**Universidade de São Paulo**
**Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"**

# Resposta espectral do nitossolo submetido a diferentes doses de vinhaça

**Juliano Araujo Martins**

**Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em Ciências. Área de concentração: Irrigação e Drenagem**

**Piracicaba**
**2011**

Juliano Araujo Martins
Engenheiro Agrônomo

# Resposta espectral do nitossolo submetido a diferentes doses de vinhaça

Orientador:
Prof. Dr. **PETERSON RICARDO FIORIO**

**Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em Ciências. Área de concentração: Irrigação e Drenagem**

**Piracicaba**
**2011**

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

Martins, Juliano Araujo
Resposta espectral do nitossolo submetido a diferentes doses de vinhaça / Juliano Araujo Martins. - - Piracicaba, 2011.
103 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2011.

1. Cana-de-açúcar 2. Monitoramento ambiental 3. Radiometria 4. Resíduo agroindustrial 5. Sensoriamento remoto 6. Solos I. Título

CDD 631.432
M386r

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

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida e por todas as benção que tem derramado sobre mim.

Ao professor Dr. **Peterson Ricardo Fiorio**, pela orientação e mais do que isso, pela confiança, amizade e fundamental ajuda na realização deste trabalho.

A **comissão do programa de Pós-Graduação em Irrigação e Drenagem** da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", pela grande oportunidade concedida.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico **(CNPq)** pela concessão da bolsa, essencial a condução do trabalho.

A Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo (**FAPESP)**, pelo financiamento ao projeto de pesquisa ao qual este trabalho está vinculado.

Ao professor Dr. **José Alexandre de Melo Demattê**, pelo grande apoio ao projeto, disponibilizando o laboratório para o desenvolvimento do trabalho.

A **todos os professores** com quem cursei disciplinas durante o curso de mestrado, uma vez que sem os conhecimentos adquiridos não seria possível a realização deste trabalho.

Aos meus pais **Cícero Araujo Martins** e **Pedrina Leones da Silva Martins** e todos os meus familiares, com tenho uma relação muito estreita e são meu alicerce para ser a pessoa que sou.

A minha namorada **Kelsiane Cardoso Oliveira**, que mesmo distante, tem mostrado a cada dia estar ao meu lado nos bons e maus momentos.

A todos os **colegas de Pós-Graduação**, com quem passei muitos momentos agradáveis nesta fase de minha vida, em especial a **Julio Storion de Oliveira**, **Ana Carolina Nascimento, Ana Carolina Nascimento Santos**, **Pedro Paulo da Silva Barros**, **Isaac de Matos Ponciano**, **Sérgio Medeiros** e todos os demais que de forma direta ou indireta contribuíram para a realização deste trabalho.

# SUMÁRIO

RESUMO ..... 9

ABSTRACT ..... 11

1 INTRODUÇÃO ..... 13

Referências ..... 15

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA ..... 17

2.1 Cultura da cana-de-açúcar ..... 17

2.2 Uso e composição química da vinhaça ..... 17

2.3 Dinâmica dos componentes químicos da vinhaça ..... 19

2.4 Uso do sensoriamento remoto na quantificação de atributos do solo ..... 21

2.5 Efeito da vinhaça na resposta espectral do solo ..... 23

Referências ..... 23

3 ALTERAÇÕES NOS ATRIBUTOS DO SOLO FERTIRRIGADO COM DIFERENTES DOSES DE VINHAÇA, VIA GOTEJAMENTO SUBSUPERFICIAL ..... 27

Resumo ..... 27

Abstract ..... 27

3.1 Introdução ..... 28

3.2 Material e métodos ..... 29

3.2.1 Caracterização do experimento ..... 29

3.2.2. Preparo da área e instalação do experimento ..... 30

3.2.3 Descrição dos tratamentos e delineamento estatístico ..... 31

3.2.4 Aplicação dos tratamentos ..... 31

3.2.5 Coleta de solo e análises químicas e físicas ..... 32

3.2.6 Análise estatística ..... 33

3.3 Resultados e Discussão ..... 33

3.3.1 Condições climáticas no decorrer do experimento ..... 33

3.3.2 Efeito das diferentes doses de vinhaça nos atributos químicos e físicos do solo..... 34

3.3.3 Análise de componentes principais para os atributos químicos do solo ..... 42

3.4 Conclusões ..... 48

Referências..... 48

4 DETERMINAÇÃO DE ATRIBUTOS DE UM NITOSSOLO SUBMETIDO A DIFERENTES DOSES DE VINHAÇA, UTILIZANDO SENSORIAMENTO REMOTO ..... 51

