<b>3</b>	5.4 a	0.8 b	17.5 b	19.3 a	4.6 a	4.8 a	46.1 a	98.4 a	13.0 a	62.1 a	82.1 b
	<b>R<sup>2</sup></b>	0,73*P	0,87**P	0,20ns	0,73**L	0,79**L	0,37**L	0,39**L	0,89**L	0,19ns	0,89**P	0,73*P
<b>Calcário B</b>	<b>0</b>	4.3 b	17.2 a	28.8 a	4.8 b	0.2 b	0.3 a	34.0 a	49.9 b	11.4 a	15.5 c	79.2 a
<b>Ciclo 2</b>	<b>1</b>	4.8 b	1.4 b	16.3 b	4.5 b	0.5 ab	0.3 a	21.6 b	72.6 bc	9.3 a	24.7 b	72.3 b
	<b>2</b>	5.0 ab	1.0 b	15.5 b	9.8 a	0.5 ab	0.3 a	26.1 b	89.3 ab	9.3 a	40.6 a	135.6 a
	<b>3</b>	5.2 a	1.0 b	15.8 b	10.8 a	2.0 a	0.4 a	28.9 b	109.3 a	10.5 a	45.5 a	70.9 b
	<b>R<sup>2</sup></b>	0,87**L	0,64*p	0,83**P	0,65**L	0,45**L	0,72**L	0,06ns	0,64*P	0,39*L	0,81**L	0,23ns
<b>Calcário B</b>	<b>0</b>	4.4 b	17.6 a	28.9 a	4.8 b	0.6 b	0.5 a	34.8 a	58.0 a	11.6 a	16.9 b	11.0 b
<b>Ciclo 3</b>	<b>1</b>	4.6 b	1.7 b	17.0 ab	5.4 ab	0.8 ab	0.4 a	23.6 b	48.1 a	10.7 ab	28.1 ab	33.1 a
	<b>2</b>	4.8 ab	1.4 b	17.5 ab	6.9 ab	0.9 ab	0.4 a	25.7 b	68.0 a	10.2 b	31.9 ab	34.9 a
	<b>3</b>	4.9 a	1.0 b	16.5 b	7.7 a	1.1 a	0.4 a	25.7 b	62.4 a	12.8 a	35.9 a	46.6 a
	<b>R<sup>2</sup></b>	0,82**L	0,38ns	0,44**L	0,47**L	0,47**L	0,08ns	0,09ns	0,17ns	0,51**P	0,52**L	0,93*P
<b>Calcário B</b>	<b>0</b>	4.3 b	19.0 a	29.0 a	2.2 b	0.2 b	0.2 a	31.6 a	60.5 ab	8.6 a	8.3 b	7.6 b
<b>Ciclo 4</b>	<b>1</b>	4.5 b	2.3 a	23.5 b	5.2 a	1.0 a	0.1 a	29.8 a	56.8 b	11.6 a	21.2 a	7.9 ab
	<b>2</b>	4.6 ab	1.5 b	21.8 b	5.1 a	1.0 a	0.1 a	28.0 a	66.3 a	11.6 a	22.2 a	18.9 a
	<b>3</b>	4.7 a	1.4 b	20.8 b	6.7 a	1.0 a	0.1 a	28.6 a	61.7 a	10.5 a	27.4 a	14.9 ab
	<b>R<sup>2</sup></b>	0,83**L	0,60**L	0,59**L	0,35*L	0,97**P	0,02ns	0,07ns	0,02ns	0,08ns	0,28*L	0,25*L

Médias seguidas por letras iguais nas colunas não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância; 1, 2 e 3 referem-se às doses para elevação da saturação por bases para 40, 60 e 80 %, respectivamente; 0 refere-se à testemunha que não recebeu calcário; (ns) Valor não significativo estatisticamente pelo teste F com nível de significância de 5%; (\*) Valor estatisticamente significativo pelo teste F com nível de significância de 5%; (\*\*) Valor estatisticamente significativo pelo teste F com nível de significância de 1%, (P) e (L) Referem-se respectivamente, ao ajuste polinomial de segundo grau e linear.

Tabela 3.8 – Resultados das análises químicas do Neossolo Quartzarênico após o primeiro, segundo, terceiro e quarto ciclo com o uso do calcário C. Média de quatro repetições

Tratamentos Doses	Atributos											
	pH	Al	H + Al	Ca	Mg	K	CTC	P	MO	V%	MS	
	mmol.dm <sup>-3</sup>						mg.dm <sup>-3</sup>		g.dm <sup>-3</sup>		g	
<b>Calcário C</b>	<b>0</b>	4.3 b	4.5 a	27.8 a	2.0 b	0.7 b	2.1 b	32.5 b	20.1 b	12.5 a	14.7 b	25.3 b
<b>Ciclo 1</b>	<b>1</b>	5.3 b	0.9 b	19.5 ab	14.3 a	2.3 a	4.5 a	40.5 a	90.2 a	13.0 a	51.8 a	58.7 a
	<b>2</b>	5.5 a	0.9 b	15.3 b	17.5 a	2.8 a	5.3 a	40.8 a	100.4 a	13.0 a	62.6 a	46.9 ab
	<b>3</b>	5.5 a	1.0 b	16.0 b	16.8 a	3.0 a	4.6 a	40.3 a	97.5 a	13.0 a	60.3 a	48.2 ab
	<b>R<sup>2</sup></b>	0,88**P	0,87**P	0,23ns	0,47**L	0,58**L	0,68**P	0,65**P	0,66**P	0,14ns	0,81*P	0,51*P
<b>Calcário C</b>	<b>0</b>	4.3 b	17.2 a	28.8 a	4.8 b	0.2 b	0.3 a	34.0 a	49.9 b	11.4 a	15.5 c	79.2 a
<b>Ciclo 2</b>	<b>1</b>	4.8 bc	0.9 b	16.3 b	12.3 a	0.5 a	0.3 a	29.3 a	80.6 a	9.3 a	44.6 a	98.0 a
	<b>2</b>	5.3 b	0.8 b	16.3 b	12.8 a	0.5 a	0.3 a	29.8 a	70.9 ab	10.3 a	45.5 a	92.6 ab
	<b>3</b>	5.3 a	0.8 b	14.0 b	12.8 a	0.5 a	0.3 a	27.6 a	70.9 ab	9.3 a	49.3 a	71.7 c
	<b>R<sup>2</sup></b>	0,85**L	0,65*P	0,73**L	0,65**P	0,13ns	0,40ns	0,00ns	0,12ns	0,40ns	0,70**L	0,69**P
<b>Calcário C</b>	<b>0</b>	4.4 b	17.6 a	28.9 a	4.8 b	0.6 c	0.5 a	34.8 a	58.0 a	11.6 a	16.9 b	11.0 b
<b>Ciclo 3</b>	<b>1</b>	4.6 bc	1.7 ab	17.0 b	7.3 ab	0.7 a	0.4 a	25.4 b	47.4 a	10.0 a	33.0 ab	15.0 ab
	<b>2</b>	4.7 ab	0.9 b	18.3 b	8.8 ab	0.8 a	0.4 a	28.2 ab	51.6 a	10.7 a	35.3 ab	28.1 a
	<b>3</b>	4.8 a	0.8 b	16.8 b	12.4 a	0.9 a	0.5 a	30.4 a	59.9 a	12.1 a	45.0 a	25.7 a
	<b>R<sup>2</sup></b>	0,85**L	0,38ns	0,25ns	0,52**L	0,42**L	0,26ns	0,40*P	0,17ns	0,39*P	0,54**L	0,68**L
<b>Calcário C</b>	<b>0</b>	4.3 b	19.0 a	29.0 a	2.2 b	0.2 b	0.2 a	31.6 a	60.5 ab	8.6 a	8.3 c	7.6 b
<b>Ciclo 4</b>	<b>1</b>	4.4 bc	3.5 ab	22.5 a	4.2 ab	1.0 a	0.1 a	27.8 a	51.5 b	11.4 a	19.1 b	12.6 ab
	<b>2</b>	4.5 b	2.1 b	23.8 a	4.4 ab	0.5 ab	0.1 a	28.7 a	64.6 ab	10.5 a	17.4 b	19.4 a
	<b>3</b>	4.7 a	1.0 b	20.5 a	7.4 a	0.8 ab	0.1 a	28.7 a	71.6 a	10.5 a	28.5 a	18.2 ab
	<b>R<sup>2</sup></b>	0,81**L	0,59**L	0,26*L	0,55*L	0,21ns	0,10ns	0,06ns	0,27*L	0,10ns	0,25*L	0,43**L

Médias seguidas por letras iguais nas colunas não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância; 1, 2 e 3 referem-se às doses para elevação da saturação por bases para 40, 60 e 80 %, respectivamente; 0 refere-se à testemunha que não recebeu calcário; (ns) Valor não significativo estatisticamente pelo teste F com nível de significância de 5%; (\*) Valor estatisticamente significativo pelo teste F com nível de significância de 5%; (\*\*) Valor estatisticamente significativo pelo teste F com nível de significância de 1%; (P) e (L) Referem-se respectivamente, ao ajuste polinomial de segundo grau e linear.

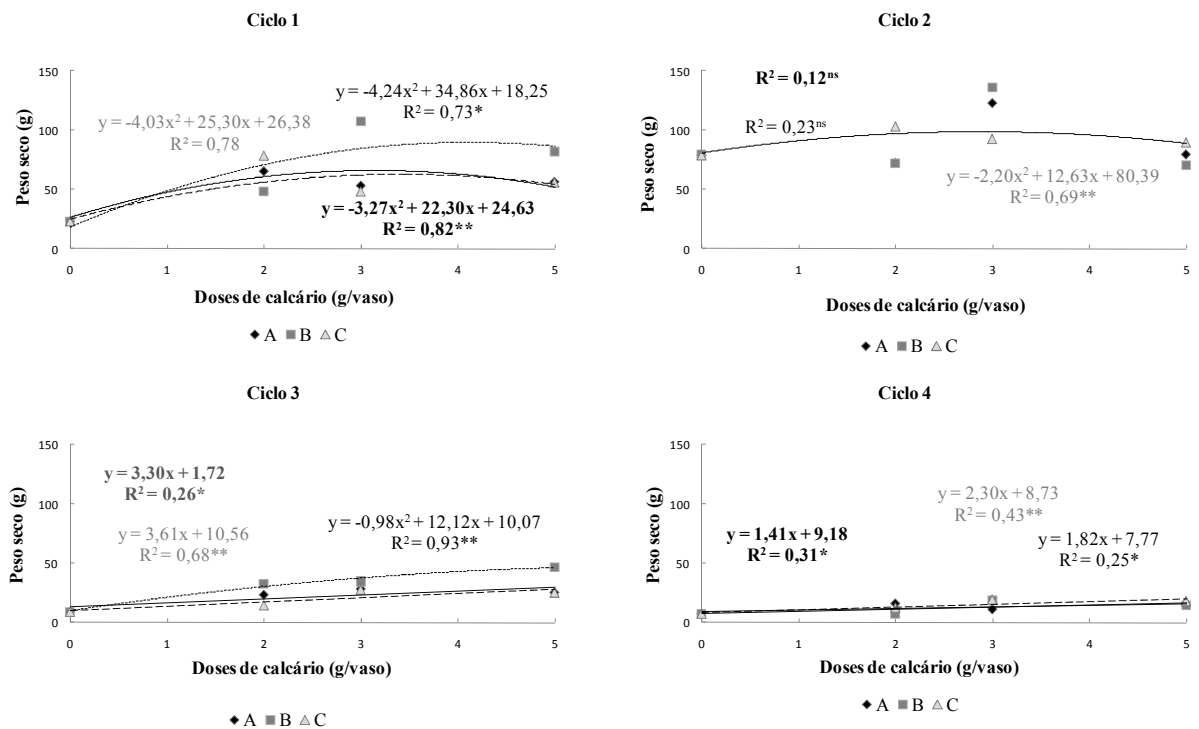
Os teores de P não foram influenciados significativamente pelas doses de calcário no terceiro cultivo. No entanto, houve diferença significativa entre a testemunha e demais doses de todos os calcários avaliados no primeiro ciclo (Tabelas 3.6, 3.7 e 3.8). Já no segundo e quarto ciclos, as maiores concentrações de fósforo ocorreram nas doses elevadas de calagem, concordando com Werner (1986). Autores como Couto et al. (1985) também observaram que a calagem pode otimizar o aproveitamento do fósforo pelas plantas, contribuindo para reduzir as quantidades de fertilizantes a serem aplicadas. Segundo Caires e Fonseca (2000) e Quaggio et al. (1982), em solos ácidos, a calagem aumenta a disponibilidade de P adsorvido nos óxidos de ferro e alumínio, mas o extrator Melich-1 não tem detectado esse efeito do calcário. Rosolem et al. (1994) observaram maior absorção de P por plantas de milho com o aumento da saturação por bases do solo através da calagem.

Houve redução dos valores de V % com a sucessão de cultivos e as maiores saturações foram obtidas no primeiro ciclo da planta. Para o calcário B (PRNT = 76,21; PN = 91,03; RE =

83,72), a maior dose de calagem ( $V = 80\%$ ), forneceu os maiores valores de saturação por bases ( $V = 62\%$ ), ao contrário de A (PRNT = 88,29; PN = 104,44; RE = 85,72) e C (PRNT = 105,26; PN = 106,21; RE = 99,10) que atingiram este valor com uma dosagem menor ( $V = 60\%$ ). Porém, após o quarto cultivo, a média da saturação por bases foi maior com uso do calcário B, diferentemente do que ocorreu com o solo de textura argilosa.

Dentre os produtos testados, de maneira geral, o C forneceu a maior concentração de cálcio durante os quatro ciclos estudados, seguido do B e A respectivamente, sendo que houve redução nestes valores com o decorrer dos ciclos. A maior concentração de cálcio no solo observada foi no primeiro ciclo com a aplicação do produto B para elevar a saturação por bases 80 %. No entanto, maiores teores deste elemento até o terceiro cultivo foram verificados com o uso de C. Após o quarto ciclo, a média dos teores de cálcio trocável em relação às três doses de calagem, foi superior com a utilização do produto B (Tabela 3.7).

Houve queda na produção de MS ao longo dos cultivos (Figura 3.8). O calcário B, por se tratar de um calcário com menor PRNT e RE, promoveu maior efeito de correção no solo em longo prazo, propiciando melhor desenvolvimento da matéria seca no terceiro ciclo da cultura. Embora o produto B tenha atingido a maior produtividade no primeiro ciclo da cultura na dose calculada para elevar a saturação por bases para 60 %, quando a dose utilizada foi menor ( $V = 40\%$ ), os produtos A e C produziram maiores quantidades de biomassa. Já os comportamentos dos calcários A e C foram semelhantes (com valores estatisticamente significativos) em relação à produção de MS. Isto pode ser observado também nas figuras 3.9 e 3.10, principalmente no primeiro cultivo, onde foi realizada a análise de componentes principais, levando-se em consideração, além da MS, todos os atributos químicos do solo simultaneamente. Os resultados obtidos com o uso desta técnica a fim de agrupar os calcários com comportamentos semelhantes não foram adequados para este solo como os observados no Latossolo Vermelho textura argilosa (Figuras 3.9 e 3.10). A correlação entre as doses de calcário aplicadas e a produção de matéria seca diminuiu com os cultivos sucessivos. O solo está retornando ao estado inicial do experimento, com a redução nos teores de alguns atributos como, por exemplo, cálcio, magnésio, saturação por bases e CTC que, após o quarto ciclo atingiram valores respectivamente de  $2,2 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ,  $0,2 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ,  $8,3\%$  e  $31,6 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$  com a testemunha.



(ns) Valor não significativo pelo teste F com nível de significância de 5%.

(\*) Valor estatisticamente significativo pelo teste F com nível de significância de 5%.

(\*\*) Valor estatisticamente significativo pelo teste F com nível de significância de 1%.

Figura 3.8 – Representação gráfica do comportamento dos calcários nos quatro ciclos da cultura do milho no Neossolo Quartzarênico

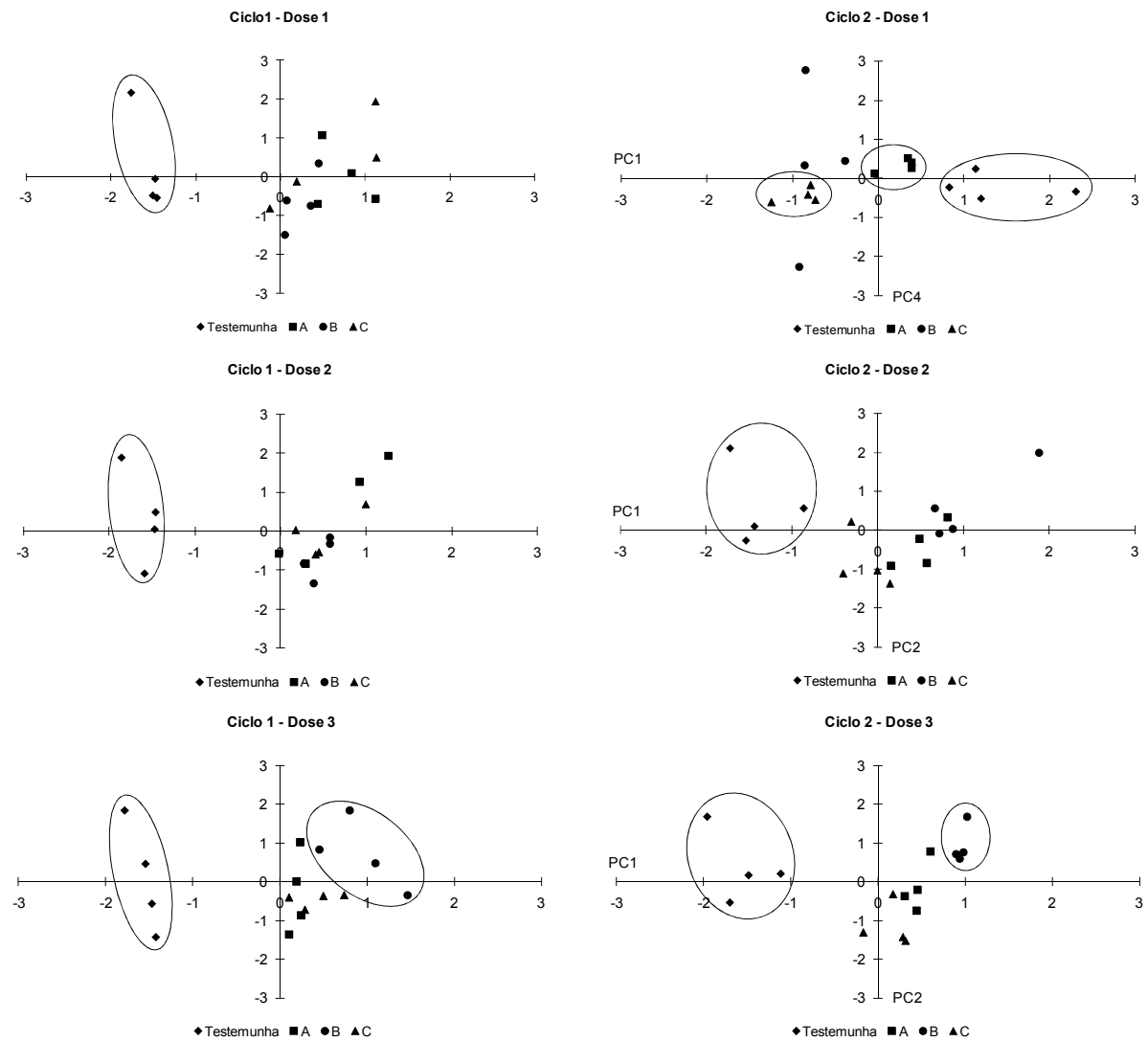


Figura 3.9 – Componentes principais das três doses e tipos de calcário nos ciclos um e dois do solo arenoso

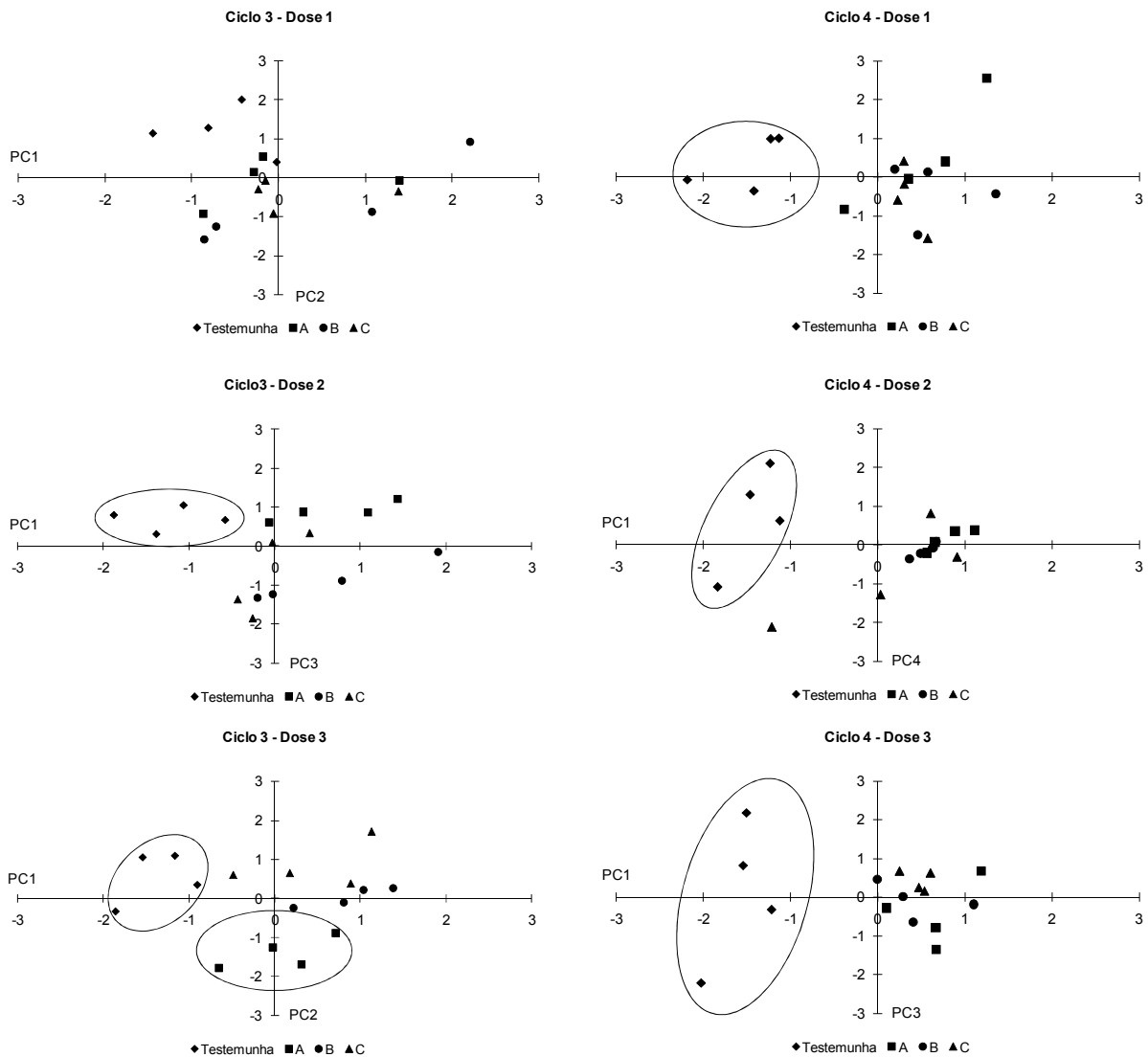


Figura 3.10 – Componentes principais das três doses e tipos de calcário nos ciclos três e quatro do solo arenoso

Observou-se correlação significativa da MS com os teores de Ca, Mg, V e pH do solo em todos os tratamentos, especialmente no terceiro cultivo (Tabela 3.9). Isto demonstra que são vários fatores em conjunto, que podem proporcionar a obtenção de altas produtividades das culturas (CAIRES et al., 1998, 2000, 2005).

Tabela 3.9 – Correlações entre os atributos pH, Ca, Mg, V% e MS para os três calcários, no primeiro, segundo, terceiro e quarto ciclos

Ciclo 1																	
Calcário A					Calcário B					Calcário C							
	pH	Ca	Mg	V%	MS		pH	Ca	Mg	V%	MS		pH	Ca	Mg	V%	MS
pH	1					pH	1					pH	1				
Ca	0,35	1				Ca	0,73**	1				Ca	0,72**	1			
Mg	0,49*	0,82**	1			Mg	0,62**	0,83**	1			Mg	0,74**	0,76**	1		
V%	0,45	0,96**	0,87**	1		V%	0,81**	0,93**	0,81**	1		V%	0,87**	0,92**	0,85**	1	
MS	0,35	0,70**	0,55*	0,74**	1	MS	0,97**	0,78**	0,63**	0,82**	1	MS	0,48*	0,46	0,54*	0,40	1
Ciclo 2																	
Calcário A					Calcário B					Calcário C							
	pH	Ca	Mg	V%	MS		pH	Ca	Mg	V%	MS		pH	Ca	Mg	V%	MS
pH	1					pH	1					pH	1				
Ca	0,83**	1				Ca	0,81**	1				Ca	0,73**	1			
Mg	0,50*	0,33	1			Mg	0,50**	0,44	1			Mg	0,13	0,28	1		
V%	0,93**	0,91**	0,63**	1		V%	0,88**	0,97**	0,59*	1		V%	0,84**	0,96**	0,39	1	
MS	0,32	0,27	-0,12	0,18	1	MS	0,21	0,42	-0,22	0,34	1	MS	0,21	0,15	0,37	0,25	1
Ciclo 3																	
Calcário A					Calcário B					Calcário C							
	pH	Ca	Mg	V%	MS		pH	Ca	Mg	V%	MS		pH	Ca	Mg	V%	MS
pH	1					pH	1					pH	1				
Ca	0,76**	1				Ca	0,74**	1				Ca	0,78**	1			
Mg	0,73**	0,71**	1			Mg	0,72**	0,88**	1			Mg	0,76**	0,74**	1		
V%	0,86**	0,96**	0,81**	1		V%	0,77**	0,99**	0,88**	1		V%	0,81**	0,98**	0,72**	1	
MS	0,70**	0,63**	0,71**	0,74**	1	MS	0,85**	0,60**	0,62**	0,65**	1	MS	0,88**	0,60**	0,69**	0,59*	1
Ciclo 4																	
Calcário A					Calcário B					Calcário C							
	pH	Ca	Mg	V%	MS		pH	Ca	Mg	V%	MS		pH	Ca	Mg	V%	MS
pH	1					pH	1					pH	1				
Ca	0,74**	1				Ca	0,67**	1				Ca	0,60**	1			
Mg	0,62**	0,85**	1			Mg	0,75**	0,64**	1			Mg	0,33	0,64**	1		
V%	0,64**	0,76**	0,64**	1		V%	0,52*	0,38	0,65**	1		V%	0,57*	0,51*	0,45	1	
MS	0,11	0,56*	0,55*	0,23	1	MS	0,35	0,01	0,41	0,41	1	MS	0,47*	0,62**	0,38	-0,02	1

(\*) Valor estatisticamente significativo pelo teste t de Student com nível de significância de 5%.

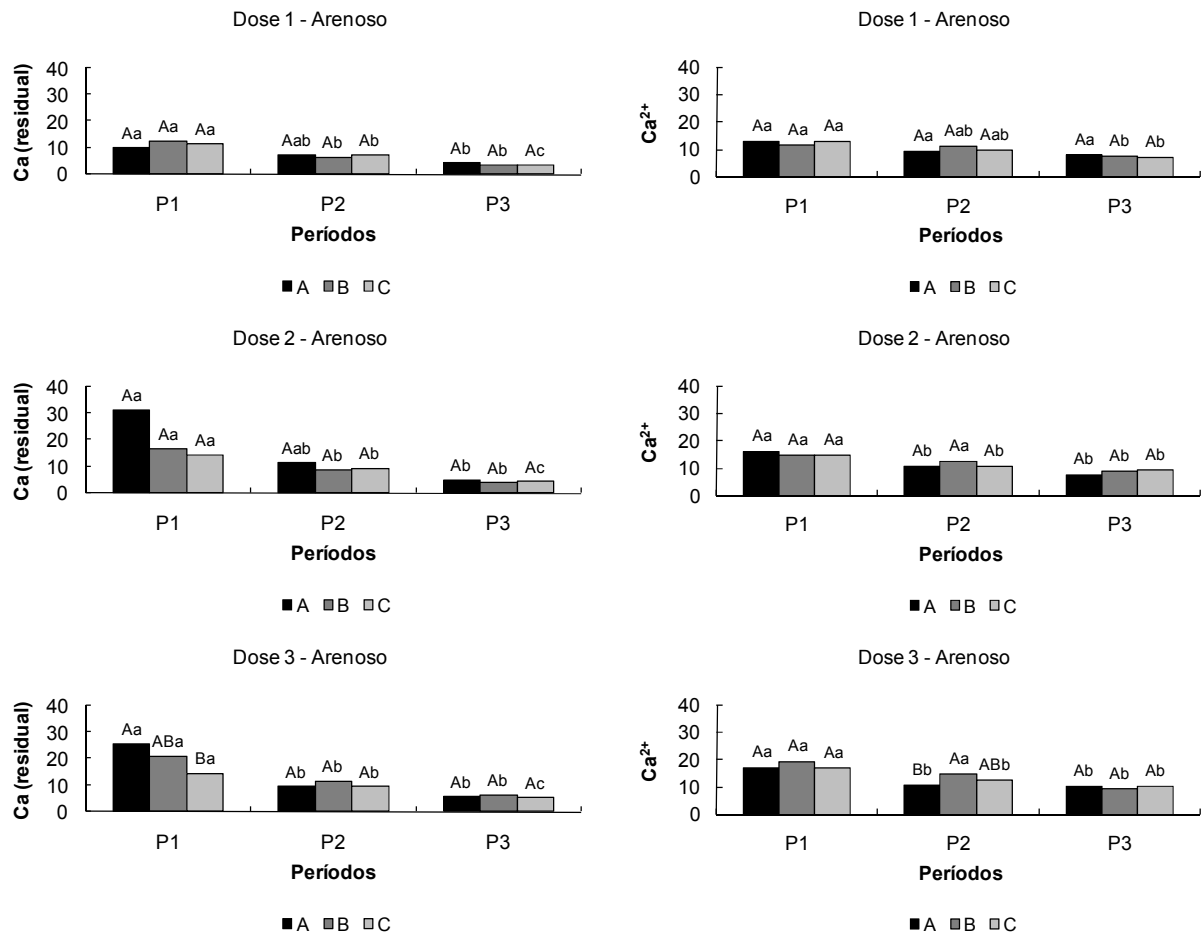
(\*\*) Valor estatisticamente significativo pelo teste t de Student com nível de significância de 1%.

### 3.2.2.2.2 Efeito residual dos calcários no experimento dois

Nas duas menores doses de calagem, em relação aos teores de cálcio trocável e residual, os três calcários não diferiram significativamente entre si em cada período avaliado (Figura 3.11). No entanto, ocorreu diferença com a maior dose aplicada (dose 3), onde os valores de cálcio residual obtidos foram menores com o uso de C no primeiro período, seguidos de B e A, enquanto que, o calcário A apresentou menores concentrações de  $\text{Ca}^{2+}$  no segundo período. Isto pode ser explicado pelo fato de C ser mais reativo que A e B respectivamente.

Com o passar dos meses, os teores de cálcio residual diminuíram com o uso de todos os calcários e doses aplicadas. Esta redução ocorreu também nos valores de  $\text{Ca}^{2+}$ , que atingiram valores um pouco maiores no primeiro período avaliado de cada dose. Os produtos B e C tiveram seus teores de  $\text{Ca}^{2+}$  reduzidos com o passar do tempo na dose 1, enquanto que os teores de A

permaneceram constantes. Nas doses 2 e 3, houve uma redução nas concentrações de cálcio trocável com o uso de A e C, do primeiro para o segundo período, enquanto esta diminuição nas concentrações de  $\text{Ca}^{2+}$  com o calcário B ocorreu apenas do segundo para o terceiro períodos.

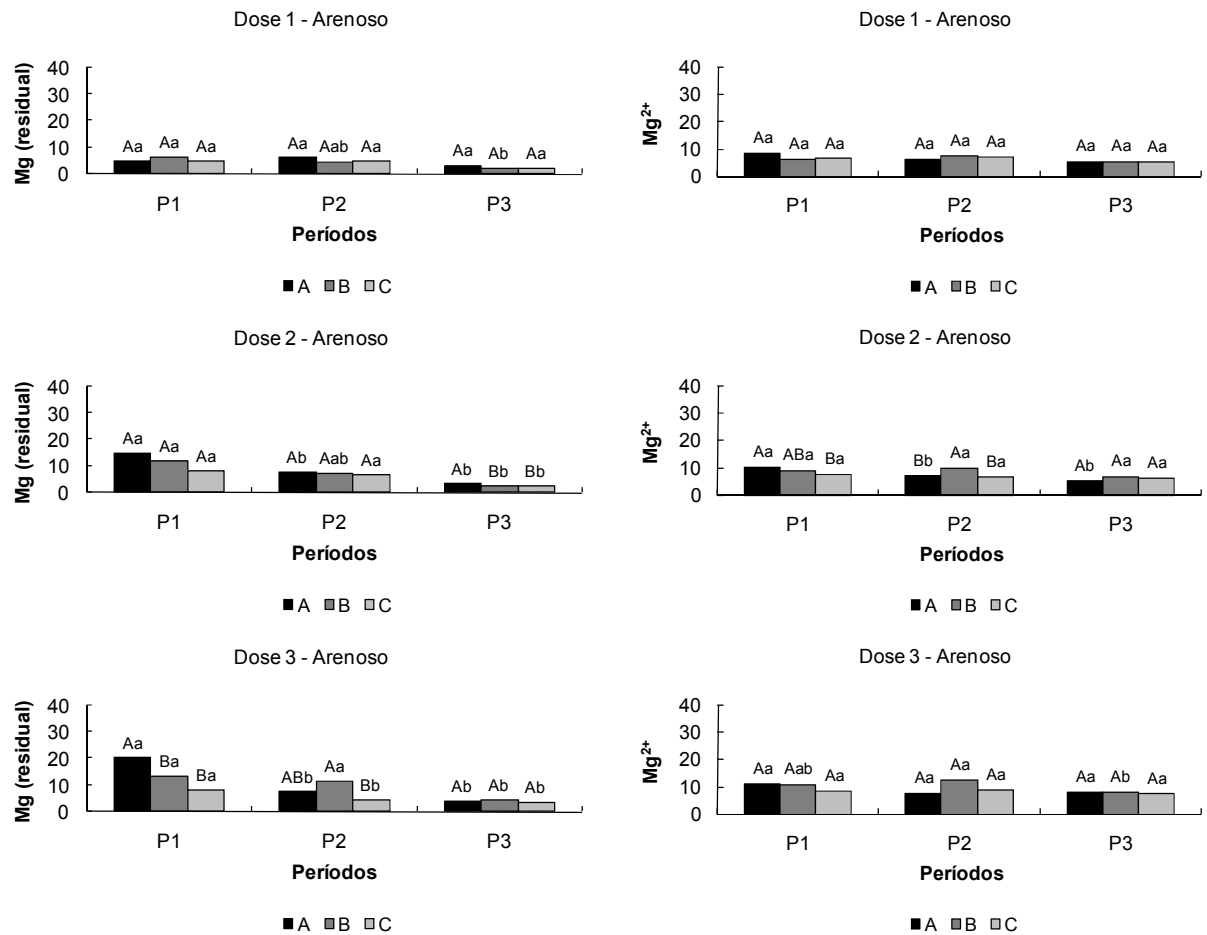


Letras maiúsculas iguais dentro de um mesmo período não diferem entre si pelo teste de tukey ao nível de 5% de significância. Letras minúsculas iguais para um mesmo calcário ao longo dos três períodos não diferem entre si pelo teste de tukey ao nível de 5% de significância.

Figura 3.11– Efeito dos diferentes calcários numa mesma dose sobre os teores de cálcio trocável e residual no solo arenoso (valores em  $\text{mmol}_c.\text{dm}^{-3}$ )

As concentrações encontradas de magnésio foram muito baixas nestes solos. Apenas com a maior dose de corretivo aplicada foi possível uma melhor interpretação dos resultados. Os teores de Mg residual foram maiores em A no primeiro período e em B no segundo. Ao final do terceiro período estas concentrações não diferiram significativamente. Resultados semelhantes foram obtidos para o  $\text{Mg}^{2+}$ .





Letras maiúsculas iguais dentro de um mesmo período não diferem entre si pelo teste de tukey ao nível de 5% de significância. Letras minúsculas iguais para um mesmo calcário ao longo dos três períodos não diferem entre si pelo teste de tukey ao nível de 5% de significância.

Figura 12 – Efeito dos diferentes calcários numa mesma dose sobre os teores de magnésio trocável e residual no solo arenoso (valores em mmol<sub>c</sub>.dm<sup>-3</sup>)

Os resultados obtidos na análise de cálcio residual e trocável no solo arenoso foram menos consistentes que do argiloso. Isso reforça verificações de Soratto et al. (2008). Para estes autores, ainda faltam estudos para validação do método e sobre a influência de outros fatores, como a dose de calcário utilizada e/ou a combinação com a aplicação de gesso, nos teores de cálcio e magnésio não trocáveis no solo, ou seja, na estimativa do calcário residual.

### 3.3 Conclusões

- 1 - A aplicação de calcário nos solos argilosos e arenosos estudados implicou em aumentos nos teores de cálcio e magnésio, elevação do pH com redução de alumínio.
- 2 - O melhor desenvolvimento do milho, ou seja, o maior peso seco obtido foi aos 57 DAP e observado no solo de textura argilosa.
- 3 - O comportamento dos calcários A e C foram semelhantes nos solos argilosos e arenosos ao avaliar simultaneamente todos os atributos químicos do solo, além da matéria seca, através das análises de componentes principais.
- 4 - Não foram observadas maiores diferenças entre os corretivos avaliados em relação à produção de matéria seca e efeito residual dos mesmos.
- 5 - Diferentes doses de cada calcário, considerando o PRNT, foram utilizadas para se atingir o mesmo valor de saturação por bases no cálculo da calagem. Logo, na escolha do melhor corretivo a ser empregado, deve-se levar em consideração seus valores de PRNT, RE e PN a fim de analisar a viabilidade econômica de cada produto.
- 6 - Ainda faltam estudos para validação do método de estimativa do calcário residual e sobre a influência de outros fatores, como a dose de calcário utilizada, nos teores de cálcio e magnésio não trocáveis do solo. Pesquisas, principalmente em condições de campo, devem ser realizadas a fim de avaliar a eficiência dos calcários por períodos mais prolongados.

## Referências

- ABREU Jr., C.H.; MURAOKA, T. ; LAVORANTE, A.F. Relationship between acidity and chemical properties of Brazilian Soils. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 60, p.337-343, 2003.
- ALCARDE, J.C. Características de qualidade dos corretivos da acidez do solo. IN: SIMPÓSIO SOBRE "ACIDEZ E CALAGEM", REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO, 15., 1983. Campinas. **Anais...** Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1983. p. 11-23.
- ALCARDE, J.C. Corretivos da acidez dos solos: Características e interpretações técnicas. 2 ed. – São Paulo: ANDA, 1992. 26p ( Boletim técnico, 6)
- ALCARDE, J.C.; RODELLA, A.A. O equivalente em carbonato de cálcio dos corretivos da acidez dos solos. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.53, n.2/3, p.6-12, maio/dez. 1996.
- AZEVEDO, A.C.; KÄMPF, N.; BOHNEN, H. Alterações na dinâmica evolutiva de Latossolo bruno pela calagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.20, p.191-198, 1996.

CAMARGO, O. A.; RAIJ, B. van. Movimento do gesso em amostras de Latossolos com diferentes propriedades eletroquímicas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.13, p.275-280, 1989.

CANTARELLA, H. Calagem e adubação do milho. In: BÜLL, L.T.; CANTARELLA, H. (Ed.). **Cultura do milho**: fatores que afetam a produtividade. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1993. p.147-196.

CAIRES, E.F.; CHUEIRI, W.A.; MADRUGA, E.F.; FIGUEIREDO, A. Alterações de características químicas do solo e resposta da soja ao calcário e gesso aplicados na superfície em sistema de cultivo sem preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.22, p.27-34, 1998.

CAIRES, E.F.; ALLEONI, L.R.F.; CAMBRI, M.A.; BARTH, G. Surface application of lime for crop grain production under a no-till system. **Agronomy Journal**, Madison, n. 97, p. 791-798, 2005.

CAIRES, E.F.; BARTH, G.; GARBUIO, F.J.; KUSMAN, M.T. Correção da acidez do solo, crescimento radicular e nutrição do milho de acordo com a calagem na superfície em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.26, p.1011-1022, 2002.

CAIRES, E.F.; FONSECA, A.F.; MENDES, J.; CHUEIRI, W.; MADRUGA, E.F. Produção de milho, trigo e soja em função das alterações das características químicas do solo pela aplicação de calcário e gesso na superfície, em sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.23, p.315-327, 1999.

CAIRES, E.F.; BLUM, J.; BARTH, G.; GARBUIO, F.J.; KUSMAN, M.T. Alterações químicas do solo e resposta da soja ao calcário e gesso aplicados na implantação do sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p.275-286, 2003.

CARVALHO, M.A.M.; DIETRICH, S.M.C. Variation in fructan content in the underground organs of *Vernonia herbacea* (Vell.) Rusby at different phenological phases. **New Phytologist**, London, v.123, p.735-740, 1993.

COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS - CFSEMG. 5 aproximação. Viçosa, 1999. 360p.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO – CQFS RS/SC. **Manual de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – Núcleo Regional Sul, 2004. 400p.

COUTO, W. The residual effect of P and lime on the performance of four tropical grasses in the high P-fixing Oxisol. **Agronomy Journal**, Madison, v. 77, n. 4, p. 539-542, 1985.

ERNANI, P.R.; GIANELLO, C. Diminuição do alumínio trocável do solo pela aplicação de calcário. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.7, p.161-165, 1983.

- ERNANI, P.R.; NASCIMENTO, J.A.L.; OLIVEIRA, L.C. Increase of grain and green matter of corn by liming. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.22, p.275-280, 1998.
- FAGERIA, N.K.; STONE, L.F. **Manejo da acidez dos solos de cerrado e de várzea do Brasil. Santo Antônio de Goiás**: EMBRAPA Arroz e Feijão, 1999. 42 p. (EMBRAPA arroz e feijão. Documentos, 92).
- FORESTIERI, E.F.; DE-POLLI, H. Calagem, enxofre e micronutrientes no crescimento do milho e da mucuna preta num Podzólico Vermelho-amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.14, p. 167-172, 1990.
- GARCIA-RODEJA, E.; NÓVOA, J.C.; PONTEVEDRA, X.; MARTÍNEZ-CORTÍZES, A.; BUURMAN, P. Aluminium fractionation on European volcanic soils by selective dissolution techniques. **Catena**, Amsterdam, v.56, p.155-183, 2004.
- GONZALEZ-ERICO, E.; KAMPRATH, E. J.; NADERMAN, G. C.; SOARES, W.V. Effect of Depth of Lime Incorporation on the Growth of Corn on an Oxisol of Central Brazil. **Soil Science Society of America Journal** , Madison, v.43, p.1155-1158, 1979.
- GOODROAD, L.L.; JELLUM, M.D. Effect of N fertilizer rate and soil pH on N efficiency in corn. **Plant Soil**, Dordrecht, v.106, p.85-89, 1988.
- HAYNES, R.H. Suicide in Fiji: a preliminary study. **Journal of Psychiatry**, London, v.145, p.433-438, 1984.
- KINRAID, T.B. Identity of the rhizotoxic aluminum species. **Plant Soil**, The Hague, v.134, p.167-178, 1991.
- LIMA, E.V. **Plantas de cobertura e calagem superficial na fase de implantação do sistema de plantio direto em região de inverno seco**. 2004. 125p. (Tese de Doutorado na área de Fitotecnia). Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, Botucatu , 2004. .
- LUTZ Jr., J.A.; GENTER, C.F.; HAWKINS, G.W. Effect of soil pH on element concentration and uptake by maize: I. P, K, Ca, Mg and Na. **Agronomy Journal**, Madison, v.64, p.581-583, 1972.
- MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1980. p. 219-251: A avaliação do estado nutricional.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. de **Avaliação do estado nutricional das plantas, princípios e aplicações**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potássio e do Fosfato. 1984. p.215.
- MARTINEZ, H.E.P. Macronutrientes em gramíneas. In: NUTRIÇÃO MINERAL DE FORRAGEIRAS NO BRASIL.1984. Campinas. **Anais...Campinas: Cargill**, 1984 .p.3-73.

- MENDONÇA, E.S. Oxidação da matéria orgânica e sua relação com diferentes formas de alumínio de Latossolos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.19, p. 25-30, 1995.
- MELLO, J.C.A.; VILLAS BOAS, R.L.; LIMA, E.V.; CRUSCIOL, C.A.C.; BULL, L.T. Alterações nos atributos químicos de um Latossolo distroférico decorrentes da granulometria e doses de calcário em sistemas plantio direto e convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, p. 553-561, 2003.
- MITIDIERI, F.J. **Resposta de cinco gramíneas forrageiras a níveis de calcário em um Latossolo Vermelho Escuro**. 1995. 137p. Tese de (Doutorado em Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1995.
- MOREIRA, M.A.; RUDORFF, B.F.T; FELÍCIO, J.F.; FREITAS, J.G.; TARGA, M.S. Variação espectral e eficiência de uso da radiação fotossinteticamente ativa em ensaio com genótipos de trigo. **Bragantia**, Campinas, v.64, p.331-338, 2005.
- NOLLA, A.; ANGHINONI, I. Critérios de calagem para a soja no sistema plantio direto consolidado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.30, p.475-483, 2006.
- NOLLA, A.; ANGHINONI, I. Métodos utilizados para correção da acidez do solo no Brasil. **Revista Brasileira de Ciências Exatas Naturais**, Santa Maria, v.6, p.97-111, 2004.
- NWACHUKU, D.A.; LOGANATHAN, P. The effect of liming on maize yield and soil properties in Southern Nigeria. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Philadelphia, v.22, p. 623-639, 1991.
- OLIVEIRA, E.L.; PAVAN, M.A. Control of soil acidity in non tillage system for soybean production. **Soil Tillage Resorces**, London, v, 38, p.47-57, 1996.
- PAULINO, V.T.; MALAVOLTA, E.; COSTA, N.L. Resposta de *Nenotonia wightii* à calagem e aplicação de micronutrientes. **Pasturas Tropicales**, Cali, v.16, p.23-33, 1994.
- PREMAZZI, L.M. **Saturação por bases como critério para recomendação de calagem em cinco forrageiras tropicais**. Piracicaba: ESALQ, 1991. 215p.
- QUAGGIO, J.A.; MASCARENHAS, H. A. A.; BATAGLIA, O.C. Resposta da soja à aplicação de doses crescentes de calcário em Latossolo Roxo distrófico de cerrado. II – Efeito Residual. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.6, p.113-118, 1982.
- QUAGGIO, J.A. Resposta das culturas à calagem. In: SEMINÁRIO SOBRE CORRETIVOS AGRÍCOLAS, 1984. Piracicaba **Papéis... Piracicaba** : Cargill, 1984. p. 123-154.
- RAIJ, B. van; QUAGGIO, J. A. **Métodos de análise de solo para fins de fertilidade**. Campinas: IAC, 1983. p. 1-31. (Boletim técnico, 81).