Resumo..... 51

Abstract ..... 51

4.1 Introdução ..... 52

4.2 Material e métodos..... 53

4.2.1 Descrição do experimento..... 53

4.2.2 Delineamento experimental e aplicação dos tratamentos ..... 55

4.2.3 Coleta de solo e análises químicas e físicas ..... 56

4.2.4 Aquisição dos dados espectrais..... 57

4.2.5 Análise estatística..... 57

4.2.5.1 Pré-processamento das curvas espectrais..... 58

4.2.5.2 Calibração dos modelos ..... 59

4.2.5.3 Validação dos dados e avaliação dos modelos..... 60

4.3 Resultados e Discussão ..... 60

4.3.1 Calibração dos modelos de predição..... 60

4.3.2 Validação dos modelos de predição..... 65

4.4 Conclusões ..... 74

Referências..... 74

5 INFLUÊNCIA DA VINHAÇA E UMIDADE NA RESPOSTA ESPECTRAL DO SOLO..... 79

Resumo ..... 79

Abstract ..... 79

5.1 Introdução ..... 80

5.2 Material e métodos ..... 81

5.2.1 Descrição do experimento ..... 81

5.2.2 Delineamento experimental e aplicação dos tratamentos ..... 83

5.2.3 Coleta e monitoramento da umidade do solo ..... 84

5.2.4 Aquisição dos dados espectrais ..... 84

5.2.5 Tratamento do conjunto de dados e análise estatística ..... 85

5.3 Resultados e discussão ..... 89

5.3.1 Caracterização espectral do solo em estudo ..... 89

5.3.2 Determinação da umidade do solo por sensoriamento remoto ..... 90

5.3.3 Influência das doses de vinhaça na resposta espectral do solo ..... 93

5.4 Conclusões ..... 99

Referências ..... 99

# RESUMO


## Resposta espectral do nitossolo submetido a diferentes doses de vinhaça

Técnicas de sensoriamento remoto estão se difundindo rapidamente por se tratar de uma fonte rápida de informações, não destrutiva e de baixo custo. O objetivo desse trabalho foi avaliar as alterações químicas e físicas causadas pela aplicação do resíduo da cana-de-açúcar (vinhaça) na resposta espectral de um Nitossolo Vermelho Eutrófico. O experimento foi desenvolvido na Fazenda Areão (22º43''S, 47º38''O e altitude de 511m) na área experimental do Departamento de Engenharia Biossistemas – ESALQ/USP, Piracicaba-SP. O arranjo experimental foi em DIC, com 6 tratamentos e 4 repetições, sendo o tratamento 1 sem irrigação e com adubação convencional junto ao plantio, tratamento 2 fertirrigado com químicos, tratamentos 3, 4, 5 e 6, fertirrigados com 0.5, 1, 2 e 3 vezes a dose recomendada pela CETESB, respectivamente. Foram utilizados tensiômetros para determinação da umidade em cada tratamento nas profundidades 0-20; 20-40; 40-60 e 60-80 cm. As doses de vinhaça foram parceladas em quatro vezes sendo aplicadas a cada dois meses durante o ciclo da cultura, onde foram realizadas as amostragens de solo, nas profundidades estabelecidas anteriormente, obtendo-se leituras espectrais em laboratório com o sensor hiperespectral Fieldspec Spectroradiometer, das amostras em condições de campo (ACC) e posteriormente de terra fina seca em estufa (TFSE) nos comprimentos de onda que foram de 400 a 2440 nm. Foram realizadas análises químicas e físicas do solo com metodologias já consagradas na literatura. Com base nos dados foram realizadas as discussões para verificação de: 1. Efeitos causados pela aplicação de vinhaça nos atributos químicos do solo; 2. Determinação de propriedades químicas e físicas por meio da resposta espectral do solo; 3. Alterações na resposta espectral causadas pela aplicação da vinhaça em doses parceladas.


Palavras-chave: Espectrorradiometria; Resíduo agroindustrial; Monitoramento ambiental

## ABSTRACT


### Spectral response of a Hapludox submitted to different doses of fermentation residue (vinace)

Remote sensing techniques are becoming a fast source of in formations, not destructive and at low cost. This work aim to evaluate the chemicals and physicals changes promoted by sugar cane residue application (vinace) on the spectral response of a Hapludox soil. The experiment was developed on Areão farm (22º43’ S, 47º38’ O e altitude of 511m) on experimental area of the Biosystems Engineering Department of ESALQ/USP, Piracicaba, São Paulo state, Brazil. The experimental arrangement was in completely randomized design, with 6 treatments and 4 repetitions, being the treatment 1 with no irrigation and conventional fertilizer in planting; treatment 2 fertirrigated with chemicals, treatments 3, 4, 5 e 6, fertirrigated with 0.5, 1, 2 e 3 times the recommended doses by CETESB, respectively. To monitor the soil moisture was used tensiometers in depths of 0-20, 20-40, 40-60 e 60-80 cm. The residue doses were divided into four applications applied every two months during the crop cycle, soil samples were collected in the same period and depths previously established. The spectral curves were obtained in laboratory by the Hiperespectral Fieldspec Spectroradiometer sensor, for samples in field conditions (ACC) and air-dried soils (TFSE), for wavelengths ranging from 400 to 2440 nm. Were realized chemicals and physical soil analysis with conventional methodologies and so these data were discussed for verification of: 1. Vinace application effects on soil chemicals and physicals properties; 2. Determination of chemical and physical properties by soil spectral response; 3. Spectral response alterations due application of vinace in split doses.


Keywords: Spectroradiometry; Agro-industrial residue; Environmental monitoring

# 1 INTRODUÇÃO

Na década de 70, com o advento do Programa Nacional do Álcool (Proálcool), a cultura da cana-de-açúcar estendeu-se para diversas áreas do país. Estudos apontam para um aumento de 10% na moagem de cana-de-açúcar na safra 2010/11, projetando valores de 595,89 milhões de toneladas, contra os 541,50 milhões de toneladas da safra 2009/10, com área plantada próxima a 7,8 milhões de hectares (UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR - UNICA, 2011).

Vinculado ao aumento da produção da cana-de-açúcar, espera-se também um aumenta da quantidade de resíduos provenientes da indústria do álcool, dentre eles a vinhaça, merecedora de destaque, originada no processo de fabricação do etanol a partir da destilação do caldo fermentado da cana-de-açúcar. Este resíduo agroindustrial possui alto potencial fertilizante, porém muitos cuidados devem ser adotados para sua utilização na agricultura, uma vez que seu impacto como poluente pode ser maior que o esgoto doméstico (FREIRE; CORTEZ, 2000).

Para controlar a quantidade de vinhaça aplicada pelas usinas, foi desenvolvida uma equação pela Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB), vinculada a secretaria do meio ambiente do estado de São Paulo, para quantificar o volume de vinhaça a ser aplicado, minimizando o risco da contaminação do lençol freático; (CETESB, 2005).

A área de cana-de-açúcar irrigada no Brasil vem crescendo a cada ano visando uma maior produtividade e longevidade dos canaviais. Atualmente os sistemas mais utilizados são os autopropelidos e pivôs rebocáveis. Os benefícios da irrigação na cana-de-açúcar dependem diretamente do grau de déficit hídrico ao qual se submete a cultura em sistemas de sequeiro, no entanto a opção por implantação de sistemas de irrigações pode vir a ser um grande aliado na utilização da vinhaça, abrindo espaço para aplicações parceladas desta nos campos, reduzindo assim os riscos de contaminações ambientais.

Considerando que a radiação eletromagnética refletida pelas amostras de solo, interage com diversos componentes (mineralogia, textura e propriedades químicas) o sensoriamento remoto pode ser uma importante ferramenta para detectar áreas com a presença de resíduos industriais nos solos, como por exemplo, a vinhaça. Dessa forma, podendo ser usado na agricultura como uma ferramenta no monitoramento ambiental (DEMATTÊ et al., 2004).

Dados espectrais obtidos da superfície terrestre nos comprimentos de onda de 400 a 2500nm podem auxiliar na detecção e quantificação de alterações ambientais (BEN-DOR;

BANIM, 1995). Huete (1996) enfatiza a importância de estudos de dados radiométricos de laboratório como base para a interpretação de imagens de satélite. Tal afirmação se justifica, com o advento de novos sensores, hiperespectrais, como o Airborne Visible Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) (VANE et al., 1993), Geophysical Evironment Reserarch Imaging Spectrometer (GERIS) e o Multispectral Infrared and Visible Imaging Spectrometer (MIVIS), os quais produzem resultados similares quando comparados com os obtidos por sensores de laboratório (DEMATTÊ, et. al., 2004).