- RAIJ, B. van.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M. C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agrônomo/Fundação IAC, 1996. 285p.
- RAIJ, B. van; QUAGGIO, J. A. **Métodos de análise de solo para fins de fertilidade**. Campinas: IAC, p. 1-31, 1983 (Boletim técnico, 81).
- RAIJ, B. van.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M. C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agrônomo/Fundação IAC, 1996. 285p.
- RAIJ, B. van; FURLANI, P.R.; QUAGGIO, J.A.; PETTINELLI Jr., A. Gesso na produção de cultivares de milho com tolerância diferencial a alumínio em três níveis de calagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.22, p.101-108, 1998.
- RHEINHEIMER, D.S.; ANGHINONI, I.; CONTE, E.; KAMINSKI, J. E GATIBONI, L.C. Dessorção de fósforo avaliada por extrações sucessivas em amostras de solo provenientes dos sistemas plantio direto e convencional. **Ciência Rural**, v.33, p.1053-1059, 2003.
- SAS INSTUTE. **SAS/STAT: user's guide** (Release 8.0). Cary, 2003. 398 p.
- SANCHEZ, P.A.; SALINAS, J.G. Low-input technology for managing oxisols and ultisols in tropical America. **Advances in Agronomy**, Newark, v.34, p.279-406, 1981.
- SHAW, W.M.; ROBINSON, B. Reaction efficiencies of liming as indicated by lisimeter leachate composition. **Soil Science**, New Jersey, n.8, p.209-218, 1960.
- SILVEIRA, P.M.; ZIMMERMANN, F.J.P.; SILVA, S.C.da; CUNHA, A.A. da. Amostragem e variabilidade espacial de características químicas de um latossolo submetido a diferentes sistema de preparo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 10, p. 2057-2064, out. 2000.
- SOUSA, D.M.G.; LOBATO, E. Correção da acidez do solo. In: \_\_\_\_\_. **Cerrado: correção do solo e adubação**. Brasília: EMBRAPA, 2004. p. 81-96.
- SOUZA, D.M.G.; CARVALHO L.J.C.B.; MIRANDA, L.N. Correção da acidez do solo. In GOEDERT, W. J. (Ed.) **Solos de cerrados: tecnologias e estratégias de manejo**. São Paulo: Nobel, 1985. p.99-127.
- SORATTO, R. P.; CRUSCIOL, C. A. C. Métodos de determinação de cálcio e magnésio trocáveis e estimativa do calcário residual em um Latossolo submetido 'a aplicação de calcário e gesso em superfície. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, p.663-673, 2008.
- TISSI, J.A.; CAIRES, E.F.; PAULETTI, V. Efeitos da calagem em semeadura direta de milho. **Bragantia**, Campinas, v.63, n.3, p.405-413, 2004.

VITTI, G.C.; LUZ, P.H.C. Calagem e uso do gesso agrícola em pastagens. In: SIMPÓSIO SOBRE ECOSSITEMA DE PASTAGENS, 3., 1997. Jaboticabal. **Anais...** Jaboticabal: FUNEP, 1997. p. 63-111.

WERNER, J.C.; Calagem para plantas forrageiras. In: SIMPÓSIO SOBRE MANEJO DE PASTAGENS, 8., 1986. Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: FEALQ, 1986. p. 191-198.

#### **4 SENSORIAMENTO REMOTO ESPECTRAL NA DETECÇÃO DE ALTERAÇÕES QUÍMICAS NO SOLO CULTIVADO COM MILHO PROVOCADAS PELA APLICAÇÃO DE DIFERENTES CALCÁRIOS**

##### **Resumo**

Os estudos em fertilidade do solo avaliados por sensoriamento remoto são relativamente recentes e podem abrir novos campos nesta área. O presente trabalho teve como objetivo principal verificar a possibilidade de um sensor remoto em laboratório (350-2500 nm) detectar e quantificar os teores de elementos químicos no solo. Como base deste trabalho, o experimento avaliou as variações químicas e espectrais ocorrentes em um Latossolo textura argilosa e em um Neossolo Quartzarênico cultivados com milho durante quatro ciclos da cultura. O trabalho foi realizado em casa de vegetação. Os tratamentos, dispostos inteiramente ao acaso, com 4 repetições, constaram de 3 doses de calcário, calculadas para elevar a saturação por bases para 40, 60 e 80 %, além da testemunha. Paralelamente, outro experimento foi realizado por incubação para verificar o efeito residual dos corretivos ao longo do tempo. No primeiro experimento foram realizadas análises dos solos determinando-se pH em  $\text{CaCl}_2$ , matéria orgânica, fósforo, cálcio, magnésio, potássio, alumínio, hidrogênio mais alumínio, antes e depois dos tratamentos. No experimento dois, foram realizadas análises do cálcio e magnésio trocáveis e residuais. Os dados espectrais foram obtidos durante todo o processo ao nível de solos, totalizando 553 amostras de terra. Ao final, os dados foram correlacionados por estatística multivariada, utilizando o software ParLeS (VISCARRA-ROSSELL, 2008). Alguns dados originais das curvas espectrais foram transformados mediante a função  $\log 1/R$ . Com uma seleção aleatória de amostras foram construídos os modelos de calibração através do método de regressão por mínimos quadrados parciais (PSLR). O modelo foi validado com o restante das amostras. Os resultados obtidos para o solo de textura arenosa foram melhores que o da argilosa, com valores de  $R^2$  entre 0,78 e 0,91 para os atributos avaliados, atingindo valores de RPD acima de 2,0. Bons modelos de estimativa foram obtidos para SB ( $R^2 = 0,84$ ), Ca ( $R^2 = 0,78$ ) e CTC ( $R^2 = 0,79$ ). No entanto, a equação para K foi a que apresentou maiores valores de  $R^2$  e RPD com 0,91 e 3,16 respectivamente, além de apresentar o menor RMSE. No solo argiloso foram encontrados valores aceitáveis para a estimativa de Ca, SB e H+Al ( $R^2 > 0,64$ ). No experimento de incubação as equações obtidas na calibração dos modelos de Ca e Mg residuais foram consideradas insuficientes para determinar o atributo através da radiometria. As variações de reflectância entre 1900 – 2000 nm foram relacionadas com o Ca, assim como variações em outras faixas espectrais foram atribuídas a elementos químicos do solo, porém maiores estudos são necessários.

Palavras-Chave: Calagem; Espectrorradiometria; Análise de componentes principais

#### **4 DETECTION OF SOIL CHEMICAL CHANGES OCCURRED BY THE APPLICATION OF LIME WITH DIFFERENT REACTIVITY**



## Abstract

The soil fertility studies by remote sensing are recent and there are a lot to be done in this area. This work had the main objective to verify the possibility of a remote sensor in lab (350-2500 nm) to detect and to quantify the nutrient content in soils. This work evaluated the chemical and spectral changes in a Ferrasol and an Arenosols cultivated with corn during four cycles. The work was realized in a greenhouse. The treatments were disposed completely random, with four replications, three lime rates, calculated to raise the bases saturation to 40, 60 and 80 %, besides the control treatment. In parallel, another experiment was realized by incubation to verify the lime residual effect during time. In the first experiment was realized soil analyses to determine pH ( $\text{CaCl}_2$ ), organic matter, phosphorus, calcium, magnesium, potash, aluminum, hydrogen plus aluminum, before and after the treatments. In experiment two was realized analyses of exchangeable and residual calcium and magnesium. The spectral data were obtained all the process to the soil level, in a total of 553 soil samples. In the end, the data were correlated by multivariate statistics using the software ParLeS (VISCARRA-ROSSELL, 2008). Some original data of the spectral curves were transformed by the function  $\log 1/R$ . With a random selection of samples were generated the calibration models through the method of partial least square regression (PLSR). The model was validated with rest of soil samples. The obtained results for the sandy soil were better than the clay soil, with values of  $R^2$  between 0,78 and 0,91 for the evaluated attributes, reaching values of RPD above 2,0. Good models of estimative were obtained for SB ( $R^2 = 0,84$ ), Ca ( $R^2 = 0,78$ ) and CTC ( $R^2 = 0,79$ ). However, the equation for K was that showed higher values of  $R^2$  and RPD with 0,91 and 3,16, respectively, besides to present the lower RMSE. In the clay soil were founded acceptable values to estimate Ca, SB and H+Al ( $R^2 > 0.64$ ). In the second experiment, the validate equations were considered unable to analyse residual calcium and magnesium using the radiometric techniques. The variation of reflectance between 1900 – 2000 nm were correlated with Ca, as other spectral ranges were correlated to chemical attributes and must be better studied.

Keywords: Lime application; Spectroradiometry; Principal components analyses

#### 4.1 Introdução

A acidez do solo é um dos fatores mais limitantes da produtividade das culturas em várias partes do mundo. Nos solos ácidos existem problemas de deficiência e/ou toxidez nutricional, além de baixas capacidades de retenção de água e atividades dos microrganismos. Os solos de cerrado, com estas características apresentam baixa produtividade em estado natural (FAGERIA E STONE, 1999; SILVEIRA et al., 2000). Para incorporação desses solos ao processo produtivo é indispensável o uso adequado de corretivos, como calcário e adubação. A calagem é a prática mais comumente utilizada para neutralizar a acidez, aumentar a disponibilidade de nutrientes, reduzir o teor de elementos tóxicos, melhorar o ambiente radicular e restaurar a capacidade produtiva dos solos (CAIRES et al., 2005). Para o adequado planejamento do manejo e uso dos solos são necessárias análises químicas e físicas.

A análise de solo é um instrumento básico de diagnose da fertilidade do solo e ocupa lugar de destaque (RAIJ et al., 1987). Os métodos utilizados em laboratório, já consagrados, são analíticos e levaram bastante tempo para atingir os graus de confiabilidade que possuem. Trata-se de métodos em que as amostras de terra coletadas no campo, passam por uma série de processos visando a determinação de sua constituição química e física. No Brasil citam-se, dentre outras, as metodologias adotadas por Camargo et al. (1987), Raij et al. (1989) e Embrapa (1997). Os resultados das análises de solo são utilizados para uma série de atividades, entre elas, a classificação de solos e a recomendação para aplicação de adubos e fertilizantes, ambas de importância no manejo.

Historicamente, os métodos de amostragem sempre foi motivo de discussão. Lisle e Bauer (1929) propuseram o tratamento localizado da correção do pH de uma área de 17 ha em dados de 23 amostras ordenadamente coletadas. No caso, obtiveram diferentes mapas de pH. As parcelas foram diferenciadamente tratadas para sua correção. Por outro lado, a implementação do sistema na prática, dependia de outro fator: a localização precisa da variabilidade espacial dos nutrientes no campo. Como isso não era possível naquela época, muitos estudos foram realizados com o intuito de avaliar qual seria o número de amostras de terra necessária para representar uma área. De maneira geral foi estipulado que a coleta de amostras de terra para fins de fertilidade seria de uma amostra de terra composta de 20 subamostras para uma área não maior que 20 ha (RAIJ et al., 1996), surgindo assim o método clássico de amostragem de solos.

No caso da prática da agricultura de precisão (AP), na qual a variabilidade espacial é considerada mesmo em uma área dita uniforme segundo características de campo, há a demanda por um grande número de análises. Porém, o custo destas análises é elevado, sendo um dos principais entraves para a prática da AP, tanto na área de manejo químico como em levantamentos pedológicos. No Brasil, o custo da análise química de rotina por amostra de terra é em torno de vinte e dois reais, o que desencoraja a prática do manejo em sítios específicos. Além disso, as análises químicas de solo resultam em uma grande quantidade de reagentes gastos e resíduos produzidos que podem ter um destino inadequado, contaminando solos e águas. Estima-se que no Brasil o número de análises químicas de terra tenha atingido um milhão de amostras no ano de 2001 (RAIJ et al., 2001).

Somada à necessidade de redução de custos, o advento da Agricultura de Precisão em meados da década de 80 (SEARCY et al., 1989), e sua popularização na década de 90 (SCHUELLER, 2000), fez com que a comunidade científica se deparasse com um sistema agrícola atrelado à necessidade de automatização e velocidade na obtenção de informações (HUMMEL et al., 1996). Portanto, apesar dos atributos dos solos serem rotineiramente quantificados pelos métodos tradicionais em laboratório, estes em geral, demandam tempo para serem realizados. Assim, há a necessidade do desenvolvimento de metodologias que estimem rapidamente, de forma eficiente e econômica, os atributos do solo a fim de melhorar a avaliação quantitativa dos problemas de manejo da terra (SHEPHERD E WALSH, 2002).

Observa-se que novas técnicas têm sido estudadas, e conseqüentemente algumas começam a despontar. Dentre elas, o sensoriamento remoto (SR) mostrou-se promissor não só pela sua rapidez, mas também por ser uma técnica não destrutiva das amostras e livre de qualquer reagente químico (PALACIOS-ORUETA E USTIN, 1996; JANIK et al., 1998; REEVES et al., 1999; DUNN et al., 2002, BROWN et al., 2006; VISCARRA ROSSEL et al., 2006a), se diferenciando dos métodos tradicionais. O SR baseia-se na aquisição de informações de um objeto sem haver contato direto (LILLSAND E KIEFER, 1992) por meio de sensores instalados em laboratório, campo ou órbita. A energia eletromagnética, que funciona como um “agente” que interage com todos os componentes do solo, sendo que cada componente está intimamente ligado a um ou mais comprimentos de onda. Trata-se, portanto, de um processo físico.

Em estudo sobre a quantificação de atributos do solo a partir de técnicas de SR, vários autores vêm buscando respostas pelas análises de correlações entre atributos do solo e

reflectâncias espectrais (GALVÃO et al., 1997; DEMATTÊ E GARCIA, 1999; VISCARRA-ROSSEL et al., 2006a, VISCARRA-ROSSEL et al., 2006b). Da mesma forma, modelos de previsão de atributos dos solos têm apresentado elevado potencial (MORRA et al., 1991; BENDOR et al., 1997). Baseado nos conceitos entre reflectância e atributos dos solos determinados com sensores em laboratório, Coleman et al. (1991) obtiveram bons resultados na estimativa de argila. Chang et al. (2001) avaliaram a eficiência da espectroscopia de reflectância do infravermelho próximo para prever múltiplas propriedades do solo. Foram estimados valores de CTC, areia e silte com  $r^2 > 0,80$ , enquanto que  $K^+$ , argila e pH foram estimados com menor acurácia ( $0,50 < r^2 < 0,80$ ). Moron e Cozzolino (2003), utilizando esta mesma região do espectro eletromagnético, avaliaram o conteúdo de areia e argila em solos do Uruguai. Obtiveram na calibração, valores de  $r^2$  de 0,81, 0,83 e 0,92 para frações de areia, silte e argila respectivamente. Lee et al. (2003), avaliaram características espectrais e químicas de propriedades de solos da Flórida e, os modelos contabilizaram para mais de 72% de variação observada no conjunto de validação para o pH, P, Ca e Mg dos solos, porém para menos de 50% de variação para K e MO. As técnicas utilizadas são altamente sensíveis a compostos orgânicos e inorgânicos do solo, tornando-se uma ferramenta potencialmente útil na avaliação e monitoramento do solo. Bogrekcı e Lee (2007) avaliaram as regiões espectrais do ultravioleta, infravermelho próximo e do visível na predição de fósforo em amostras de terra chegando à conclusão que a melhor região a ser utilizada na estimativa de teores de fósforo é a região do infravermelho próximo. Cohen et al (2007) demonstraram que a estimativa de atributos de solo através de técnicas de SR é possível e que o erro na estimativa é tão igual ou menor que o erro cometido por um laboratório de análise de solos tradicional.

Presente ao exposto fica evidente o fato da necessidade da avaliação da aplicação do uso de técnicas de SR em agricultura de precisão nas condições de solos brasileiros. Estas técnicas permitem prever vários atributos do solo simultaneamente. Para tanto, é necessário o conhecimento básico de como as alterações químicas afetam a energia eletromagnética refletida. Tendo em vista os transtornos causados pela aplicação inadequada de fertilizantes e da necessidade de redução do número de análises químicas de terra para a prática da AP, surge o enfoque deste estudo, o qual visa avaliar um método de detecção automática da variação de elementos químicos do solo. Desta forma, resultados rápidos e eficientes podem ser obtidos, diminuindo assim a custosas e demoradas análises químicas tradicionais.

Os objetivos do trabalho foram: (i) avaliar através de métodos convencionais de análise de terra e de SR, as variações químicas ocorrentes nos solos pela aplicação de corretivos com diferentes graus de reatividade, (ii) identificar bandas espectrais relacionadas com as mudanças químicas ocorridas no solo devido à aplicação de calcário (iii) calibrar e avaliar modelos de estimativa de atributos químicos do solo.

Sabe-se que todo elemento presente no solo altera a informação refletida em variadas proporções, sendo esta captada por um sensor. Desta forma, espera-se que a introdução do elemento cálcio e as alterações químicas correspondentes alterem o solo e por sua vez a energia refletida, permitindo sua quantificação.

## **4.2 Desenvolvimento**

### **4.2.1 Material e Métodos**

#### **4.2.1.1 Caracterização do experimento**

O experimento foi conduzido no município de Piracicaba, São Paulo, em casa de vegetação. O híbrido de milho utilizado foi o cultivar DOW 2B710, safra 2006/2006, obtido em Jardinópolis/SP (germinação: 85% e pureza mínima: 98%). Foram realizados quatro ciclos de cultivo, sendo o primeiro feito em maio de 2007, colocando-se oito sementes por vaso de 4 dm<sup>3</sup> e, após o estabelecimento das plântulas efetuou-se o desbaste, mantendo-se duas plantas por vaso durante 57 dias após a emergência. Paralelamente, foi realizado um experimento de incubação sem a cultura, no qual foi avaliado o efeito residual dos corretivos.

Os solos utilizados no ensaio foram o Latossolo Vermelho textura argilosa com 22 % de areia, 9 % de silte e 69 % de argila, coletado no Centro de Citricultura no município de Cordeirópolis, SP (22° 26' 59" S, 47° 24' 18" W), e o Neossolo Quartzarênico coletado no município de Luis Antônio, SP (21° 35' 09" S, 47° 04' 22" W), com 94 % de areia, 2% de silte e 4 % de argila (Embrapa, 2006). Estes solos foram coletados na camada arável (0-20 cm) e apresentavam, originalmente, as seguintes características químicas: pH (CaCl<sub>2</sub>) = 3,9; MO = 31 g dm<sup>-3</sup>; P = 3 mg dm<sup>-3</sup>; Ca = 7 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; Mg = 3 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; K = 0,6 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; H+AL = 88

mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; Al = 13 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; CTC = 98,6 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; V = 10,8 % no Latossolo Vermelho textura argilosa e, pH (CaCl<sub>2</sub>) = 4,1; MO = 12 g dm<sup>-3</sup>; P = 11 mg dm<sup>-3</sup>; Ca = 1 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; Mg = 1 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; K = 0,07 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; H+AL = 28 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; Al = 5 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; CTC = 30,07 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; V = 6,9 % no Neossolo Quartzarênico.

#### 4.2.1.2 Descrição dos tratamentos

Antes da semeadura do milho, as amostras de solos foram secas ao ar, destorroadas, passadas em peneira de malha de 4 mm e acondicionadas em vasos de 4 dm<sup>3</sup> de capacidade. Em seguida foi realizada a calagem com posterior incorporação do calcário apenas no primeiro ciclo da cultura. A adubação NPK foi aplicada nos quatro cultivos utilizando as mesmas doses em todos os tratamentos. Para a calagem foram utilizados três produtos comerciais, todos calcários dolomíticos, identificados como **A**, **B** e **C**, sendo produtos de média, baixa e alta reatividade, respectivamente (Tabela 4.1). As doses de calcário aplicadas foram calculadas para elevar a saturação por bases (V%) a 40%, 60% e 80%. Desta forma, aplicaram-se 1,68 g kg<sup>-1</sup>; 2,75 g kg<sup>-1</sup>; 3,87 g kg<sup>-1</sup> do calcário **A** no solo argiloso e 0,57 g kg<sup>-1</sup>, 0,9 g kg<sup>-1</sup> e 1,25 g kg<sup>-1</sup> no solo arenoso; 1,90 g kg<sup>-1</sup>, 3,19 g kg<sup>-1</sup>, 4,48 g kg<sup>-1</sup> do **B** em solo argiloso e 0,65 g kg<sup>-1</sup>, 1,05 g kg<sup>-1</sup> e 1,45 g kg<sup>-1</sup> em solo arenoso; 1,37 g kg<sup>-1</sup>, 2,31 g kg<sup>-1</sup>, 3,25 g kg<sup>-1</sup> de **C** em solo argiloso e 0,48 g kg<sup>-1</sup>, 0,76 g kg<sup>-1</sup> e 1,05 g kg<sup>-1</sup> em solo arenoso, além da testemunha, sem calcário.

Tabela 4.1 – Caracterização química dos calcários utilizados no experimento

Calcários	CaO	MgO	CaCO <sub>3</sub>	MgCO <sub>3</sub>	Sílica e Insolúveis	Tyler (Mesh) / Abertura (mm)			PRNT	PN	RE
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	10/2,0	20/0,8	50/0,3	(%)	(%)	(%)
<b>A</b>	30,77	20,92	55,09	51,88	3,99	99,72	91,43	73,0	88,29	104,44	85,72
<b>B</b>	28,89	17,18	51,71	42,62	14,83	99,82	91,44	67,94	76,21	91,03	83,72
<b>C</b>	32,54	18,90	58,26	46,86	2,14	100,00	99,98	97,77	105,26	106,21	99,10

Após trinta dias da calagem foram adicionados adubos minerais, sendo as doses calculadas conforme a necessidade da cultura. Para a adubação fosfatada, seguiu-se a recomendação de Malavolta (1980), com a aplicação de 200 mg kg<sup>-1</sup> de N e 200 mg kg<sup>-1</sup> de P. Na semeadura, aplicaram-se 0,84 g kg<sup>-1</sup> de superfosfato simples, 0,79 g kg<sup>-1</sup> de superfosfato triplo e 0,22 g kg<sup>-1</sup> de uréia (45 % N). Estes valores são equivalentes a 1,68 t ha<sup>-1</sup> de superfosfato simples, 1,58 t ha<sup>-1</sup>

de superfosfato triplo e  $0,44 \text{ t ha}^{-1}$  de uréia. O restante da dose de nitrogênio foi aplicado em cobertura, aos 25 e 40 dias após a emergência das plântulas (DAE), na forma de sulfato de amônio e uréia. O K foi aplicado na forma de KCl ( $0,38 \text{ g kg}^{-1}$  de KCl). Para a adubação com micronutrientes foram aplicados em solução,  $10 \text{ mg kg}^{-1}$  de  $\text{MnSO}_4\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{ZnSO}_4(7\text{H}_2\text{O})$  e  $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2(6\text{H}_2\text{O})$ ;  $5 \text{ mg kg}^{-1}$  de  $\text{H}_3\text{BO}_3$  e  $\text{CuSO}_4(5\text{H}_2\text{O})$ ; e  $1 \text{ mg kg}^{-1}$  de  $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}(4\text{H}_2\text{O})$ .

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, com quatro repetições. Os tratamentos tiveram dois solos, três doses além da testemunha e três fontes de calcário, totalizando 80 vasos. Aos 57 dias após emergência, as plantas foram colhidas no pico de acúmulo de biomassa e secas em estufa até atingirem massa constante. Foi efetuada a pesagem para determinação da produção de matéria seca de folhas e colmos.

No experimento de incubação foram utilizados 400 g de solo e as doses de calcário também foram calculadas baseadas na elevação da saturação por bases para 40, 60 e 80 %. O estudo decorreu durante 180 dias e a cada dois dias os solos foram umedecidos com água. Foram realizadas análises químicas para determinação dos teores de Ca e Mg trocáveis e residuais a cada 60 dias.

#### **4.2.1.3 Análises laboratoriais**

##### **4.2.1.3.1 Análises químicas**

Nas amostras de solo foram determinados o pH em  $\text{CaCl}_2$   $0,01 \text{ Mol L}^{-1}$ , C-orgânico (método colorimétrico), fósforo,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{K}^+$  [resina trocadora de íons (Raij B. et al., 1986)], alumínio ( $\text{KCl}$   $1 \text{ mol L}^{-1}$ ) e  $\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$  [Raij et al. (1987)].

A determinação do calcário residual no solo foi realizada de acordo com Quaggio et al. (1995). Em tubo percolador foram colocados  $10 \text{ cm}^3$  de solo, entre papéis-filtro, sendo posteriormente percolados 100 mL da solução de KCl pela amostra (primeira extração, Ca e Mg trocáveis). Após a primeira extração, o solo foi transferido para um erlenmeyer e adicionaram-se 30 mL de  $\text{H}_2\text{O}$  + 50 mL de  $\text{HCl}$   $0,8 \text{ mol.L}^{-1}$ . O conjunto foi fervido em chapa aquecedora por 5 minutos a  $200^\circ\text{C}$ . Dessa forma, mediante a fervura do solo, juntamente com a ação do HCl, o

corretivo remanescente foi forçado a reagir. Na seqüência, após resfriamento, o material foi filtrado (segunda extração, Ca e Mg residuais). A determinação de Ca e Mg nos extratos foi realizada no absorção atômica, diluindo as amostras com Lantânio.

#### **4.2.1.3.2 Obtenção de dados espectrais**

Os dados espectrais dos solos foram obtidos em laboratório com o espectrômetro FieldSpec Pro (Analytical Spectral Devices, Boulder, Colo.). É um espectrorradiômetro com fibra ótica com resolução espectral de 1 nm até 1100 nm e 2 nm até 2500 nm e ainda com capacidade de mais de 30 leituras por segundo (Apêndice C). Para a coleta dos dados de reflectância, as amostras foram preparadas por secagem em estufa à 45°C durante 24 horas (HENDERSON et.al, 1992) seguida de moagem e peneiramento em peneira de malha de 2 mm. Cada amostra corresponde à aproximadamente 15 cm<sup>3</sup> de solo que foram alocados em placa de petri para determinação da reflectância (Apêndice B). As amostras foram medidas em triplicata, promovendo o aumento da superfície do solo escaneada pelo sensor. O sensor foi colocado em posição vertical a 8 cm de distância da amostra, onde foi medida a luz refletida numa área aproximada de 2 cm<sup>2</sup> no centro da amostra. A fonte de iluminação utilizada foi uma lâmpada halógena de 50 W, com feixe não colimado para o plano visado, sendo posicionada a 35 cm da amostra e com um ângulo zenital de 30°. Foi utilizada como padrão de referência, uma placa cinza a qual reflete 50% de uma placa branca. Os dados espectrais desta placa foram armazenados pelo sistema para posterior determinação do *fator de reflectância* das amostras, o qual foi multiplicado pelas leituras obtidas de cada uma delas. No total, foram obtidas 277 leituras espectrais do solo argiloso e 276 do arenoso. Com tal fator em mãos, foram criadas representações gráficas, ou seja, curvas de reflectância espectral.

#### **4.2.1.4 Análise das informações**

As análises das informações espectrais e sua relação com os atributos químicos avaliados foram divididas em duas etapas: calibração e validação. Para atributos como P, MO e Al não foram obtidas equações com resultados satisfatórios, apresentando coeficientes de variação abaixo de



0,3 e valores de raiz quadrada do erro médio (parâmetros estatísticos comumente usados para avaliar técnicas de espectroscopia) bem acima daqueles verificados na literatura, o que prejudicaria a eficiência dos modelos de predição. Desta forma, na etapa de calibração foram gerados modelos multivariados de estimativa apenas para pH, Ca, Mg, SB, H+Al, CTC efetiva, CTC potencial e V% para o solo argiloso e, pH, Ca, SB, H+Al, CTC efetiva, CTC potencial, V% e K para o solo arenoso. Na segunda etapa foi realizada a validação dos modelos gerados.

#### 4.2.1.4.1 Fase de calibração

Através do programa estatístico ParLes versão 3.1 (VISCARRA ROSSEL, 2008), realizaram-se análises de estatística multivariada para atributos do solo juntamente com as informações espectrorradiométricas obtidas das mesmas amostras de terra. Para tal, foi utilizada a técnica de regressão pelo método de mínimos quadrados parciais (PLS) inserida neste programa. Sua utilização é comum em sensoriamento remoto e processamento de dados espectrais, uma vez que lida com grandes séries de dados altamente correlacionados com variáveis. Esta técnica é mais precisa que a de regressão linear múltipla já que o efeito de colinearidade dos dados do modelo pode ser reduzido com maior eficiência, além de levar em consideração toda a informação espectral. Foram também realizadas análises de componentes principais (PCA) para o conjunto de curvas espectrais dos solos argilosos e arenosos, a fim de identificar dados atípicos e possíveis agrupamentos de curvas por efeito das mudanças causadas pela cultura do milho. Logo, nem todas as amostras foram usadas nos modelos de calibração e validação, pois foram excluídos *outliers* que se encontravam fora da faixa da maioria das curvas espectrais, através da PCA (ISLAM et al, 2003). A determinação de *outliers* é um importante fator durante as fases de calibração e monitoramento dos modelos (WORKMAN, 1992).

Das 157 amostras iniciais (total inicial, excluídos *outliers*) do solo argiloso do primeiro experimento, foram selecionadas aleatoriamente 117 curvas espectrais junto com seus respectivos valores de pH, Ca, Mg, SB, H+Al, CTC efetiva, CTC potencial e V% , para posteriormente realizar a regressão (PLS) e a validação cruzada. O mesmo procedimento foi realizado para o solo arenoso, porém os atributos avaliados foram pH, Ca, SB, H+Al, CTC efetiva, CTC potencial, V% e K e, o número total de amostras iniciais foi de 156 (total inicial, excluídos *outliers*), sendo que deste total, 117 foram utilizadas para calibração dos modelos. No

experimento dois avaliaram-se cálcio e magnésio trocáveis e residuais. Como este segundo experimento decorreu durante três períodos, o total de amostras avaliado foi de 120 para cada tipo de solo, sendo que, deste total, 90 amostras foram utilizadas na calibração e o restante na validação dos modelos. As amostras utilizadas para calibração e validação dos modelos foram representativas de todos os tratamentos realizados neste experimento.

Todos os dados de reflectância foram pré-processados para remover possíveis erros e melhorar a estabilidade da regressão. Desta forma, foram normalizados pela opção encontrada no software ParLeS denominada centralização.

Os dados de reflectância de H+Al, CTC efetiva e CTC potencial do solo argiloso do primeiro experimento e,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , Ca e Mg residuais do segundo ensaio, além de H+Al do solo arenoso referente ao primeiro experimento e, Ca residual do segundo, tiveram suas curvas espectrais transformadas em função da eq. (1), com o objetivo de reduzir a não linearidade que por acaso possa existir no espectro.

$$\text{Log} \frac{1}{R} \quad (1)$$

Em que:

R = reflectância.

Para corrigir variações atípicas de espalhamento da luz, foi feita uma correção multiplicativa de sinal (MSC) para as curvas espectrais quando os atributos avaliados foram Ca, Mg, SB e V% para o solo argiloso e, pH, Ca, SB, para o arenoso no primeiro experimento.

Foi realizada a validação cruzada (calibração dos valores obtidos das análises químicas convencionais versus as predições feitas pelo modelo) a fim de se obter um número de componentes para gerar um modelo com maiores coeficientes de determinação ( $R^2$ ), menores valores da raiz quadrada do erro médio (RMSE) e maiores valores de desvio padrão do erro (RPD), descritos pelas eq. (2) e eq. (3).

$$RPD = \frac{sd}{SEP} \quad (2)$$

Em que:

sd = taxa do desvio padrão dos dados analisados;

SEP = erro padrão da predição.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n-m} (\hat{\gamma}_i - \gamma_i)^2}{n-m}} \quad (3)$$

Em que:

n = número de amostras;

m = número de amostras usadas para predição;

$\hat{\gamma}_i - \gamma_i$  = valores das propriedades do solo preditos e medidos, respectivamente.

Estes parâmetros estatísticos são comumente usados para avaliar técnicas de espectroscopia. Portanto, esta técnica foi utilizada para determinar a melhor correlação entre os dados químicos e espectrais referentes. Os modelos gerados são séries de coeficientes denominados “b”, que apresentam uma informação interpretável da composição, estrutura e concentração dos diversos atributos da amostra, e que pode ser usada para indicar as faixas ou regiões espectrais que melhor contribuem com as predições (MIN E LEE, 2005). Seu cálculo é descrito passo a passo pelas eq. (4, 5, 6, 7, 8 e 9). Para cada modelo gerado foi obtido um gráfico em função do comprimento de onda, com o objetivo de identificar feições de absorção ou reflexão dos atributos avaliados.

$$W_1 = c \cdot X_0 \cdot Y_0 \quad (4)$$

Em que:

$W_1$  = peso de cada região do espectro;

$X_0$  = matriz dos dados espectrais;

$Y_0$  = matriz do atributo a ser modelado;

c = fator escalar calculado conforme eq. (5).

$$c = (y_0^T \cdot X_0 \cdot X_0^T \cdot y_0)^{-0.5} \quad (5)$$

Os *scores* e *loadings* são calculados conforme eq. (6).

$$\hat{t}_1 = X_0 \cdot \hat{w}_1 \quad (6)$$

Em que:

$\hat{t}$  = matriz de uma coluna (*scores* da reflectância).

$$p_1 = \frac{(X_0^T \cdot \hat{t}_1)}{\hat{t}_1^T \cdot \hat{t}_1} \quad (7)$$

Em que:

$p_1$  = matriz de uma coluna (*loadings* de reflectância).

$$q_1 = \frac{y_0^T \cdot \hat{t}_1}{\hat{t}_1^T \cdot \hat{t}_1} \quad (8)$$

Em que:

$q_1$  = matriz de uma coluna e uma fila (*loadings* do atributo).

Desta forma, os coeficientes “b” de regressão podem ser calculados por:

$$b = W(P^T \cdot W)^{-1}q \quad (9)$$

#### 4.2.1.4.2 Fase de validação

Os modelos de regressão obtidos pelo método PLS para a estimativa de pH, Ca, Mg, SB, H+Al, CTC efetiva, CTC potencial e V% no solo argiloso e, pH, Ca, SB, H+Al, CTC efetiva, CTC potencial, V% e K no solo arenoso do primeiro experimento, foram testados aplicando-os as 40 amostras restantes das 157 iniciais, correspondentes ao solo argiloso e, 39 restantes do solo arenoso. O mesmo foi feito com as 30 amostras restantes do ensaio de incubação para cada tipo de solo. A fim de representar o desempenho real de cada modelo sobre cada tipo de solo na predição dos atributos avaliados, foi feita uma validação cruzada. Este é um método onde cada amostra da calibração é predita a fim de estimar com acurácia a predição e, geralmente fornece uma idéia mais otimista do desempenho do modelo (DARDENNE et al., 2000).

Determinar quais os valores dos parâmetros  $R^2$  e RMSE que constituem um modelo adequado é subjetivo, da mesma forma que há dificuldades em se comparar resultados de diferentes calibrações (DUNN et al., 2002). No entanto, Saeys et al. (2005) estabeleceram que valores de  $R^2$  entre 0,50 e 0,65 indicam a possibilidade de discriminação das altas e baixas concentrações no modelo, enquanto que, valores de  $R^2$  de aproximadamente 0,66 a 0,81, de 0,82 a 0,90 e acima de 0,90 indicam modelos quantitativos de predição de atributos químicos do solo aceitáveis, bons e excelentes respectivamente. Dunn et al. (2002) e Chang et al. (2001) sugerem que valores de RPD menores que 1,5 sejam considerados insuficientes para a maioria das aplicações, enquanto que modelos com valores maiores que 2,0 sejam considerados excelentes. Já modelos com valores de RPD entre 1,5 e 2,0 são julgados úteis em relação à acurácia das predições. Segundo Williams (1987), valores de RPD são muito utilizados para comparar resultados de um conjunto de dados que possui graus de variabilidade diferentes e que, quanto maior o valor de RPD, mais confiável é o modelo de predição. As predições das propriedades dos solos consideradas aceitáveis podem ser melhoradas com a utilização de diferentes estratégias de calibração, enquanto que aquelas que separam apenas baixas de altas concentrações, não devem ser confiantemente preditas com o uso de regiões entre 400 a 2500 nm do espectro eletromagnético (CHANG et al., 2001). Com base nos trabalhos de Saeys et al (2005), Chang et al. (2001) e Dunn et al. (2002) foram analisados os resultados obtidos neste trabalho.

#### **4.2.2 Resultados e Discussão**

#### 4.2.2.1 Análises de componentes principais

A análise de componentes principais (PCA) foi aplicada a fim de visualizar as variações espectrais e agrupar a população semelhante. A PCA dos dados espectrais dos dois solos avaliados indicou que as curvas espectrais foram diferentes entre os quatro ciclos de cultivo do milho (Figuras 4.1 e 4.2), sendo mais bem agrupadas no solo arenoso, uma vez que a separação destas curvas foi explicada pelas componentes 1 e 2. Levando-se em conta que, a PC1 representa a maior parte do albedo (GALVÃO et al., 1995; SALDANHA et al., 2004) e este está relacionado com a textura do solo (Demattê, 2002). Portanto, o solo de textura arenosa, com mineralogia predominantemente constituída de quartzo e feldspato, com elevados teores de  $\text{SiO}_2$ , possuem seus espectros com elevadas intensidades de reflectância. Isso indica que nos solos arenosos, aproximadamente 51,79 % (PC1) da variabilidade dos dados, foram devidos às variações nas intensidades de reflectância das curvas dos diversos tratamentos e ciclos.

No caso do solo de textura argilosa, a separação entre as curvas dos diferentes ciclos foi possível com o uso das componentes 3 e 4, ou seja, os cultivos sucessivos não causaram mudanças no albedo das curvas, uma vez que a PC1 não forneceu informações suficientes para diferenciá-los. Desta forma, as mudanças das curvas espectrais ocorreram em regiões mais específicas do espectro, sendo que para a identificação das mudanças espectrais neste solo, as informações foram fornecidas pelas PC3 e PC4.

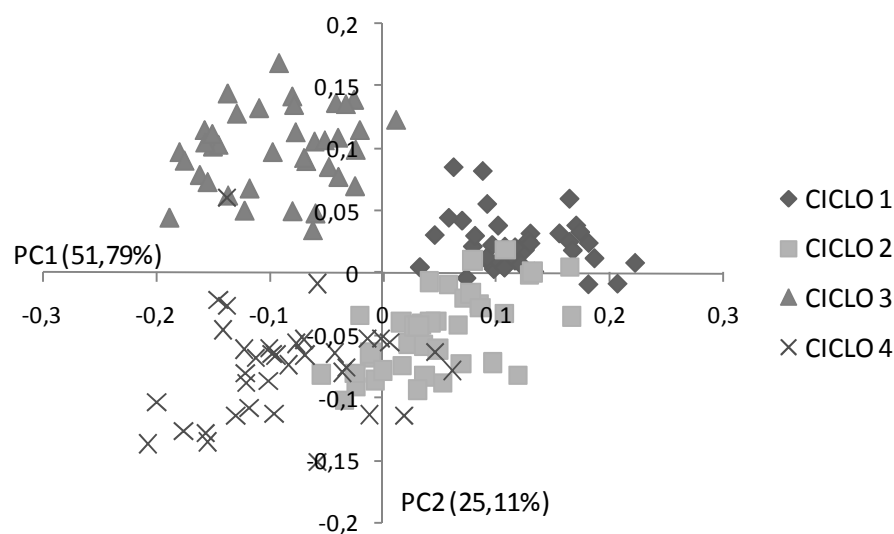


Figura 4.1 – Análise de componentes principais dos dados espectrais das amostras do Neossolo Quartzarênico

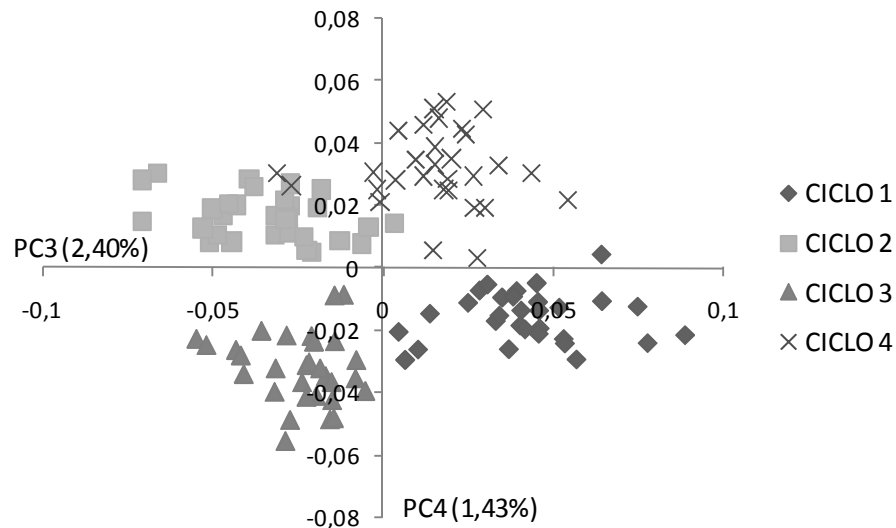


Figura 4.2 – Análise de componentes principais dos dados espectrais das amostras do Latossolo Vermelho textura argilosa

Levando-se em consideração que a calagem foi realizada apenas uma vez, antes do primeiro cultivo, e por isso os solos tiveram seus teores de cálcio e magnésio reduzidos ao longo dos quatro ciclos, é importante indicar que a extração de nutrientes pelas plantas, provocou mudanças nas curvas espectrais dos solos. Portanto, com as mudanças nos teores dos atributos químicos do solo provocadas pela calagem e pela cultura, ocorreram também mudanças na reflectância dos solos. Através dos gráficos gerados foi possível identificar dados atípicos das curvas denominados *outliers*, que foram excluídos do conjunto total das informações espectrais, a fim de se obter melhores resultados nas fases de calibração e validação dos modelos. Já quando foram avaliados simultaneamente os dados espectrais dos dois experimentos não houve uma separação clara entre aquele com a planta presente e o ensaio de incubação para os dois solos estudados (Figura 4.3), mesmo quando observadas as componentes principais três e quatro. Porém, foi possível agrupar os dados de reflectância de acordo com o tipo de solo do experimento de incubação, assim como a separação dos três períodos avaliados no solo arenoso (Figura 4.4). De uma maneira geral, solos de textura arenosa tendem a ter maior reflectância, devido à sua constituição mineralógica (rica em quartzo) e ao fato de geralmente apresentarem baixos teores de matéria orgânica, óxidos de ferro e menores teores de água (DALMOLIN et al., 2005).

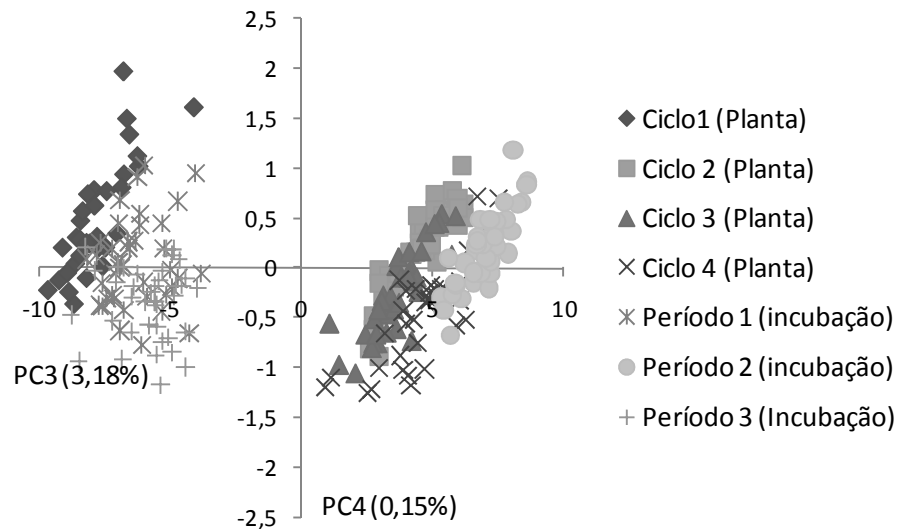


Figura 4.3 – Análise de componentes principais dos dados espectrais das amostras do Latossolo Vermelho textura argilosa

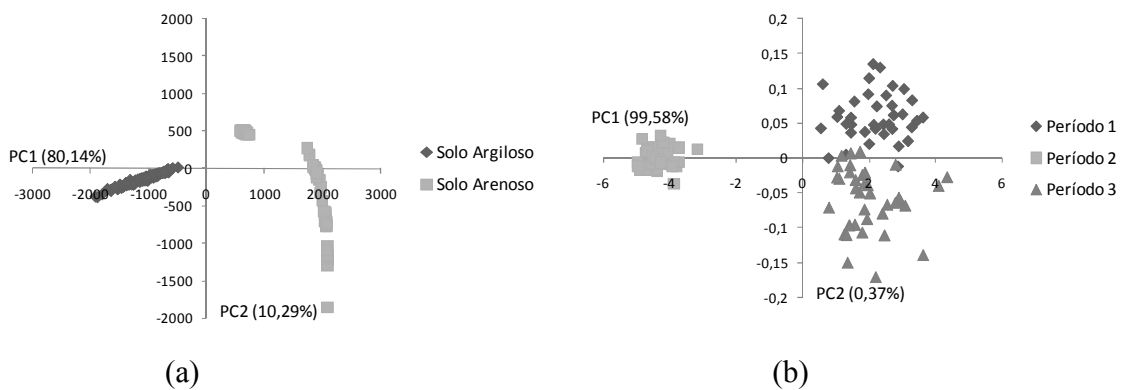


Figura 4.4 - Análise de componentes principais dos dados espectrais das amostras dos solos argiloso e arenoso (a) e arenoso (b)

Foi avaliada a cor dos solos de todos os tratamentos através de um colorímetro quantitativo, a fim de verificar mudanças causadas pelas diferentes doses de corretivos e tempo de aplicação. No entanto, não houve variação.

#### 4.2.2.2 Calibração dos modelos de predição



A capacidade da espectroscopia de reflectância prever as propriedades químicas dos solos estudados no experimento com planta está resumida na Tabela 4.2. São dados os fatores PLS; os valores do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) entre os valores preditos e observados, que fornecem uma medida comum da redução da variância; a raiz quadrada do erro médio (RMSE) e desvio padrão do erro (RPD), que fornece uma medida do modelo de ajuste que pode ser comparado através dos atributos do solo.

Para as características químicas avaliadas, os melhores resultados da calibração foram encontrados no solo de textura arenosa, que obtiveram menores valores de RMSE e maiores  $R^2$ , além de fazerem uso de um menor número de variáveis latentes ou fatores PLS para descrever a variação das curvas espectrais em relação à variação dos atributos (Tabela 4.2). Além disso, os modelos de calibração obtidos para o solo arenoso, alcançaram valores de RPD maiores que 2, sendo considerados excelentes (DUNN et al., 2002; CHANG et al., 2001).

Os modelos gerados para a CTCe deste solo, indicam apenas a possibilidade de discriminação de baixas e altas concentrações (SAYES et al., 2005). No entanto, modelos de calibração aceitáveis ( $0,66 < R^2 < 0,81$ ) a úteis ( $1,5 < RPD < 2,0$ ) e excelentes ( $RPD > 2,0$ ) para o Ca, SB, H+Al, CTC potencial, pH e V foram encontrados, discordando de Jung La et al. (2008), que concluíram que as reflectâncias obtidas nas regiões do visível e infravermelho próximo, podem não estimar com sucesso as propriedades químicas do solo, como é o caso do pH, cujas variações são devido à adição de fertilizantes químicos. Porém, esta observação foi suportada por Lee et al. (2007), que encontraram modelos com boa acurácia para estimativa de pH ao longo de um perfil, enquanto que estes valores medidos em superfície não foram considerados bons. Islam et al. (2003) em um experimento com diferentes solos de regiões agricultáveis da Austrália, obtiveram resultados semelhantes na calibração de modelos para pH ( $R^2 = 0,73$ ;  $RPD = 1,8$ ), CTC ( $R^2 = 0,75$ ;  $RPD = 1,6$ ) e Ca ( $R^2 = 0,70$ ;  $RPD = 1,7$ ). No Neossolo Quartzarênico deste experimento, o modelo obtido para o K teve um  $R^2$  igual a 0,85 e RMSE de 0,73, com a utilização de apenas 8 fatores PLS (Tabela 4.3), discordando dos resultados obtidos por autores como Islam et al. (2003) que observaram valores de  $R^2$  de 0,29. Chan et al. (2001), Malley et al. (2002), Shepherd e Walsh (2002) e Chodak et al. (2004) também observaram previsões pouco significativas para K, Na e P.

Para o solo argiloso, os modelos gerados de Mg, H+Al, pH e V não foram satisfatórios (Tabela 4.2), havendo apenas a possibilidade de discriminar as baixas das altas concentrações

(SAYS et al., 2005). No caso do Mg, a explicação para o resultado regular pode estar nas baixas concentrações encontradas no solo, concordando com Kim (2006) que obteve resultados não satisfatórios quando mediu baixas concentrações de nutrientes no solo, sofrendo ainda influência dos efeitos significativos do tipo e cor do mesmo. Já os modelos de calibração para Ca, SB, CTCe e CTC a pH 7 foram considerados aceitáveis e úteis, embora com valores de RMSE bem maiores que dos arenosos.

No experimento de incubação, foram avaliados os teores de cálcio residual ( $R^2 = 0,42$ ; RMSE = 7,74; RPD = 1,28), cálcio trocável ( $R^2 = 0,57$ ; RMSE = 4,23; RPD = 1,13), magnésio residual ( $R^2 = 0,24$ ; RMSE = 8,13; RPD = 1,0), e magnésio trocável ( $R^2 = 0,56$ ; RMSE = 3,02; RPD = 1,32), para o solo argiloso. Para o solo de textura arenosa os valores obtidos para os atributos avaliados foram: cálcio residual ( $R^2 = 0,41$ ; RMSE = 6,25; RPD = 1,28), cálcio trocável ( $R^2 = 0,63$ ; RMSE = 2,25; RPD = 1,20), magnésio residual ( $R^2 = 0,33$ ; RMSE = 3,85; RPD = 1,24), magnésio trocável ( $R^2 = 0,51$ ; RMSE = 2,08; RPD = 1,41). Nota-se que nas predições para cálcio e magnésio residuais, os valores de  $R^2$  foram menores que 0,5 e os do RMSE foram muito elevados, em se tratando de pequenas quantidades de solo e conseqüentemente baixas concentrações. Isto pode ser explicado pelo fato de que ainda faltam estudos para validação do método de análise química dos teores de cálcio e magnésio não trocáveis no solo, ou seja, na estimativa do calcário residual (SORATTO et al., 2008). Desta forma, não será discutido a validação de modelos para estes atributos.