Grande número de estudos tem utilizado técnicas de sensoriamento remoto em ciências do solo para avaliação de atributos químicos e físicos (VISCARRA ROSSEL et al., 2006), fertilidade (VISCARRA ROSSEL et al., 2010), densidade (DEMATTÊ et al., 2010), umidade (DEMATTÊ et al., 2006) entre outros. De acordo com Ben-Dor et al. (1999), a resposta espectral dos solos é afetada principalmente por alterações na composição química, teor de matéria orgânica, granulometria, mineralogia da fração argila, tendo ainda o incremento dos efeitos de umidade e rugosidade quando são realizadas amostragem a campo e efeitos atmosféricos quando utilizados dados aéreos e orbitais.

Embora a aplicação da vinhaça apresente vantagens, nas ultimas duas décadas foi aplicada de forma indiscriminada no solo. Dessa forma, podendo causar impactos negativos, como o aumento nas quantidades de potássio não compatível com os outros elementos, resultando em diminuição da fertilidade, produção e risco de poluição da água. Assim é imprescindível o monitoramento do efeito desse resíduo no ambiente através de um método rápido como o sensoriamento remoto (DEMATTÊ et al., 2004).

O presente trabalho teve como objetivos: 1. Verificar as alterações químicas causadas no solo por aplicações de diferentes doses de vinhaça; 2. Gerar modelos para determinação de algumas propriedades químicas e físicas por meio da resposta espectral do solo; 3. Verificar as variações nas curvas espectrais do solo decorrentes da aplicação deste subproduto industrial, utilizando sensoriamento remoto laboratorial, para amostras de terra fina seca em estufa, geralmente utilizada neste tipo de trabalho e amostras em condições de campo. Espera-se que os resultados obtidos possam nortear o uso do sensoriamento remoto de laboratório para o monitoramento ambiental de aplicação da vinhaça na agricultura.

**Referências**

BEN-DOR, E.; BANIN, A. Near-infrared analysis as a rapid method to simultaneously evaluate several soil properties. **Soil Science Society of America Journal**, Baltimore, v. 59, p. 364-372, 1995.

BEN-DOR, E.; IRONS, J.R.; EPEMA, G.F. Soil reflectance. In: RENCEZ, A.N. (Ed.). **Remote sensing for the earth sciences**: manual of remote sensing. New York: John Wiley, 1999. p. 111-188.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Norma técnica P4.231**. São Paulo, 2005. 17 p.

DEMATTÊ, J.A.M.; GAMA, M.A.P.; COOPER, J.C.A.; NANNI, M.R.; FIORIO, P.R. Effect of fermentation residue on the spectral reflectance properties of soils. **Geoderma**, Amsterdam, v. 120, p. 187-200, 2004.

DEMATTÊ, J.A.M.; NANNI, M.R.; SILVA, A.P.; MELO FILHO, J.F.; SANTOS, W.C.; CAMPOS, R.C. Soil density evaluated by spectral reflectance as an evidence of compaction effects. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 31, p. 403-422, 2010.

DEMATTÊ, J.A.M.; SOUSA, A.A.; ALVES, M.; NANNI, M.R.; FIORIO, P.R.; CAMPOS, R.C. Determining soil water status and other soil characteristics by spectral proximal sensing. **Geoderma**, Amsterdam, v. 135, p. 179-195, 2006.

FREIRE, W.J.; CORTEZ, L.A.B. **Vinhaça de cana-de-açúcar**. Guaíba: Agropecuária, 2000. 203 p.

HUETE, A.R. Extension of soil spectra to the satellite: atmosphere, geometric, and sensor consideration. **Photo Interpretation**, Paris, v. 34, p. 101-114, 1996.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR. Disponível em: <http://www.unica.com.br/>. Acesso em: 18 set. 2011.

VANE, G.; GREEN, R.O.; CHRIEN, T.G.; ENMARK, H.T.; HANSEN, E.G.; POSTER, W.N. The Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS). **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 44, p. 127-143, 1993.

VISCARRA-ROSSEL, R.A; RIZZO, R.; DEMATTÊ, J.A.M.; BEHRENS, T. Spatial modeling of a soil fertility index using visible-near-infrared spectra and terrain attributes. **Soil Science Society of America Journal**, Madson, v. 74, p. 1293-1300, 2010.