Tabela 4.2 – Resultados da calibração das variáveis avaliadas nos solos usando a regressão por mínimos quadrados parciais (PLS)

<b>Atributos químicos</b>	<b>Fatores PLS</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>RMSE</b>	<b>RPD</b>
<b><i>Solo textura argilosa</i></b>				
Ca (mmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup> )	10	0,74	8,12	1,84
Mg (mmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup> )	11	0,45	4,56	1,26
SB (mmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup> )	12	0,69	11,70	1,72
H + Al (mmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup> )	11	0,63	13,29	1,57
CTCe (mmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup> )	11	0,68	11,37	1,50
CTCpH7 (mmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup> )	9	0,71	11,20	1,84
pH	10	0,58	0,30	1,43
V (%)	10	0,62	10,90	1,59
<b><i>Solo textura arenosa</i></b>				
Ca (mmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup> )	10	0,74	2,74	1,73
K (mmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup> )	8	0,85	0,73	2,50
SB (mmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup> )	10	0,81	3,30	2,09
H + Al (mmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup> )	6	0,71	1,48	1,69
CTCe (mmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup> )	8	0,62	4,91	1,47
CTCpH7 (mmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup> )	10	0,75	3,60	2,00
pH	9	0,77	0,18	2,07
V (%)	10	0,77	6,01	2,07

R<sup>2</sup>: coeficiente de determinação; Fatores PLS: variáveis latentes; RMSE: raiz quadrada do erro médio; RPD: desvio padrão do erro

Avaliações dos espectros têm sido utilizadas para identificar relações entre comprimentos de onda e características específicas das amostras (MARTENS E NAES, 1989). Trabalhos como o de Thomasson et al. (2001) e Dunn et al. (2002) indicam que a energia eletromagnética, quando estudada de maneira pormenorizada pelas bandas, pode detectar as variações dos elementos trocáveis, como potássio e alumínio. Zornoza et al. (2008) avaliaram bandas relacionadas a algumas propriedades biológicas de solos do Mediterrâneo nas regiões do visível, infravermelho próximo e infravermelho médio. No entanto, ainda são poucos os trabalhos que discutem este assunto, uma vez que é difícil associar picos de absorvância e reflectância com características químicas e físicas do solo. Ainda assim, estes picos contribuem para estabelecer uma relação entre padrões espectrais e fatores que tenha influência sobre concentrações de nutrientes dos

solos. Para tanto, neste trabalho, foram avaliados os valores dos coeficientes “b” em função dos comprimentos de onda, a fim de indicar quais faixas espectrais têm maior peso no modelo para estimativa de cada atributo estudado (Figuras 4.5 e 4.6), onde  $b_0$  corresponde a um fator de correção (eq. 10)

$$b_0 = y - X^T b \quad (10)$$

Em que:

$y$  = matriz do atributo;

$X^T$  = matriz transposta dos dados espectrais;

$b$  = coeficiente “b” (eq. 9)

Para o solo de textura argilosa, o espectro dos coeficientes “b” do modelo de estimativa do Ca indicou as faixas espectrais de 400 – 700 nm, 1000 – 1350 nm e 1900 – 2400 nm (Figura 4.5). Logo, espera-se que as variações de Ca estejam relacionadas com mudanças de reflectância nestas faixas, concordando com Pirie et al. (2005), que observaram bons coeficientes de correlação ( $R = 0,69$ ) para este elemento em 1910 nm. As faixas espectrais de 400 – 700 nm, 900 – 1100 nm e 2350 - 2500 apresentaram relação com os teores de Mg (Figura 4.5), diferentemente de Pirie et al. (2005), que ao avaliar várias regiões do espectro (ultravioleta, visível, infravermelho próximo e infravermelho médio), encontraram na banda de 2985 nm a melhor correlação para este atributo. A diferença entre as faixas de resposta espectral do Mg em relação ao Ca foi observada principalmente na faixa entre 2200 – 2500 nm, onde há maior absorbância do Ca (Figura 4.5). Isso indica a possibilidade de algumas bases trocáveis do solo induzir variações em faixas espectrais semelhantes. De modo geral, as bandas do Ca atingiram picos de absorbância e reflectância maiores que as do Mg (Figura 4.5).

Os espectros do coeficiente “b” dos modelos de estimativa do V % deste solo indicaram picos de reflectância nas faixas de 400 – 600 nm, 900 – 1100 nm e 2000 – 2400 nm (Figura 4.5). Enquanto que para SB, o pico de absorção ocorreu em torno de 2200 – 2500 nm e de reflexão em 500 – 700 nm. Já para pH, as bandas relacionadas foram de 400 – 600 nm, 1800 e 2200– 2400 nm (Figura 4.5), discordando de Pirie et al. (2005), que ao avaliar diversos atributos do solo, com a utilização da reflectância difusa nas regiões do ultravioleta, infravermelho próximo e

infravermelho médio, observaram que as bandas 1905 e 6097 nm, correspondiam aos maiores coeficientes de correlação para o pH.

As informações espectrais obtidas para a CTCe, CTC potencial e H+Al, foram transformadas de reflectância para absorbância segundo a eq. (1), o que possibilitou a obtenção de melhores modelos de estimativa. Neste caso, as faixas espectrais mais bem relacionadas com a CTCe foram 500 – 650 nm, 900 – 1000 nm, 1650 -1850 nm e 2200 – 2500 nm (Figura 4.5). Para CTC a pH 7, as faixas que representaram maior peso no modelo de estimativa deste atributo foram 400 – 500 nm, 1400 nm, 1800- 2000 nm e 2350 – 2500 nm, concordando com resultados obtidos por Lee et al. (2007). Os resultados obtidos no solo argiloso para H + Al, indicam que as bandas entre 2350 – 2500 nm e 400 – 500 nm estão mais relacionadas com o modelo de estimativa do atributo. Na avaliação destes dois últimos atributos (CTC e H + Al), os picos de reflectância foram maiores que os de absorbância (Figura 4.5).

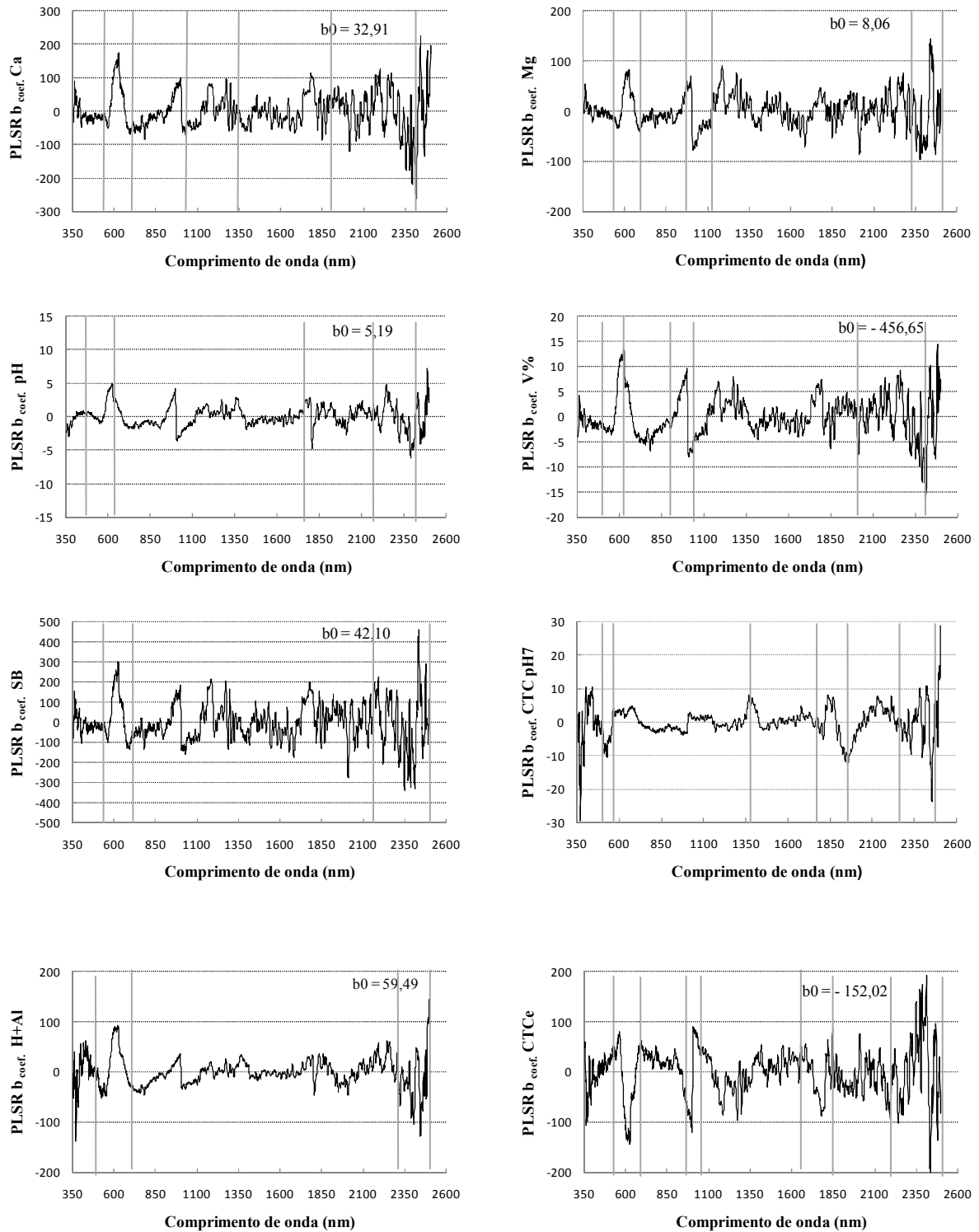


Figura 4.5 – Representação gráfica dos espectros dos coeficientes “b” dos modelos de estimativa dos atributos avaliados no solo de textura argilosa;  $b_0$  refere-se ao fator de correção da equação de estimativa do atributo químico; PLSR  $b_{coef}$  refere-se ao coeficiente da calibração por mínimos quadrados parciais

No solo arenoso, os espectros dos coeficientes “b” tiveram menores ruídos. Isto se deve ao fato de que menores fatores PLS foram utilizados para a estimativa dos atributos e, portanto, menos ruído foi incluído no espectro (ZORNOSA et al., 2008). O espectro dos coeficientes “b” do modelo de estimativa de Ca indicou que a região em torno de 1900 nm (Figura 4.6) possui boa correlação com a concentração deste elemento, concordando com Pirie et al. (2005). Para o K a faixa indicada foi 1800 – 2200 nm (Figura 4.6). Ao comparar estas bases trocáveis, observaram-se semelhanças nas faixas 1850 – 1950 nm e 1350 nm, sendo que o Ca obteve maiores picos de reflectância (1850 – 1950 nm) e, diferenças na faixa 1700 – 1800 nm e 1400 nm. O comportamento do espectro da SB foi semelhante ao do Ca. Para os modelos de estimativa de pH e V% , seus espectros de coeficiente “b” obtiveram picos de reflectância e absorbância entre 1800 e 2400 nm, com maiores intensidades no V%. Para a CTCe, as faixas destacadas foram 400 – 500 nm, 800 – 900 nm, 1400 nm, 1850 – 2400 nm, enquanto que para a CTC potencial foi 1850 – 2000 nm e 2350 - 2500 nm (Figura 4.6), com picos semelhantes aos obtidos com solo argiloso, discordando dos resultados obtidos por Lee et al. (2007), o qual as bandas que promoveram mais informações para a CTC potencial foram 470 – 600 nm, 965 nm e 1750- 2330 nm. No caso do H+Al, foi realizado a transformação de reflectância para a absorbância segundo a eq. (1). As intensidades de reflectância e absorbância foram baixas quando comparadas com SB, CTCe, CTC potencial e V%. O maior pico encontrado foi na faixa 1850 – 2000 nm.

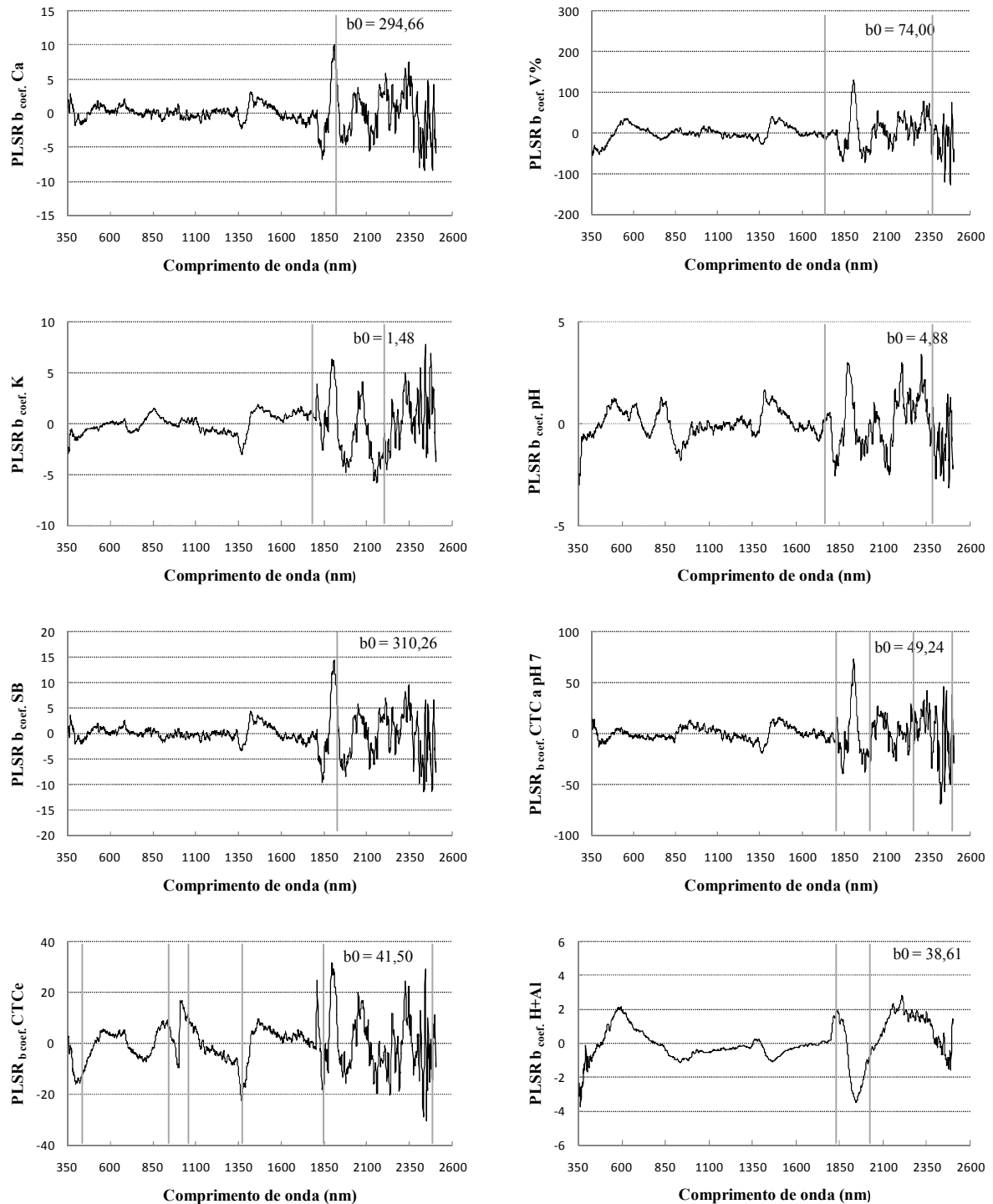


Figura 4.6 – Representação gráfica dos espectros dos coeficientes “b” dos modelos de estimativa dos atributos avaliados no solo de textura arenosa;  $b_0$  refere-se ao fator de correção da equação de estimativa do atributo químico;  $PLSR\ b_{coef}$  refere-se ao coeficiente da calibração por mínimos quadrados parciais



#### 4.2.2.3 Validação dos modelos

No solo de textura argilosa, os modelos calibrados para a estimativa de Mg, V% e pH não apresentaram um bom desempenho na fase de validação, com coeficientes de regressão em torno de 0,50 (Figura 4.7), mais baixos do que os verificados por Dunn et al. (2002) com 0,8 para pH; Malley et al. (1999) com 0,90 e 0,66 para Mg e pH, respectivamente; Genú (2002) com 0,77 para V%; Pirie et al. (2005) com  $R^2$  de 0,71 para pH. Porém, estes resultados foram semelhantes aos encontrados por Chang et al. (2001) com  $R^2$  igual a 0,56 e RPD de 1,47 para pH e Demattê e Garcia (1999b) com coeficientes de determinação menores que 0,50 para V%. As diferenças observadas entre os resultados obtidos para pH neste trabalho e os demais citados na literatura podem estar relacionadas à utilização da região do infra vermelho médio nos últimos. Isto reforça as observações de Zornoza et al. (2008), que afirmam que esta propriedade não possui uma resposta primária na região do infravermelho próximo.

Para Ca e SB, obtiveram-se valores de  $R^2$  de 0,64 e 0,65 respectivamente e valores de RDP de 1,48 para o Ca e 1,59 para SB (Figura 4.7). Outros autores verificaram valores semelhantes de coeficientes de determinação aos aqui observados como Pirie et al (2005) e Thomasson et al. (2001) com 0,64 e 0,63 para Ca, respectivamente. Para H+Al, os valores encontrados foram de 0,65 para  $R^2$  e 1,45 para RPD. Estes valores são considerados aceitáveis.

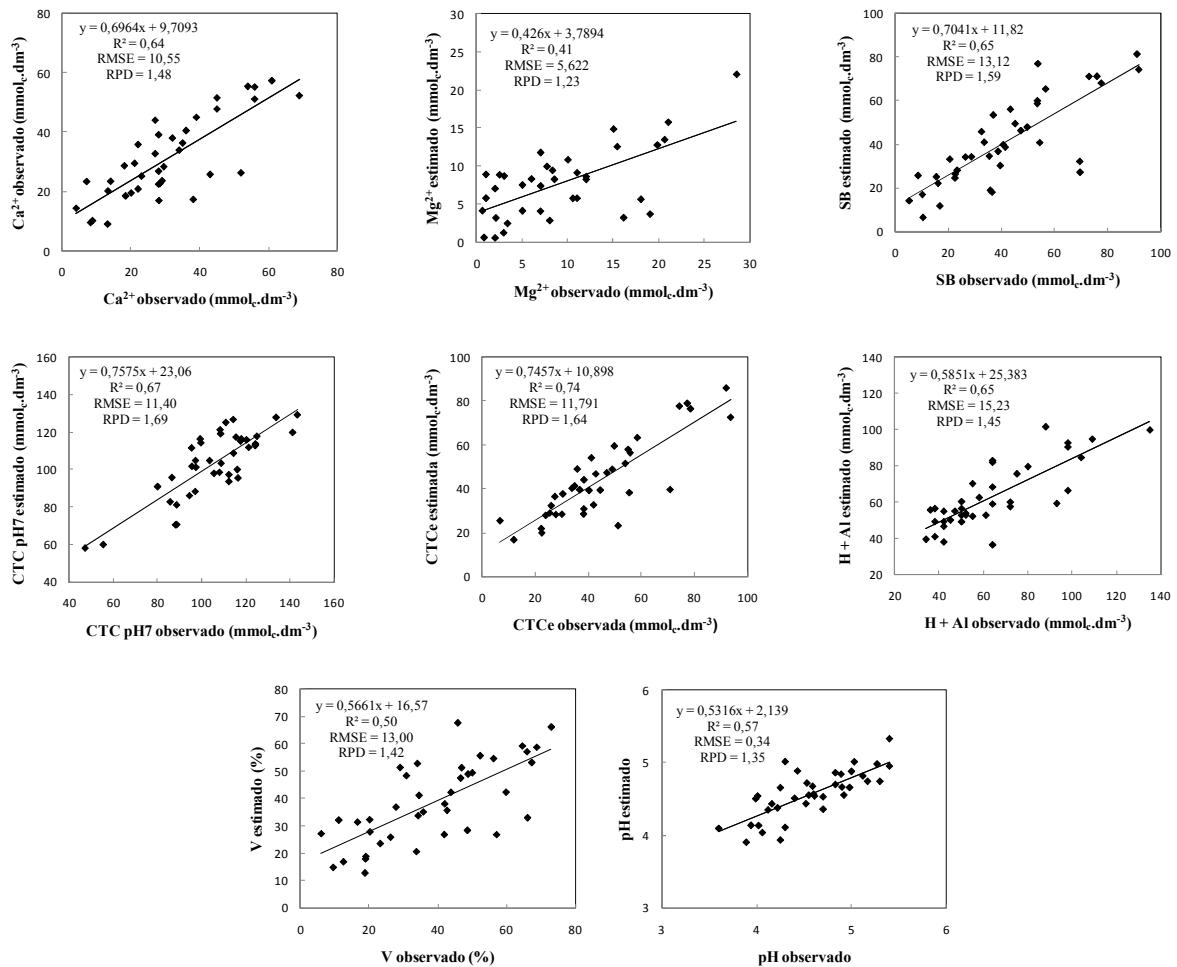


Figura 4.7 – Validação cruzada para avaliação do modelo PLSR da estimativa dos atributos avaliados no solo argiloso ;  $R^2$ : coeficiente de determinação; RMSE: raiz quadrada do erro médio; RPD: desvio padrão do erro

Os resultados obtidos para o solo de textura arenosa foram melhores que o da argilosa, com valores de  $R^2$  entre 0,78 e 0,91 para os atributos avaliados, atingindo valores de RPD acima de 2,0 (Figura 4.8). Isto pode ser explicado pelo fato deste solo sofrer menor influência da matéria orgânica e da presença de óxidos. Segundo Zornoza et al. (2008), propriedades do solo como CTC, Ca e Mg são principalmente controladas pela argila e pelo tipo e conteúdo de matéria orgânica, que possuem grupos funcionais com cargas variáveis responsáveis pela adsorção de diferentes cátions e água.

O modelo de estimativa do K, no entanto, foi o que apresentou maiores valores de  $R^2$  e RPD com 0,91 e 3,16 respectivamente, além de apresentar baixo RMSE (Figura 4.8). Para o

modelo de Ca, os valores de  $R^2$  e RPD foram de 0,78 e 2,26. Tal resultado corrobora aquele obtido por Zornoza et al. (2008) e é melhor do que aqueles encontrados por Pirie et al. (2005) com  $R^2$  de 0,69 (RPD = 1,8), Thomasson et al. (2001) com  $R^2$  de 0,63 e Islam et al. (2003), que encontraram valores de  $R^2$  para o Ca de 0,67 (RPD = 1,70). Entretanto, Demattê e Garcia (1999b) obtiveram valores menores que 0,4 para Ca e K, enquanto Malley et al. (1999) apresentaram  $R^2$  maiores que 0,9 também para estes nutrientes. As diferenças observadas entre os resultados obtidos neste trabalho e os demais citados na literatura podem estar relacionadas aos equipamentos utilizados que apresentam resoluções diferentes, com a seleção das melhores bandas para a elaboração dos modelos, como observado por Huete e Escadafal (1991).

Para SB, o presente trabalho mostrou valores de  $R^2$  de 0,84 (Figura 4.8). Este resultado foi melhor que aqueles encontrados por Chang et al. (2001) e Demattê e Garcia (1999), que obtiveram valores de coeficientes de determinação para SB de 0,75 e 0,71 respectivamente.

A CTC é um atributo determinado pela soma das bases trocáveis, H e Al. Muitos trabalhos de literatura vêm obtendo correlações razoáveis com a energia refletida. Portanto, a energia que incide sobre esses elementos que compõem a CTC, além dos macro e micro poros do solo e sua textura, reflete a capacidade de retenção cátions. No solo arenoso, a CTC foi baixa para a maioria das amostras de terra (na faixa de  $40 \text{ mmol}_c \cdot \text{dm}^{-3}$ ). Ou seja, mesmo com dados sem alta variação, a correlação foi adequada ( $R^2 = 0,79$ ; RPD = 2,09), indicando que o que compõe a CTC está influenciando diretamente na energia refletida. Chang et al. (2001) encontraram para a CTC valores de  $R^2$  em torno de 0,81, Demattê e Garcia (1999a) obtiveram 0,71, enquanto Nanni e Demattê (2006) observaram  $R^2$  de 0,91. Entretanto, Demattê e Garcia (1999b) encontraram coeficientes menores que 0,5 para CTC e SB.

Para o pH do solo arenoso, encontram-se coeficiente de regressão de 0,88, RPD de 2,81 e RMSE de 0,14 (Figura 4.8), considerado um valor excelente, concordando com resultados obtidos por Cohen et al. (2005), que obtiveram valores de  $R^2$ , RPD e RMSE iguais a 0,84, 2,39 e 0,36 respectivamente.

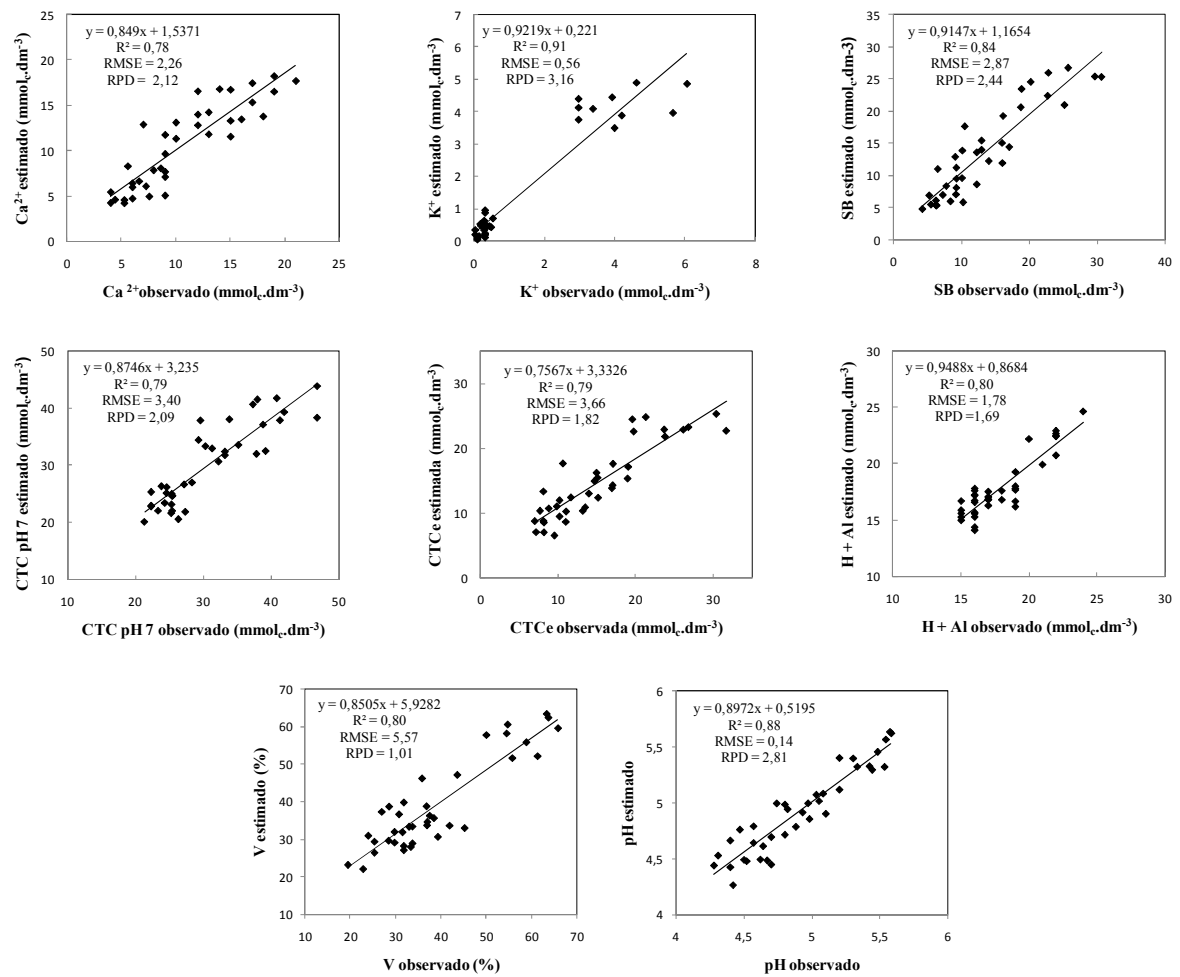


Figura 4.8 – Validação cruzada para avaliação do modelo PLSR da estimativa dos atributos avaliados no solo arenoso ;  $R^2$ : coeficiente de determinação; RMSE: raiz quadrada do erro médio; RPD: desvio padrão do erro

### 4.3 Conclusões

1 – É possível estimar CTC, V, SB, K, Ca e H+Al a partir da resposta espectral do solo para os referidos solos e modelos específicos, nas regiões do visível e infravermelho próximo.

2 – As variações de reflectância entre 1900 – 2000 nm são relacionadas com o Ca, assim como as faixas que melhor contribuíram para a predição da CTC potencial foram 1850 – 2000 nm e 2350 – 2500 nm. Para o pH as bandas que tiveram maior peso no modelo de estimativa foram de 1800 – 2400.

3 – A energia refletida pelo solo é influenciada pelos componentes da CTC.

4 – A metodologia utilizada tem potencial para auxiliar métodos convencionais de análise de solo. Além disso, análise de bandas específicas do espectro eletromagnético permite o desenvolvimento de novos sensores atuantes apenas nas faixas relacionadas a determinado atributo do solo.

### Referências

BEN-DOR, E.; INBAR, Y.; CHEN, Y. The reflectance spectra of organic matter in the visible near infrared and short wave infrared region (400-2500 nm) during a control decomposition process. **Remote Sensing Environment**, New York, v.61, p.1-15, 1997.

BEN-DOR, E.; LEVIN, N.; SINGER, A.; KARNIELI, A.; BRAUN, O.; KIDRON, G. Quantitative Mapping of the Soil Rubification Process on Sand Dunes Using an Airborne CASI Hyperspectral Sensor, **Geoderma**, Amsterdam, v.131, p. 1-21, 2006.

BOGREKCI, I.; LEE, W.S. Comparison of ultraviolet, visible, and near infrared sensing for soil phosphorus. **Biosystems Engineering**, Cambridge, v. 96, n.2, ,p. 293–299, 2007.

BROWN, D.J.; SHEPHERD, K. D.; WALSH, M.G.; MAYS, M.D.; REINSCH., T.G. Global soil characterization with VNIR diffuse reflectance spectroscopy. **Geoderma**,Amsterdam, v. 132, p.273-290, 2006.

BRULAND, G.L.; RICHARDSON, C.J.. A spatially-explicit investigation of phosphorus sorption and related soil properties in two riparian wetlands. **Journal Environmental Quality**, Stanford, v.33, p.785–794, 2004.

CAIRES ,E.F.; ALLEONI, L.R.F.; CAMBRI, M.A.;BARTH, G. Surface application of lime for crop grain production under a no-till system. **Agronomy Journal**, Madison, v. 97, p.791-798, 2005.

CAMARGO, O.A;RAIJ, B. van. Movimento do gesso em amostras de Latossolos com diferentes propriedades eletroquímicas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.13, p.275-280, 1987.

CAMARGO, A.O.; MONIZ, A.C.; JORGE, J.A.; VALADARES, J.M. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do IAC**. Campinas: Instituto Agrônômico, 1986. 94p. (IAC. Boletim Técnico, 106).

CHANG, C.W.; LAIRD, D.A.; MAUSBACH, M.J.; HURBURGH J.C.R.Near-infrared reflectance spectroscopy principal components regression analysis of soil properties. **Soil Science Society of America Journal**, Baltimore, v. 65, p. 480-490, 2001.

CHODAK, M. KHANNA, P. HORVARTH, B. BEESE, F. Near infrared spectroscopy for determination of total and exchangeable cations in geologically heterogeneous forest soils. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, New York, v.12, p.315-324, 2004.

COHEN, M.; MYLAVARAPU, R.S.; BOGREKCI, I.; LEE, W.S.; CLARK, M.W. Reflectance Spectroscopy for Routine Agronomic Soil Analyses. **Soil Science**, Baltimore, v.172, n.6, p.469-485, 2007.

COHEN, M.; PRENGER, J.P.; DEBRUSK, W.F. Visible-near infrared reflectance spectroscopy for rapid, non-destructive assesement of wetland soil quality. **Journal Environmental Quality**, Stanford, n.34, p.1422–1434, 2005

COLEMAN, T. L.; AGBU, P. A.; MONTGOMERY, O. L.; GAO, T.; PRASAD, S. Spectral band selection for quantifying selected properties in highly weathered soils. **Soil Science**, Baltimore, v.151, n.5, p.355-361, 1991.

DALAL, R.C.; HENRY, R.J. . Simultaneous determination of moisture, organic carbon and total nitrogen by near infrared reflectance spectrophotometry. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 50, p. 120-123, 1986.

DARDENNE, P.; SINNAEVE, G.; BAETEN, V. Multivariate calibration and chemometrics for near infrared spectroscopy: which method? **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, New York, v.8, n.4, 229-237, 2000.

DEMATTÊ, J.A.M.; GARCIA, G.J. Avaliação da atributos de Latossolo Bruno e de Terra Bruna Estruturada da região de Guarapuava, Paraná, por meio de sua energia refletida. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.23, p.343-355, 1999b.

DEMATTÊ, J. A. M.; CAMPOS, R. C.; ALVES, M. C. ; FIORIO, P. R. ; NANNI, M. R. Visible-NIR reflectance: a new approach on soil evaluation. **Geoderma**, Amsterdam, v. 121, n. 2004, p. 95-112, 2004.

DEMATTÊ, J.A.M.;GARCIA, G.J. Alteration of soil properties through a weathering sequence as evaluated by spectral reflectance. **Soil Science of America Journal**, Madison, v. 63, n. 2, p.327-342, Mar./Apr. 1999.

DUNN, B.W.; BEECHER, H.G.; BATTEN, G.D.; CIAVARELLA, S. The potencial of near-infrared reflectance spectroscopy for soil analysis – a case study from the Riverine Plain of south-eastern Australia. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, Melbourne, v.42, p.607-614, 2002.

EMBRAPA. **Manual de Métodos de Análise de Solos**. Rio de Janeiro: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 1997. 217p.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Rio de Janeiro: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2006. 306p.

FAGERIA, N.K.; STONE, L.F. **Manejo da acidez dos solos de cerrado e de várzea do Brasil**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 1999. 42 p. (EMBRAPA arroz e feijão. Documentos, 92).

FIORIO, P.R. Dados radiométricos obtidos nos níveis terrestre e orbital na avaliação de solo. Piracicaba, 2002. 198p. Tese (Doutorado na área de Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

GALVÃO, L.S.; VITORELLO, I.; FORMAGGIO, A.R. Relationships of spectral reflectance and color among surface and subsurface horizons of tropical soil profiles. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.61, p.24-33, 1997.

GENÚ, A.M. **Avaliação e quantificação de atributos do solo através de dados radiométricos obtidos em laboratório**. 2002. 64p. (Dissertação de Mestrado na área de Solos e Nutrição Mineral de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

HENDERSON, T.L.; BAUMGARDNER, M.F.; FRANZMEIER, D.P.; STOTT, D.E.; COSTER, D.C. High dimensional reflectance analysis of soil organic matter. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.56, p.865-872, 1992.

HUMMEL, J.W.; GAULTNEY, L.D.; SUDDUTH, K.A. Soil property sensing for site-specific management. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, n. 14, p.121-136, 1996.

ISLAM, K.; SINGH, B.; McBRATNEY, A. Simultaneous estimation of several properties by ultra-violet, visible, and near-infrared reflectance spectroscopy. **Australian Journal of Soil Research**, Sidney, v. 41, p. 1101-1114, 2003.

JANIK, L.J., MERRY, R.H., SKJEMSTAD, J.O. Can mid infrared diffuse reflectance analysis replace soil extractions. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, Melbourne, v. 38, p.681-96, 1998.

JANIK, L.; SKJEMSTAD, J.O. Characterization and analysis of soils using mid-infrared partial least squares: II. Correlations with some laboratory data. **Australian Journal of Soil Research**, Sidney, v.33, p.637-650, 1995.

KIM, H.J. **Ion-selective electrodes for simultaneous real-time analysis of soil macronutrients**. 2006. 215p. Dissertation ( PhD ) Columbia: University of Missouri, Biological Engineering Department. 2006.

LEE, K.S.; HOON LEE, D.; SUDDUTH, K.A.; CHUNG, S.O.; DRUMMOND, S.T. Wavelength Identification for Reflectance Estimation of surface and subsurface soil properties. ASAE, Minneapolis, Minnesota, 2007.

LEE, W.S.; SANCHEZ, T.F.; MYLAVARAPU, R.S.; CHOE, J.S. Estimating Chemical Properties of Florida Soils Using Spectral Reflectance. **American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v.46, n.5, p.1443-1453, 2003.

LISLEY, C.M.; BAUER, F.C. Test your soil for acidity. University of Illinois, Agricultural Experiment Station, 1929 (Circular, 346).

LILLESANDO, T.M.; KIEFER, R.W. **Remote sensing and image interpretation**. New York: John Wiley, 1992. 750 p.

MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1980. p.219-251: A avaliação do estado nutricional.

MALLEY, D.F.; YESMIM, I.; EDWARDS, W.D. Application of near-infrared spectroscopy in analysis of soil mineral nutrients. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.30, p. 999- 1012, 1999.

MALLEY, D.F.; YESMIN, L.; EILERS, RG. Rapid Analysis of hog manure and manure-amended soils using near-infrared spectroscopy. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.66, 1677-1686, 2002.

MATENS, H.; NAES, T. **Multivariate calibration by data compression**. Chichesters: John Wiley, 1987. 215p.

McBRATNEY, A.B.; SANTOS, M.L.M.; MINASNY, B. On digital soil mapping. **Geoderma**, Amsterdam, v. 117, p. 3–52, 2003.

McCARTY, G.W.; REEVES, J.B.; REEVES, V.B.; FOLLET, R.F.; KIMBLE, J.M. Mid-infrared and near-infrared diffuse reflectance spectroscopy for soil carbon measurement. **Soil Science of America Journal**, Madison, v.66, p.640-646, 2002.

MELLENDEZ-PASTOR, I.; NAVARRO-PREDENO, J.; GOMÉZ, I.; KOCH, M. Identifying optimal spectral bands to assess soil properties with VNIR radiometry in semi-arid soils. **Geoderma**, Amsterdam, doi:10.1016/j.geoderma.2008.08.004, 2008.

MIN, M.; LEE, W.S. Determination of significant wavelengths and prediction of nitrogen content for citrus. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 48, n.2, p.455-461, 2005.

MORON, A.; COZZOLINO, D. The potential of near-infrared reflectance spectroscopy to analyze soil chemical and physical characteristics. **Journal Agricultural Engineering**, New York, v.140,p. 65-71, 2003.

MORRA, M.J.; HALL, M.H.; FREEBORN, L.L. Carbon and nitrogen analysis of soil fractions using near-infrared reflectance spectroscopy. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 55, p.288-291, 1991.

NANNI, M.R. **Dados radiométricos obtidos em laboratório e no nível orbital na caracterização e mapeamento de solos**. 2000. 366p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, 2000.



NANNI, M.R.; DEMATTÊ, J.A.M. Spectral reflectance Methodology in Comparison to Traditional Soil Analysis. *Soil Science Society of America Journal*, **Madison**, v.70, p.393-407, 2006.

PAULINO, V.T.; MALAVOLTA, E.; COSTA, N.L. Resposta de *Nenotonia wightii* à calagem e aplicação de micronutrientes. **Pasturas Tropicales**, Cali, v.16, p.23-33, 1994.

PALACIOS-ORUETA, A.; USTIN, S. Multivariate statistical Classification of soil spectra. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 57, p. 108-118, 1996.

PARK, S. J.; VLEK, P. L. G. Environmental correlation of three-dimensional soil spatial variability: A comparison of three adaptive techniques. **Geoderma**, Amsterdam, v. 109, p.117-140, 2002.

PIRIE, A.; SINGH, B.; ISLAM, K. ultra-violet, visible, nearinfrared and midinfrared diffuse reflectance spectroscopic techniques to predict several soil properties. **Australia Journal of Soil Research**, Melbourne, v.43, p. 713-721, 2005.

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

RAIJ, B. van; QUAGGIO, J.A. **Métodos de análise de solo para fins de fertilidade**. Campinas: Instituto Agrônômico, 1983. 31 p. (IAC. Boletim Técnico, 81).

RAIJ, B. van.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M. C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agrônômico/Fundação IAC, 1996. 285p

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, M.C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agrônômico, 1997. 285p. (Boletim, 100)

RAIJ, B. van.; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. **Análise química para avaliação de solos tropicais**. Campinas: IAC, 2001. 285p.

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

REEVES, J.B.; McCARTY, G.W.; MEISINGER, J.J. Near infrared reflectance spectroscopy for the analysis of agricultural soils. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, New York, v.9, n.1, p. 25-34, 1999

SAYES, W.; MOUAZEN, A. M.; RAMON, H. Potential for onsite and online analysis of pig manure using visible and near infrared reflectance spectroscopy. **Biosystems Engineering**, Cambridge, v.91, p.393-402, 2005.

SEARCY, S.W.; SCHULLER, Y.H.; BAE, S.C.; BORGELT, S.C.; STOUT, B.A. Mapping of spatially-variable yield during grain combining. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.32, n.3, p.826-829, 1989.

SCHUELLER, J.K. O Estado-da-arte da agricultura de precisão nos Estados Unidos da América. In: BALASTREIRE, L.A.(Ed.). **O Estado-da-Arte da Agricultura de Precisão no Brasil**. Piracicaba, 2000. p. 8-16

SCHREIER, H. Quantitative predictions of chemical soil conditions from multi-spectral airborne, ground and laboratory measurements. In: CANADIAN SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING, 4., 1977. Ottawa. **Proceedings...** Ottawa: Canadian Aeronautics and Space Institute, 1977. p.106-112.

SCHRODER, W.; SCHMIDT, G.; PESCH, R. Spatial representativity and methodical comparability of data and sites of soil monitoring. **Journal Plant Nutrition Soil Science**, Tóquio, n.166, p.649–659, 2003.

SHEPHERD, K.D.; WALSH, M.G. Development of reflectance spectral libraries for characterization of soil properties. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.66, p.988-998, May-June 2002.

SILVEIRA, P. M.; ZIMMERMANN, F. J. P.; SILVA, S. C.da; CUNHA, A. A. da. Amostragem e variabilidade espacial de características químicas de um latossolo submetido a diferentes sistema de preparo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 10, p. 2057-2064, out. 2000.

STENBERG.B.; NORDKVIST, E.; SALOMONSSON, L. Use of near infrared reflectance spectra of soils for objective selection of samples. **Soil Science**, Baltimore, v. 159, p.109-114, 1995.

STENBERG, B., JONSSON, A.; BORJESSON, T. Near infrared technology for soil analysis with implications for precision agriculture. In: DVIES, A.M.C; CHO, R.K. (Ed.). In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON NEAR INFRARED SPECTROSCOPY, 10., 2002. Chichester. **Proceedings...** Chichester.:NIR Publications, 2002 . p. 279–284.

THOMASSON, J. A.; SUI, R.; COX, M. S.; Al-RAJEHY. Soil reflectance sensing for determining soil properties in precision agriculture. **ASAE**, St. Joseph, n. 44, p.1445-1453, 2001.

VAGEN, T.G. Remote sensing of complex land use change trajectories – a case study from the highlands of Madagascar. **Agriculture Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v.115, n.1/4 .p. 219–228,2006.

VAN ALPHEN, B.J.; STOORVOGEL, J.J. A functional approach to soil characterization in support of precision agriculture. **Soil Science Society of American Journal** , Madison, v.. 64, p.1706–1713, 2000.

VISCARRA ROSSEL, R.A.; McGLYNN, R.N.; McBRATNEY, A.B. Determining the composition of mineral-organic mixes using UV–vis-NIR diffuse reflectance spectroscopy, **Geoderma**, Amsterdam, n.137 , p. 70–82, 2006.

VISCARRA ROSSEL, R.A.; WALWORT, D.J.J.; McBRATNEY, A.B.; JANIK, L.J.; SKJESMSTAD, J.O. Visible near infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. **Geoderma**, Amsterdam, v.131, v.1/2, p.59-75, 2006.

VISCARRA-ROSSEL, R.A.; JEON, Y.S.; ODEH, I.O.A.; McBRATNEY, A.B. Using a legacy soil sample to develop a mid-IR spectral library. **Australian Journal of Soil Research**, Sidney, v.46, p. 1-16, 2008.

VISCARRA ROSSEL, R.A. ParLeS: Software for chemometric analysis of spectroscopic data. **Chemometrics Intelligent Laboratory. Systems**, Amsterdam, v.90, p.72-83, 2008.

WETTERLIND, J.; STENBERG, B.; SODERSTROM, M. The use of near infrared (NIR) spectroscopy to improve soil mapping at the farm scale. **Precision Agriculture**, New York, v.9, p.57–69, 2007.

WORKMAN, J. J. NIR spectroscopy calibrations basics. In: BURNS, D.A.; CIUREZAK, E.W. (Ed.) **Handbook of near infrared analysis**. New York:Edgard Blunger, 1992. p. 247-280.

ZORNOSA, R.; GUERRERO, C.; MATAIX-SOLERA, J.; SCOW, K.M; ARCENEGUI, V.; MATAIX-BENEYTO, J. Near infrared spectroscopy for determination of various physical, chemical and biochemical properties in Mediterranean soil. **Soil Biology & Biochemistry**, Madison, v.40, p.1923-1930, 2008.

## **5 APLICAÇÃO DE CORRETIVOS POR SENSORIAMENTO REMOTO ESPECTRAL COMO BASE A AGRICULTURA DE PRECISÃO**

### **Resumo**

Uma das áreas mais importantes na qual a Agricultura de Precisão tem sido aplicada comercialmente é no manejo da fertilidade do solo. Com isso, o objetivo deste trabalho foi prever o teor dos atributos químicos do solo relacionados ao cálculo da necessidade de calagem, a partir de sua resposta espectral obtida em laboratório (350 – 2500 nm), a fim de contribuir para o desenvolvimento de uma metodologia que venha automatizar este cálculo como apoio a agricultura de precisão. O experimento foi realizado em casa de vegetação. Os tratamentos, dispostos inteiramente ao acaso, com 4 repetições, constaram de 3 doses de calcário, calculadas para elevar a saturação por bases para 40, 60 e 80 %, além da testemunha. Foram realizadas análises dos solos determinando-se pH em  $\text{CaCl}_2$ , matéria orgânica, fósforo, cálcio, magnésio, potássio, alumínio, hidrogênio mais alumínio e posteriormente calcularam-se a CTC potencial e saturação por bases. Os dados espectrais foram obtidos durante todo o processo ao nível de solos, totalizando 320 amostras de terra. Ao final, os dados foram correlacionados por estatística multivariada, utilizando o software ParLeS (Viscarra-Rossell, 2008). Com uma seleção aleatória de amostras foram construídos os modelos de calibração através do método de regressão por mínimos quadrados parciais (PSLR). O modelo foi validado com o restante das amostras. Bons modelos de estimativa foram obtidos para CTC ( $R^2 = 0,79$ ) e V % ( $R^2 = 0,80$ ) no solo arenoso. Coeficientes de determinação maiores que 0,50 foram obtidos para estes atributos no solo de textura argilosa. Houve correlação entre a NC determinada e a NC estimada com  $R^2$  de até 0,99, ou seja, os dados radiométricos conseguiram determinar a quantidade de calcário a ser aplicada nas amostras de terra do experimento. A metodologia utilizada tem potencial para auxiliar métodos convencionais de análise de solo, especialmente inserida na prática da agricultura de precisão.