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 silmultaneous assessment of various soil properties. **Geoderma**, Amsterdam, v. 131, p. 59-75, 2006.

# 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

## 2.1 Cultura da cana-de-açúcar

A cadeia produtiva da cana-de-açúcar tem grande importância no cenário sócio-econômico brasileiro. Ela é responsável por uma expressiva parte do produto interno bruto, possibilitando o uso de uma fonte de energia renovável, gerando divisas com a exportação de açúcar e álcool, além de ser uma atividade de criação intensa de empregos.

A partir da criação do Programa Nacional do Álcool (Proálcool) em 1975, o governo federal passou a subsidiar a produção de álcool como combustível, porém somente na década de 80 é que ocorreu um crescimento vigoroso em investimentos, subsídios e produtividade; em vista disto, as áreas de produção de cana-de-açúcar (*Saccharum sp.*) vêm aumentando continuamente, sobretudo na região Centro-Oeste do Brasil (SILVA et al., 2007).

O Brasil é o principal produtor mundial de cana-de-açúcar, onde se pode também destacar a participação da Índia e China (FNP, 2008). Os maiores estados produtores de cana no país são: São Paulo, Minas Gerais, Espírito Santo, Paraná, Mato Grosso, Rio de Janeiro, Bahia, Roraima e Paraíba. Na média, 55% da produção de cana brasileira é transformada em álcool e 45% em açúcar. Estudos apontam para um aumento de 10% na moagem de cana-de-açúcar na safra 2010/11, projetando a 595,89 milhões de toneladas, contra os 541,50 milhões de toneladas da safra 2009/10, com área plantada próxima a 7,8 milhões de hectares (UNICA, 2011).

Concomitantemente ao aumento da produção de álcool, é também acrescida a produção de vinhaça, um subproduto oriundo da sua fabricação. Para cada litro de álcool são produzidos de dez a dezoito litros de vinhaça, cuja composição é bastante variável dependendo principalmente da composição do vinho (ROSSETO, 1987). Com base na produção esperada e rendimento industrial da cana, pode-se prever no melhor do cenários uma produção de 300 bilhões de litros de vinhaça durante a safra 2010/11.

## 2.2 Uso e composição química da vinhaça

A aplicação de vinhaça na lavoura, bem como a fertirrigação, são práticas adotadas por todas as usinas, sendo tecnologias conhecidas e bem definidas com inúmeros ensaios que

comprovam os resultados positivos obtidos na produtividade agrícola, associados à economia de adubos minerais (PENATTI et al., 1988). A grande vantagem no emprego da vinhaça é que ela pode substituir, em grande parte, os nutrientes da adubação mineral, proporcionando um aumento na produtividade da cana-de-açúcar devido à sua aplicação (AGUJARO, 1979). No entanto, apesar destes efeitos benéficos, Centurión et al. (1989) alertam que, quando aplicada em altas taxas, conduz efeitos indesejáveis, como o comprometimento da qualidade da cana para produção de açúcar, poluição do lençol freático e, até, a salinização do solo.

Para controlar a quantidade de vinhaça aplicada pelas usinas, minimizando o risco da contaminação do lençol freático, a Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB), ligada a secretaria de meio ambiente do estado de São Paulo, através de diversos estudos, propôs uma equação para quantificar o volume de vinhaça a ser aplicado (CETESB, 2005).

A composição química da vinhaça é bastante variável dependendo, principalmente, de fatores como a natureza, composição da matéria prima, do sistema usado no preparo do mosto, do método de fermentação adotado e do sistema de condução da fermentação alcoólica, da raça de levedura utilizada, do tipo de aparelho destilador empregado, da maneira de destilação e do tipo de flegma separado (GLÓRIA; ORLANDO FILHO, 1984).

Dentre os componentes químicos da vinhaça, destacam-se, a matéria orgânica e o potássio, podendo-se observar que a quantidade de nutrientes é maior na vinhaça de mosto de melaço e menor na vinhaça de mosto de caldo (Tabela 2.1). Praticamente 60% da vinhaça produzida provêm de mosto de caldo e 40% de mosto misto.