Palavras-chave: Necessidade de Calagem; Sensor FieldSpec; ParLeS

## **5 LIME APPLICATION BY SPECTRAL REMOTE SENSING AS BASES PRECISION AGRICULTURE**

### **Abstract**

One of the most important areas which precision agriculture has been commercially applied is in the soil fertility management. The objective of this work was to predict the content of soil chemical attributes related to lime recommendation, from its spectral curve obtained in laboratory (350 – 2500 nm), to contribute for the development of a methodology that comes to automate this calculus to support precision agriculture. The experiment was realized in a green house. The treatments, disposed completely random, with four replications, consisted in three lime rates, calculated to raise the bases saturation to 40, 60 and 80 %, besides the control treatment. Soil

analyses were realized to determine pH ( $\text{CaCl}_2$ ), organic matter, phosphorus, calcium, magnesium, potash, aluminum, hydrogen plus aluminum, and the CEC and V % were calculated. The spectral data were obtained all the process to the soil level, in a total of 320 soil samples. In the end, the data were correlated by multivariate statistics using the software ParLeS (VISCARRA-ROSSELL, 2008). With a random selection of samples were generated the calibration models through the method of partial least square regression (PLSR). The model was validated with rest of soil samples. Good estimated models were found for CTC ( $R^2 = 0,79$ ) and V % ( $R^2 = 0,80$ ) in the Arenosols. Determinate coefficients higher than 0,50 were obtained for these attributes in the Oxisol. There was correlation between the NC determined and the NC estimated with a  $R^2$  of 0,99. The radiometric data could determine the quantity of lime to be applied in the experiment soils. The utilization of V % and CEC results obtained by spectral data is an auxiliary tool in lime recommendations and can be applied in Precision Agriculture.

Keywords: Lime Recommendation; FieldSpec sensor; ParLeS

## 5.1 Introdução

Uma das primeiras e mais importantes áreas na qual a Agricultura de Precisão (AP) tem sido aplicada comercialmente é no manejo da fertilidade do solo. A aplicação de fertilizantes é, sem dúvida, um dos maiores custos na produção agrícola e por isso, a determinação da melhor relação custo-benefício na utilização deste insumo é de grande importância (BULLOCK et al., 2000). Neste sentido o sensoriamento remoto vem se mostrando uma fonte de informação valiosa no manejo da variabilidade da fertilidade do solo, especialmente com a implantação da AP.

A aplicação do uso de técnicas de sensoriamento remoto a campo tem sido demonstrada em vários países. Em trabalho de revisão de literatura, Ge et al (2006) demonstraram diferentes estudos em que técnicas de sensoriamento remoto são utilizadas na quantificação de atributos de solos visando sua aplicação em AP. Adamchuk et al. (2004) apresentam uma revisão de literatura mostrando os diferentes tipos de sensores com potencial de utilização no campo a bordo de máquinas. Christy (2008) avaliou a capacidade de um sensor óptico predizer em tempo real os atributos do solo em diferentes áreas da região central do Kansas e os melhores resultados encontrados foram para estimativa dos teores de matéria orgânica. Maleki et al. (2007) avaliaram a aplicação de fósforo no solo baseada na necessidade estimada através de sensor a bordo de trator. Wetterlind et al (2008) utilizaram dados espectrais para diminuir o número de amostras de solos a serem analisadas em laboratórios convencionais para confecção de mapas de atributos de solo de uma propriedade agrícola.

O método tradicional de se verificar a fertilidade do solo e conseqüentemente de se recomendar a aplicação de corretivos e adubos vem do resultado das análises químicas de solos. No Brasil citam-se, dentre outras, as metodologias adotadas por Camargo et al. (1986), Raij et al. (1987) e Embrapa (1997). Os métodos utilizados em laboratório, já consagrados, são analíticos e levaram bastante tempo para atingir os graus de confiabilidade que possuem. No Brasil, o custo da análise química de rotina por amostra de terra é em torno de vinte e dois reais, o que desencoraja a prática do manejo em sítios específicos. Além disso, as análises químicas de solo resultam em uma grande quantidade de reagentes gastos e resíduos produzidos que podem ter um destino inadequado, contaminando solos e águas. Estima-se que no Brasil o número de análises químicas de terra tenha atingido um milhão de amostras no ano de 2001 (RAIJ et al., 2001).

A coleta de amostras para fins de fertilidade é de uma amostra composta de 20 subamostras para uma área não maior do que 20 ha (RAIJ et al., 1996), gerando uma considerável margem de erro. Para a prática da AP, onde a variabilidade espacial é considerada, a coleta de 1 a 2,5 pontos por hectare proporciona um alto custo (FRAISSE, 1998). Demattê et al. (2000) verificaram que os custos com análises de solo foram superiores no processo de agricultura pontual comparada com a convencional. Portanto, a racionalização no estabelecimento de locais para a amostragem de terra, ou a diminuição do valor gasto com as mesmas torna-se imprescindível.

Desta forma, são necessários métodos práticos que estimem rapidamente e de maneira eficiente as propriedades do solo para melhorar a avaliação quantitativa dos problemas de manejo da terra (SHEPHERD E WALSH, 2002). A aplicação da espectroscopia como método para análise de solos teve início após Bower e Hanks (1965) mostrarem que é possível quantificar atributos do solo através da energia refletida. A utilização de dados de sensores em geral, para o estudo do solo, é um desafio que vem sendo buscado por pesquisadores, dentre outras razões, por ser uma tecnologia alternativa para avaliação dos atributos do solo e que resulta em um menor impacto ambiental.

Portanto, este trabalho objetiva quantificar atributos químicos do solo relacionados à sua acidez através de dados espectrais obtidos em laboratório. Com isso, espera-se contribuir para o desenvolvimento de uma metodologia que venha automatizar este cálculo como apoio a AP. Sabendo-se que existe relação entre atributos químicos relacionados ao cálculo da calagem, como a CTC e saturação por bases, com a energia refletida captada por sensores, espera-se que seja possível determinar níveis de aplicação de corretivos baseado nas informações por sensoriamento remoto.

## **5.2 Desenvolvimento**

### **5.2.1 Material e Métodos**

#### **5.2.1.1 Caracterização do experimento**

O experimento foi conduzido no município de Piracicaba, São Paulo, em casa de vegetação. O híbrido de milho utilizado foi o cultivar DOW 2B710, safra 2006/2006, obtido em Jardinópolis/SP (germinação: 85% e pureza mínima: 98%). Foram realizados quatro ciclos de cultivo, sendo o primeiro feito em maio de 2007, colocando-se oito sementes por vaso de 4 dm<sup>3</sup> e, após o estabelecimento das plântulas efetuou-se o desbaste, mantendo-se duas plantas por vaso durante 57 dias após a emergência.

Os solos utilizados no ensaio foram o Latossolo Vermelho textura argilosa com 22 % de areia, 9 % de silte e 69 % de argila, coletado no Centro de Citricultura no município de Cordeirópolis, SP (22° 26' 59" S, 47° 24' 18" W), e o Neossolo Quartzarênico coletado no município de Luis Antônio, SP (21° 35' 09" S, 47° 04' 22" W), com 94 % de areia, 2% de silte e 4 % de argila (Embrapa, 2006). Estes solos foram coletados na camada arável (0-20 cm) e apresentavam, originalmente, as seguintes características químicas: pH (CaCl<sub>2</sub>) = 3,9; MO = 31 g dm<sup>-3</sup>; P = 3 mg dm<sup>-3</sup>; Ca = 7 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; Mg = 3 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; K = 0,6 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; H+AL = 88 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; Al = 13 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; CTC = 98,6 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; V = 10,8 % no Latossolo Vermelho textura argilosa e, pH (CaCl<sub>2</sub>) = 4,1; MO = 12 g dm<sup>-3</sup>; P = 11 mg dm<sup>-3</sup>; Ca = 1 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; Mg = 1 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; K = 0,07 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; H+AL = 28 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; Al = 5 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; CTC = 30,07 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; V = 6,9 % no Neossolo Quartzarênico.

### 5.2.1.2 Descrição dos tratamentos

Antes da semeadura do milho, as amostras de solos foram secas ao ar, destorroadas, passadas em peneira de malha de 4 mm e acondicionadas em vasos de 4 dm<sup>3</sup> de capacidade. Em seguida foi realizada a calagem com posterior incorporação do calcário apenas no primeiro ciclo da cultura. A adubação NPK foi aplicada nos quatro cultivos utilizando as mesmas doses em todos os tratamentos. Para a calagem foram utilizados três produtos comerciais, todos calcários dolomíticos, identificados como **A**, **B** e **C**, sendo produtos de média, baixa e alta reatividade, respectivamente (Tabela 3.1). As doses de calcário aplicadas foram calculadas para elevar a saturação por bases (V%) a 40%, 60% e 80%. Desta forma, aplicaram-se 1,68 g kg<sup>-1</sup>; 2,75 g kg<sup>-1</sup>; 3,87 g kg<sup>-1</sup> do calcário **A** no solo argiloso e 0,57 g kg<sup>-1</sup>, 0,9 g kg<sup>-1</sup> e 1,25 g kg<sup>-1</sup> no solo arenoso; 1,90 g kg<sup>-1</sup>, 3,19 g kg<sup>-1</sup>, 4,48 g kg<sup>-1</sup> do **B** em solo argiloso e 0,65 g kg<sup>-1</sup>, 1,05 g kg<sup>-1</sup> e 1,45 g kg<sup>-1</sup> em



solo arenoso; 1,37 g kg<sup>-1</sup>, 2,31 g kg<sup>-1</sup>, 3,25 g kg<sup>-1</sup> de C em solo argiloso e 0,48 g kg<sup>-1</sup>, 0,76 g kg<sup>-1</sup> e 1,05 g kg<sup>-1</sup> em solo arenoso, além da testemunha, sem calcário.

Tabela 5.1 – Caracterização química dos calcários utilizados no experimento

Calcários	CaO	MgO	CaCO <sub>3</sub>	MgCO <sub>3</sub>	Sílica e Insolúveis	Tyler (Mesh) / Abertura (mm)			PRNT	PN	RE
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	10/2,0	20/0,8	50/0,3	(%)	(%)	(%)
A	30,77	20,92	55,09	51,88	3,99	99,72	91,43	73,0	88,29	104,44	85,72
B	28,89	17,18	51,71	42,62	14,83	99,82	91,44	67,94	76,21	91,03	83,72
C	32,54	18,90	58,26	46,86	2,14	100,00	99,98	97,77	105,26	106,21	99,10

Após trinta dias da calagem foram adicionados adubos minerais, sendo as doses calculadas conforme a necessidade da cultura. Para a adubação fosfatada, seguiu-se a recomendação de Malavolta (1980), com a aplicação de 200 mg kg<sup>-1</sup> de N e 200 mg kg<sup>-1</sup> de P. Na semeadura, aplicaram-se 0,84 g kg<sup>-1</sup> de superfosfato simples, 0,79 g kg<sup>-1</sup> de superfosfato triplo e 0,22 g kg<sup>-1</sup> de uréia (45 % N). Estes valores são equivalentes a 1,68 t ha<sup>-1</sup> de superfosfato simples, 1,58 t ha<sup>-1</sup> de superfosfato triplo e 0,44 t ha<sup>-1</sup> de uréia. O restante da dose de nitrogênio foi aplicado em cobertura, aos 25 e 40 dias após a emergência das plântulas (DAE), na forma de sulfato de amônio e uréia. O K foi aplicado na forma de KCl (0,38 g kg<sup>-1</sup> de KCl). Para a adubação com micronutrientes foram aplicados em solução, 10 mg kg<sup>-1</sup> de MnSO<sub>4</sub>H<sub>2</sub>O, ZnSO<sub>4</sub>(7H<sub>2</sub>O) e Fe(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>(6H<sub>2</sub>O); 5 mg kg<sup>-1</sup> de H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> e CuSO<sub>4</sub>(5H<sub>2</sub>O); e 1 mg kg<sup>-1</sup> de (NH<sub>4</sub>)<sub>6</sub>Mo<sub>7</sub>O<sub>24</sub>(4H<sub>2</sub>O).

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, com quatro repetições. Os tratamentos tiveram dois solos, três doses além da testemunha e três fontes de calcário, totalizando 80 vasos. Aos 57 dias após emergência, as plantas foram colhidas em pleno florescimento, ou seja, no pico de acúmulo de matéria seca e máximo crescimento vegetativo.

### 5.2.1.3 Análises laboratoriais

#### 5.2.1.3.1 Análises químicas

Foram realizadas as análises dos solos determinando-se pH em CaCl<sub>2</sub> 0,01 Mol L<sup>-1</sup>, C-orgânico (método colorimétrico), fósforo, cálcio, magnésio e potássio, extraídos pelo método da

resina trocadora de íons (RAIJ B. et al., 1986), alumínio (usando extrator KCl 1 mol L<sup>-1</sup>) e H + Al (usando SMP solução tamponada de acetato de cálcio 1 N pH 7,0) de acordo com Raij et al. (1987).

#### **5.2.1.3.2 Obtenção de dados espectrais**

Os dados espectrais dos solos foram obtidos em laboratório com o espectrômetro FieldSpec Pro (Analytical Spectral Devices, Boulder, Colo.). É um espectrorradiômetro com fibra ótica com resolução espectral de 1 nm até 1100 nm e 2 nm até 2500 nm e ainda com capacidade de mais de 30 leituras por segundo. Para a coleta dos dados de reflectância, as amostras foram preparadas por secagem em estufa à 45°C durante 24 horas (HENDERSON et.al, 1992) seguida de moagem e peneiramento em peneira de malha de 2 mm. Cada amostra corresponde à aproximadamente 15 cm<sup>3</sup> de solo que foram alocados em placa de petri para determinação da reflectância. As amostras foram medidas em triplicata, promovendo o aumento da superfície do solo escaneada pelo sensor. O sensor foi colocado em posição vertical a 8 cm de distância da amostra, onde foi medida a luz refletida numa área aproximada de 2 cm<sup>2</sup> no centro da amostra. A fonte de iluminação utilizada foi uma lâmpada halógena de 50 W, com feixe não colimado para o plano visado, sendo posicionada a 35 cm da amostra e com um ângulo zenital de 30°. Foi utilizada como padrão de referência, uma placa cinza a qual reflete 50% de uma placa branca. Os dados espectrais desta placa foram armazenados pelo sistema para posterior determinação do *fator de reflectância* das amostras, o qual foi multiplicado pelas leituras obtidas de cada uma delas. No total, foram obtidas 160 leituras espectrais do solo argiloso e 160 do arenoso. Com tal fator em mãos, foram criadas representações gráficas, ou seja, curvas de reflectância espectral.

#### **5.1.2.4 Análises das informações**

A análise estatística foi realizada entre os dados de reflectância obtidos em laboratório com os atributos químicos dos solos através do programa ParLeS versão 3.1 (VISCARRA ROSSEL, 2008). Para tal foi utilizada a técnica de regressão pelo método de mínimos quadrados parciais (PLS) inserida neste programa. Sua utilização é comum em sensoriamento remoto e

processamento de dados espectrais, uma vez que lida com grandes séries de dados altamente correlacionados com variáveis. Esta técnica é mais precisa que a de regressão linear múltipla já que o efeito de colinearidade dos dados do modelo pode ser reduzido com maior eficiência, além de levar em consideração toda a informação espectral.

Das 160 amostras iniciais do solo argiloso, foram selecionadas aleatoriamente 120 curvas espectrais junto com seus respectivos valores de CTC potencial e V%, para posteriormente realizar a regressão (PLS) e a validação cruzada. O mesmo procedimento foi realizado para o solo arenoso. As amostras utilizadas para calibração e validação dos modelos foram representativas de todos os tratamentos realizados neste experimento.

Todos os dados de reflectância foram pré-processados para remover possíveis erros e melhorar a estabilidade da regressão. Desta forma, foram normalizados pela opção encontrada no software denominada centralização.

Os dados de reflectância da CTC potencial do solo argiloso tiveram suas curvas espectrais transformadas em função da eq. (1), com o objetivo de reduzir a não linearidade que por acaso possa existir no espectro.

$$\text{Log} \frac{1}{R} \tag{1}$$

Em que:

R = reflectância.

Para corrigir variações atípicas de espalhamento da luz, foi feita uma correção multiplicativa de sinal (MSC) para as curvas espectrais quando o atributo avaliado foi a saturação por bases (V%) para o solo argiloso

Foi realizada a validação cruzada (calibração dos valores obtidos das análises químicas convencionais versus as predições feitas pelo modelo) a fim de se obter um número de componentes para gerar um modelo com maiores coeficientes de determinação ( $R^2$ ), menores valores da raiz quadrada do erro médio (RMSE) e maiores valores de desvio padrão do erro (RPD), descritos pelas eq. (2) e eq. (3).

$$RPD = \frac{sd}{SEP} \quad (2)$$

Em que:

sd = taxa do desvio padrão dos dados analisados;

SEP = erro padrão da predição.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n-m} (\hat{\gamma}_i - \gamma_i)^2}{n-m}} \quad (3)$$

Em que:

n = número de amostras;

m = número de amostras usadas para predição;

$\hat{\gamma}_i - \gamma_i$  = valores das propriedades do solo preditos e medidos, respectivamente.

Estes parâmetros estatísticos são comumente usados para avaliar técnicas de espectroscopia. Os modelos gerados são séries de coeficientes denominados “b”, descritos pela eq. (4), que apresentam uma informação interpretável da composição, estrutura e concentração dos diversos atributos da amostra (MIN E LEE, 2005) e que foram utilizados para o cálculo da CTC potencial e saturação por bases estimadas. Para cada modelo gerado foi obtido um gráfico em função do comprimento de onda, com o objetivo de identificar feições de absorção ou reflexão dos atributos avaliados.

$$Y = b.X \quad (4)$$

Em que:

Y = valor do atributo avaliado em laboratório de análises químicas;

b = função da calibração;

X = valor espectral (350-2500 nm).

Os modelos de regressão obtidos pelo método PLS para a estimativa da CTC potencial e V% nos dois solos, foram testados aplicando-os as 40 amostras restantes das 160 iniciais, correspondentes ao solo argiloso e arenoso. A fim de representar o desempenho real de cada modelo sobre cada tipo de solo na predição dos atributos avaliados, foi feita uma validação cruzada.

Determinar quais os valores dos parâmetros  $R^2$  e RMSE que constituem um modelo adequado é subjetivo, da mesma forma que há dificuldades em se comparar resultados de diferentes calibrações (DUNN et al., 2002). No entanto, Saeys et al. (2005) estabeleceram que valores de  $R^2$  entre 0,50 e 0,65 indicam a possibilidade de discriminação das altas e baixas concentrações no modelo, enquanto que, valores de  $R^2$  de aproximadamente 0,66 a 0,81, de 0,82 a 0,90 e acima de 0,90 indicam modelos quantitativos de predição de atributos químicos do solo aceitáveis, bons e excelentes respectivamente. Dunn et al. (2002) e Chang et al. (2001) sugerem que valores de RPD menores que 1,5 sejam considerados insuficientes para a maioria das aplicações, enquanto que modelos com valores maiores que 2,0 sejam considerados excelentes. Já modelos com valores de RDP entre 1,5 e 2,0 são julgados úteis em relação à acurácia das predições. Segundo Williams (1987), valores de RPD são muito utilizados para comparar resultados de um conjunto de dados que possui graus de variabilidade diferentes e que, quanto maior o valor de RPD, mais confiável é o modelo de predição. As predições das propriedades dos solos consideradas aceitáveis podem ser melhoradas com a utilização de diferentes estratégias de calibração, enquanto que aquelas que separam apenas baixas de altas concentrações, não devem ser confiantemente preditas com o uso de regiões entre 400 a 2500 nm do espectro eletromagnético (CHANG et al., 2001). Com base nos trabalhos de Saeys et al (2005), Chang et al. (2001) e Dunn et al. (2002) foram analisados os resultados obtidos neste trabalho.

Para o cálculo da necessidade de calagem (NC) utilizou-se método baseado na elevação da saturação por bases dado pela eq. (5) (RAIJ E QUAGGIO, 1993). O cálculo foi feito para elevação da saturação por bases para 40, 60 e 80 % para a cultura do milho com a utilização de três calcários com diferentes reatividades (Tabela 5.1).

$$NC = CTC \cdot \frac{(V2 - V1)}{10 \cdot PRNT} \quad (5)$$

Em que:

CTC = Capacidade de troca catiônica;

V2 = Saturação por bases desejada;

V1 = Saturação por bases atual;

PRNT = Poder reativo de neutralização total do calcário comercial.

## 5.2.2 Resultados e discussão

### 5.2.2.1 Calibração dos modelos

A capacidade da espectroscopia de reflectância prever as propriedades químicas dos solos estudados foi avaliada conforme seus fatores PLS; os valores do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) entre os valores preditos e observados, que fornecem uma medida comum da redução da variância; a raiz quadrada do erro médio (RMSE) e desvio padrão do erro (RPD), que fornece uma medida do modelo de ajuste que pode ser comparado através dos atributos do solo.

Para as características químicas avaliadas, os melhores resultados da calibração foram encontrados no solo de textura arenosa, que obtiveram menores valores de RMSE e maiores  $R^2$ , além de fazerem uso de um menor número de variáveis latentes ou fatores PLS para descrever a variação das curvas espectrais em relação à variação da CTC potencial e saturação por bases. Além disso, os modelos de calibração obtidos para o solo arenoso, alcançaram valores de RPD maiores que 2,0, sendo considerados excelentes (DUNN et al., 2002; CHANG et al., 2001).

O modelo gerado para CTC no solo arenoso apresentou  $R^2 = 0,75$ , RMSE = 3,60, RPD = 2,0 com o uso de 10 fatores PLS. Para o solo de textura argilosa estes valores foram de  $R^2 = 0,71$ , RMSE = 11,20 e RPD = 1,84 com 9 fatores PLS. Já os modelos gerados para saturação por bases nos dois solos obtiveram valores de  $R^2 = 0,62$ , RMSE = 10,90, RPD = 1,59 no solo de textura argilosa e  $R^2 = 0,72$ , RMSE = 6,01, RPD = 2,07 no arenoso. Logo são modelos de calibração aceitáveis ( $0,66 < R^2 < 0,81$ ) a úteis ( $1,5 < RPD < 2,0$ ) e excelentes ( $RPD > 2,0$ ), segundo DUNN et al. (2002) e CHANG et al. (2001). Islam et al. (2003) em um experimento com diferentes solos de regiões agricultáveis da Austrália, obtiveram resultados semelhantes na calibração de modelos CTC ( $R^2 = 0,75$ ; RPD = 1,6).

### 5.2.2.2 Validação dos modelos

A CTC é um atributo determinado pela soma das bases trocáveis, H e Al. Muitos trabalhos de literatura vêm obtendo correlações razoáveis com a energia refletida. Portanto, a energia que incide sobre esses elementos que compõem a CTC, reflete a capacidade de retenção. No solo arenoso, a CTC foi baixa para a maioria das amostras de terra (na faixa de  $40 \text{ mmol} \cdot \text{dm}^{-3}$ ). Ou seja, mesmo com dados sem alta variação, a correlação foi adequada ( $R^2 = 0,79$ ; RPD = 2,09) (Figura 5.1), indicando que o que compõe a CTC está influenciando diretamente na energia refletida. Chang et al. (2001) encontraram para a CTC valores de  $R^2$  em torno de 0,81 e Demattê e Garcia (1999a) obtiveram 0,71. Entretanto, Demattê e Garcia (1999b) encontraram coeficientes menores que 0,5 para CTC e SB.

No solo de textura argilosa, para a saturação por bases, os modelos de estimativa obtidos obtidas apresentaram coeficientes de determinação em torno de 0,50 (Figura 5.1) mais baixos do que os verificados Genú (2002) com 0,77 para V %. Porém, este resultado foi semelhante ao encontrado por Demattê e Garcia (1999b) com coeficientes de determinação menores que 0,50 para V%.

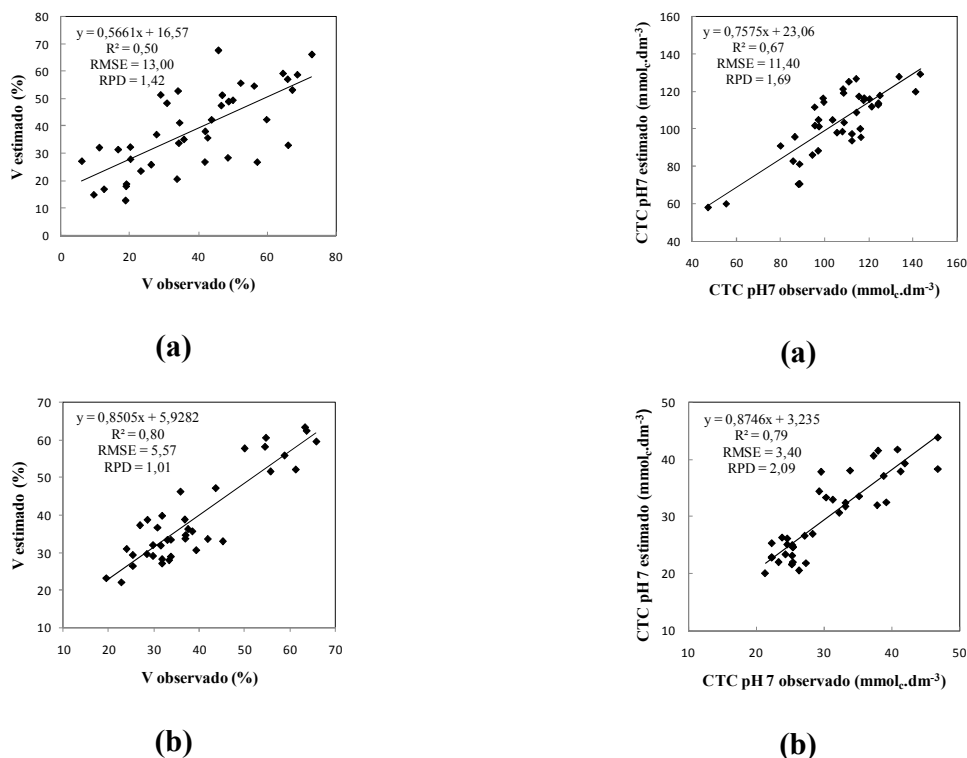


Figura 5.1 – Validação cruzada para avaliação do modelo PLSR da estimativa dos atributos avaliados no solo argiloso (a) e arenoso (b);  $R^2$ : coeficiente de determinação; RMSE: raiz quadrada do erro médio; RPD: desvio padrão do erro

### 5.2.2.3 Necessidade de calagem

Verificou-se através do teste F de Snedecor ao nível de 5 % de significância que, os valores de V% e CTC determinados através de métodos convencionais não diferiram daqueles obtidos com o uso da radiometria (Tabelas 5.2 e 5.3). Desta forma, foi realizada a comparação entre a NC usando os resultados analíticos e os teores estimados pela equação de regressão, afim de elevar a saturação por bases para 70 % durante os quatro ciclos avaliados. A figura 5.2 apresenta a correlação entre a NC determinada e a estimada com  $R^2$  de até 0,99, ou seja, os dados radiométricos permitiram estimar a quantidade de calcário a ser aplicada nos solos do experimento. Este estudo concorda com autores como Janik et al. (1998), que obtiveram excelente predição da NC com  $R^2$  de 0,85 quando comparou a necessidade de calagem medida e predita através da espectroscopia de reflectância.



Tabela 5.2 – Avaliação entre as médias, obtidas nos quatro ciclos da planta, dos teores determinados em laboratório e os estimados por equações de regressão multivariadas a partir das bandas avaliadas (350 – 2500 nm) no solo argiloso

Calcários	Ciclo	Dose	Solo textura argilosa					
			CTC (D)	CTC (E)	F	V% (D)	V% (E)	F
A	1	1	117,74	113,60	0,3311	42,87	48,20	0,1643
		2	120,02	121,16	0,8665	60,19	55,69	0,2147
		3	121,86	117,74	0,4469	66,22	57,77	0,1266
B	1	1	109,74	112,9	0,9432	45,59	54,11	0,2428
		2	107,84	105,95	0,4651	58,32	58,90	0,4626
		3	110,67	126,40	0,4221	67,27	63,06	0,1918
C	1	1	112,30	115,98	0,4000	52,07	54,37	0,1925
		2	115,79	116,56	0,8105	63,79	64,64	0,2729
		3	129,45	111,92	0,6886	69,76	62,72	0,2466
A	2	1	100,00	102,56	0,6622	31,40	27,55	0,1881
		2	99,10	101,58	0,2882	42,20	38,30	0,1222
		3	101,20	103,50	0,2766	58,90	47,45	0,0636
B	2	1	109,10	98,98	0,9007	34,30	33,57	0,6858
		2	102,20	106,33	0,3514	48,90	45,37	0,4888
		3	99,00	100,40	0,5123	55,60	50,93	0,2137
C	2	1	100,50	104,92	0,1748	30,30	27,94	0,4037
		2	103,30	99,67	0,6701	35,70	32,19	0,4710
		3	96,00	96,65	0,7641	50,60	45,69	0,2223
A	3	1	87,80	92,24	0,4096	24,40	19,21	0,3764
		2	90,10	89,43	0,3112	41,80	33,59	0,1130
		3	87,90	85,05	0,3907	49,50	45,63	0,1123
B	3	1	87,10	79,54	0,5766	25,70	19,99	0,1706
		2	85,80	73,12	0,3903	40,60	40,17	0,8616
		3	85,00	73,59	0,5529	55,10	57,58	0,7796
C	3	1	85,70	89,48	0,1828	20,60	19,92	0,1154
		2	85,00	83,6	0,4180	33,30	27,54	0,1821
		3	81,00	84,57	0,4069	49,10	36,41	0,0518
A	4	1	119,00	116,27	0,7331	18,60	18,64	0,6268
		2	114,80	113,54	0,6478	30,20	29,33	0,1368
		3	109,10	115,46	0,5478	37,40	33,89	0,1607
B	4	1	115,60	120,9	0,7495	12,60	10,85	0,1094
		2	87,70	95,86	0,4079	13,30	17,17	0,1397
		3	73,00	89,08	0,5177	20,50	20,21	0,8521
C	4	1	120,20	117,64	0,3230	14,00	14,43	0,8412
		2	115,20	115,32	0,7138	23,30	20,33	0,4988
		3	104,70	108,55	0,4313	35,10	29,18	0,1829

1, 2 e 3 referem-se às doses de calcário calculadas para elevar a saturação por bases respectivamente, para 40, 60 e 80 %; (D) refere-se aos valores determinados de CTC potencial ( $\text{mmol}_c.\text{dm}^{-3}$ ) e V (%) em laboratório pelo método tradicional de análises de terra; (E) refere-se aos valores estimados de CTC potencial ( $\text{mmol}_c.\text{dm}^{-3}$ ) e V (%) pelas equações de regressão;  $F < 0,05$  pelo teste F de Snedecor refere-se à diferenças estatísticas significativas entre as médias estimadas e determinadas.

Tabela 5.3 – Avaliação entre as médias, obtidas nos quatro ciclos da planta, dos teores determinados em laboratório e os estimados por equações de regressão multivariadas a partir das bandas avaliadas (350 – 2500 nm) no solo arenoso

Calcários	Ciclo	Dose	Solo textura arenosa					
			CTC (D)	CTC (E)	F	V% (D)	V% (E)	F
A	1	1	40,61	39,71	0,4889	55,01	55,36	0,8794
		2	43,56	42,14	0,5192	61,60	59,10	0,5053
		3	39,38	39,55	0,8998	56,86	55,83	0,3162
B	1	1	37,22	39,67	0,3182	55,03	54,56	0,8220
		2	40,28	39,98	0,7892	60,27	57,67	0,4248
		3	46,12	46,35	0,9082	61,83	65,21	0,2470
C	1	1	40,46	40,15	0,9278	51,29	54,69	0,3296
		2	40,79	40,47	0,8973	62,40	57,74	0,2455
		3	40,32	39,07	0,4478	60,19	55,39	0,0166
A	2	1	24,60	23,49	0,4440	29,90	28,41	0,7099
		2	25,10	23,00	0,2372	42,20	33,44	0,0630
		3	25,80	23,14	0,2831	43,90	35,31	0,0104
B	2	1	21,60	23,31	0,2994	24,70	25,52	0,5066
		2	26,10	25,57	0,7580	40,60	37,85	0,2568
		3	28,90	27,92	0,5326	45,50	44,57	0,6017
C	2	1	29,30	22,08	0,8640	44,46	32,60	0,3689
		2	29,80	23,11	0,7212	45,50	35,84	0,0660
		3	27,60	23,50	0,8090	49,30	40,30	0,2895
A	3	1	23,70	24,00	0,7821	27,20	24,91	0,4898
		2	24,70	23,88	0,4449	33,30	33,49	0,9062
		3	23,80	26,23	0,2580	32,70	33,87	0,5932
B	3	1	23,60	24,13	0,7208	28,10	28,47	0,8313
		2	25,70	25,06	0,8924	31,90	32,48	0,4626
		3	25,70	25,84	0,9808	35,90	36,02	0,4370
C	3	1	25,40	24,20	0,6067	33,00	27,11	0,5502
		2	28,20	25,01	0,5501	35,30	31,13	0,3872
		3	30,40	24,48	0,3167	45,00	48,74	0,2331
A	4	1	28,30	30,66	0,1310	22,20	28,45	0,4424
		2	24,90	23,14	0,8092	16,60	13,20	0,4793
		3	25,70	27,28	0,3161	22,10	16,69	0,7245
B	4	1	29,80	33,19	0,3351	21,20	21,24	0,4659
		2	28,00	32,02	0,4339	22,20	24,33	0,9583
		3	28,60	32,50	0,2096	27,40	28,05	0,8381
C	4	1	27,80	33,12	0,6634	19,10	20,47	0,6064
		2	28,70	31,07	0,4695	17,40	18,20	0,6397
		3	28,70	31,86	0,2568	28,25	24,72	0,7666

1, 2 e 3 referem-se às doses de calcário calculadas para elevar a saturação por bases respectivamente, para 40, 60 e 80 %; (D) refere-se aos valores determinados de CTC potencial ( $\text{mmol}_c.\text{dm}^{-3}$ ) e V (%) em laboratório pelo método tradicional de análises de terra; (E) refere-se aos valores estimados de CTC potencial ( $\text{mmol}_c.\text{dm}^{-3}$ ) e V (%) pelas equações de regressão;  $F < 0,05$  pelo teste F de Snedecor refere-se à diferenças estatísticas significativas entre as médias estimadas e determinadas.

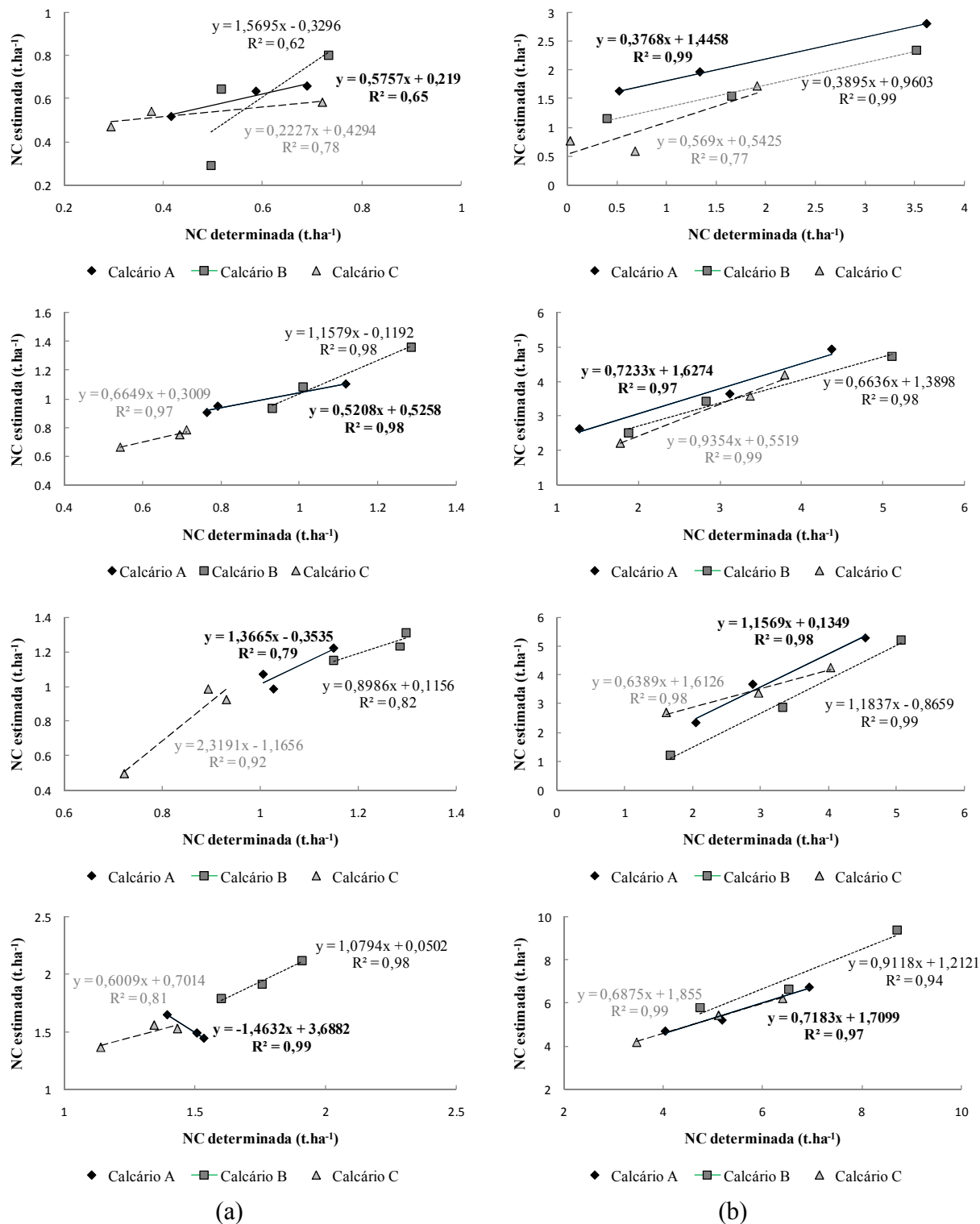


Figura 5.2 – Gráfico de correlação entre a necessidade de calagem (NC) determinada a partir dos resultados da análise de laboratório e da estimada através dos dados radiométricos do solo arenoso (a) e argiloso (b) para os quatro ciclos de cultivo

Quando foi estimada a NC considerando todos os valores obtidos para CTC e V %, ou seja, com as várias doses de calagem, além do uso de calcários com diferentes reatividades, foram obtidos coeficientes de regressão de 0,92 e RMSE de apenas 0,53 t ha<sup>-1</sup> para o solo de textura argilosa. Já para o solo arenoso, estes valores foram de 0,94 e 0,13 t ha<sup>-1</sup> (Figura 5.3).

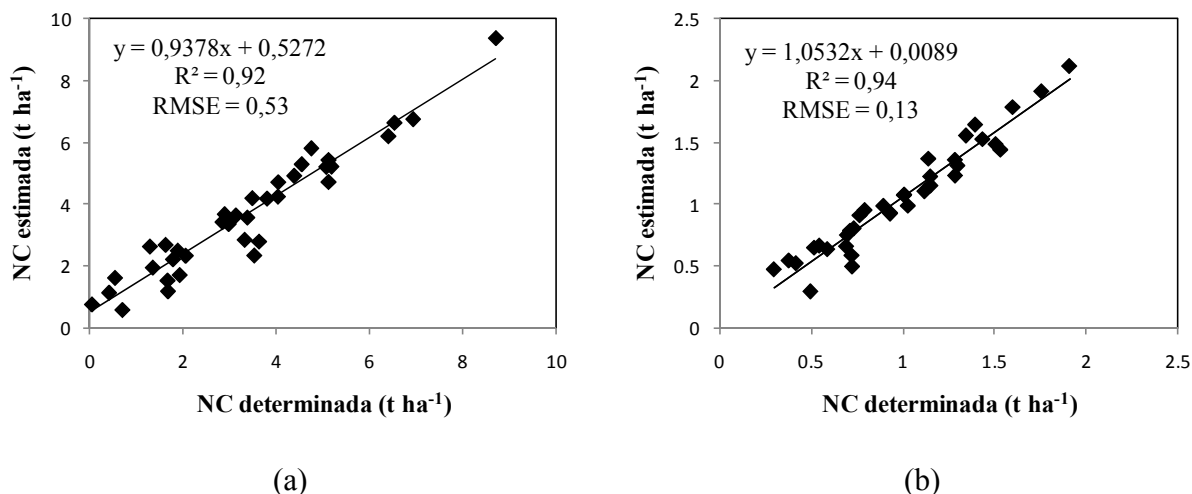


Figura 5.3 – Gráfico de correlação entre a necessidade de calagem (NC) determinada a partir dos resultados da análise de laboratório e radiométricos do solo argiloso (a) e arenoso (b)

A aplicação de calcário, dentre outras alterações químicas, promove o aumento nos teores de cálcio, que por sua vez aumentaram a refletividade do solo em certas regiões do espectro. (SCHREIR, 1977; DEMATTÊ et al. 1998). Verificam-se três tipos de situação que convergem para a mesma conclusão. Na primeira, Demattê et al. (1998) através de ensaios em laboratório demonstraram que as doses de calcário alteram os dados espectrais. Num segundo caso, são verificadas correlações positivas entre V % e reflectância (NANNI, 2000; FIORIO, 2002). Na última, fez-se o sentido inverso, verificando pela radiometria a possibilidade de quantificar a NC, obtendo-se resultados excelentes, conforme apresentado nas figuras 5.2 e 5.3, concordando com Janik et al. (1998).

### 5.3 Conclusões

1 – É possível estimar CTC e V % a partir da resposta espectral de solo para os referidos solos e modelos específicos com  $R^2$  variando entre 0,5 a 0,80 para saturação por bases e entre 0,67 a 0,79 para capacidade de troca catiônica. Os valores de F obtidos pelo teste de Snedecor variaram entre 0,12 e 0,98, não havendo diferenças estatísticas entre os valores determinados e estimados destes atributos.

2 – A metodologia utilizada possibilita o cálculo da necessidade de calagem com índices de acerto atingindo valores de  $R^2$  de 0,99 e RMSE de  $0,13 \text{ t ha}^{-1}$ .

3 – Tais resultados possibilitam a redução de gastos com análises químicas de terra, favorecendo a prática da agricultura de precisão. Afora isso, os resultados obtidos são rápidos e precisos, além de ser uma técnica menos prejudicial ao ambiente, uma vez que não produz resíduo.

4 – A evolução desta metodologia pode permitir a coleta de informações e intervenções no campo em tempo real, com sensores instalados em implementos agrícolas.

## Referências

ADAMCHUK, V.I.; HUMMEL, J.W.; MORGAN, M.T.; S.K, UPADHYAYA. On-the-go soil sensors for precision agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**, London, v.44, p.71–91, 2007.

BOWERS, S.A.; HANKS, R.J. Reflectance of radiant energy from soils. **Soil Science**, Baltimore, v.100, n.2, p.130-138, 1964-65.

BULLOCK, P.; BRISCO, B.; HIROSE, T. Remote sensing for improving crop management. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOSPATIAL INFORMATION IN AGRICULTURE AND FORESTRY, 2000. Lake Buena Vista **Proceedings...** Florid: Erim, 2000. p.487-494.

CAMARGO, A.O.; MONIZ, A.C.; JORGE, J.A.; VALADARES, J.M. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do IAC**. Campinas: Instituto Agrônômico, 1986. 94p. (IAC. Boletim Técnico, 106).

CHANG, C.W.; LAIRD, D.A.; MAUSBACH, M.J.; HURBURGH J.C.R. Near-infrared reflectance spectroscopy principal components regression analysis of soil properties. **Soil Science Society of America Journal**, Baltimore, v. 65, p. 480-490, 2001.

CHRISTY, C.D.; DRUMMOND, P.; D.A, LAIRD. An on-the-go Spectral Reflectance Sensor for Soil. St. Joseph, Mich.:ASAE, 2003. (ASAE Paper No. 031044.)

- CHRISTY, C.D. Real-time measurement of soil attributes using on-the-go near infrared reflectance spectroscopy. **Computers and electronics in agriculture**, Amsterdam, v.61, p.10–19, 2008.
- DEMATTÊ, J.A.M.; GARCIA, G.J. Avaliação da atributos de Latossolo Bruno e de Terra Bruna Estruturada da região de Guarapuava, Paraná, por meio de sua energia refletida. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.23, p.343-355, 1999b.
- DEMATTÊ, J.A.M.; GARCIA, G.J. Alteration of soil properties through a weathering sequence as evaluated by spectral reflectance. **Soil Science of America Journal**, Madison, v. 63, n. 2, p.327-342, Mar./Apr. 1999a.
- DEMATTÊ, J.A.M.; HUETE, A.R.; FERREIRA JUNIOR, L.G.; ALVEZ, M.C.; NANNI, M.R.; CERRI, C.E. Evaluation of tropical soils through ground and orbital sensors. In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF GEOSPATIAL INFORMATION IN AGRICULTURE AND FORESTRY, 2., 2000, Lake Buena Vista. **Proceedings...**Lake Buena Vista: Erim, 2000. p.34-41.
- DUNN, B.W.; BEECHER, H.G.; BATTEN, G.D.; CIAVARELLA, S. The potencial of near-infrared reflectance spectroscopy for soil analysis – a case study from the Riverine Plain of south-eastern Australia. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, Melbourne, v.42, p.607-614, 2002.
- EMBRAPA. **Manual de Métodos de Análise de Solos**. Rio de Janeiro: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 1997. 217p.
- EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Rio de Janeiro: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2006. 306p.
- FIORIO, P.R. **Dados radiométricos obtidos nos níveis terrestre e orbital na avaliação de solo**. 2002. 198p. Tese (Doutorado Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.
- GE, Y.; THOMASSON, J. A.; SUI, R. Remote sensing of soil properties in precision agriculture: a review .In: ASABE ANNUAL INTERNATIONAL MEETING, 2006. Portland, Oregon 9 – 12 July 2006. (Paper Number: 061176. 2006.)
- GENÚ, A.M. **Avaliação e quantificação de atributos do solo através de dados radiométricos obtidos em laboratório**. 2002. 64p. (Dissertação de Mestrado na área de Solos e Nutrição Mineral de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.
- HENDERSON, T.L.; BAUMGARDNER, M.F.; FRANZMEIER, D.P.; STOTT, D.E.; COSTER, D.C. High dimensional reflectance analysis of soil organic matter. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.56, p. 865-872, 1992.

ISLAM, K.; SINGH, B.; McBRATNEY, A. Simultaneous estimation of several properties by ultra-violet, visible, and near-infrared reflectance spectroscopy. **Australian Journal of Soil Research**, Sidney, v. 41, p. 1101-1114, 2003.

JANIK, L.J.; MERRY, R.H., SKJEMSTAD, J.O. Can mid infrared diffuse reflectance analysis replace soil extractions. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, Melbourne, v. 38, p.681-696, 1998.

MALEKI, M.R. ; MOUAZEN, A.M. ; RAMON, H. ; BAERDEMAEKER, J. DE. Optimisation of soil VIS–NIR sensor-based variable rate application system of soil phosphorus. **Soil E Tillage Research**, Amsterdam, n.94, p.239-250, 2007.

MIN, M.; LEE, W.S. Determination of significant wavelengths and prediction of nitrogen content for citrus. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 48, n.2, p.455-461, 2005.

NANNI, M.R. **Dados radiométricos obtidos em laboratório e no nível orbital na caracterização e mapeamento de solos**. 2000. 366p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

RAIJ, B. van.; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. **Análise química para avaliação de solos tropicais**. Campinas: IAC, 2001. 285p.

RAIJ, B. van; QUAGGIO, J.A. Métodos de análises de solos para fins de fertilidade. Campinas: Instituto Agrônomo, 1983. 31p. (IAC. Boletim técnico, 81).

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

SAYES, W.; MOUAZEN, A.M.; RAMON, H. Potential for onsite and online analysis of pig manure using visible and near infrared reflectance spectroscopy. **Biosystems Engineering**, Cambridge, v.91, p.393-402, 2005.

SHEPHERD, K.D.; WALSH, M.G. Development of reflectance spectral libraries for characterization of soil properties. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.66, p.988-998, May-June 2002.

VISCARRA-ROSSEL, R.A.; JEON, Y.S.; ODEH, I.O.A.; McBRATNEY, A.B. Using a legacy soil sample to develop a mid-IR spectral library. **Australian Journal of Soil Research**, Sidney, v.46, p. 1-16, 2008.

VISCARRA ROSSEL, R.A. ParLeS: Software for chemometric analysis of spectroscopic data. **Chemometrics Intelligent Laboratory Systems**, Amsterdam, v.90, p.72-83, 2008.

WETTERLIND, J.; STENBERG, B.; SODERSTROM, M. The use of near infrared (NIR) spectroscopy to improve soil mapping at the farm scale. **Precision Agriculture**, New York, v.9, p.57–69, 2007.

WORKMAN, J. J. NIR spectroscopy calibrations basics. In: BURNS, D.A.; CIUREZAK, E.W. (Ed.) **Handbook of near infrared analysis** New York, 1992. p. 247-280.



## APÊNDICES

## APÊNDICE A



(a)



(b)



Figura 1 – Localização da casa de vegetação onde foi realizado o experimento 1 (a) e experimento 2 de incubação (b)

## APÊNDICE B



Figura 1 – Preparação das amostras de terra para posterior avaliação no sensor FieldSpec

## APÊNDICE C



Figura 1 – Aquisição dos dados radiométricos através do Sensor FieldSpec

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)