Após analisarem a composição química de diferentes tipos de vinhaça produzidas em diferentes regiões do Brasil, Silva e Orlando Filho (1981) mostraram que a vinhaça é rica em matéria orgânica e nutrientes minerais, tais como o potássio e cálcio. Estes mesmos autores constataram que a composição química da vinhaça é muito heterogênea, em função do tipo de matéria-prima e outros aspectos, concluindo que o potássio é o elemento predominante, seguindo-se do cálcio, enxofre (sulfato), nitrogênio, fósforo e magnésio; dos micronutrientes, o ferro é o que aparece em maior concentração, seguido do manganês, cobre e zinco, em pequenas concentrações.

Tabela 2.1 – Composição química média da vinhaça obtida a partir de fermentação de diferentes mostros. Adaptado de Prada et al. (1998)

| Elementos | Vinhaça de mosto | | |
|---|---|---|---|
| | **Melaço** | **Caldo** | **Misto** |
| pH | 4,2-5,0 | 3,7-4,6 | 4,4-4,6 |
| Temperatura (°C) | 80-100 | 80-100 | 80-100 |
| DBO (mg $L^{-1}$ $O_2$) | 25 | 6.000 - 16.500 | 19.8 |
| DQO (mg $L^{-1}$ $O_2$) | 65 | 15.000 - 33.000 | 45 |
| Sólidos totais (mg $L^{-1}$) | 81.5 | 23.7 | 52.7 |
| Sólidos voláteis (mg $L^{-1}$) | 60 | 20 | 40 |
| Sólidos fixos (mg $L^{-1}$) | 21.5 | 3.7 | 12.7 |
| N (mg $L^{-1}$ N) | 450 - 1.610 | 150 - 700 | 480 - 710 |
| $P_2O_5$ (mg $L^{-1}$) | 100 - 290 | 10 - 210 | 9 - 200 |
| $K_2O$ (mg $L^{-1}$) | 3.740 - 7.830 | 1.200 - 2.100 | 3.340 - 4.600 |
| CaO (mg $L^{-1}$) | 450 - 5.180 | 130 - 1.540 | 1.330 - 4.570 |
| MgO (mg $L^{-1}$) | 420 - 1.520 | 200 - 490 | 580.7 |
| $SO_4^-$ (mg $L^{-1}$) | 6.4 | 600 - 760 | 3.700 - 3.730 |
| C (mg $L^{-1}$) | 11.200 - 22.900 | 5.700 - 13.400 | 8.700 - 12.100 |
| Relação C/N | 16 - 16,27 | 19,7 - 21,07 | 16,4 - 16,43 |
| Matéria orgânica (mg $L^{-1}$) | 63.4 | 19.5 | 3.8 |
| Subst. redutoras (mg $L^{-1}$) | 9.5 | 7.9 | 8.3 |

## 2.3 Dinâmica dos componentes químicos da vinhaça

Cunha et al. (1981) relatam que a dinâmica do nitrogênio no solo tratado com resíduos orgânicos, tal como a vinhaça, é complexa, devido às transformações bioquímicas. O nitrogênio está presente na vinhaça, predominantemente na forma orgânica, e a mineralização é a primeira transformação biológica que ocorre no solo. O nitrato, por ser um ânion, não é retido em solos cuja predominância de cargas seja negativa apresentando, por isso, grande potencial de lixiviação, o que pode causar sérios problemas de poluição às águas subterrâneas, se movendo com outros sais solúveis para frente de molhamento (LELIS NETO, 2008).

Lyra (2003), concorda com Madejón et al.(2001) ao sugerirem que se pode esperar uma elevação na concentração de sais no solo e potencial risco de salinização com a aplicação de vinhaça ao longo dos anos, considerando-se a taxa de absorção de potássio pela planta, sua

concentração na vinhaça e a baixa condutividade elétrica (CE) observada no lençol freático, indicativo de reduzida lixiviação.

Glória e Orlando Filho (1984) constatam que as principais alterações causadas pela aplicação da vinhaça no solo são a elevação do pH, aumento da disponibilidade de alguns íons, aumento da capacidade de troca catiônica (CTC) devido a adição de matéria orgânica, aumento da capacidade de retenção de água, melhoria da estrutura física do solo. A vinhaça deve ser vista, também, como agente do aumento da população e atividade microbiana no solo. O aumento no pH dos solos tratados com vinhaça é observado principalmente em áreas cultivadas há mais tempo (SILVA; RIBEIRO, 1998), sendo que de imediato observa-se uma redução considerável no pH, para posteriormente, elevar-se abruptamente, podendo alcançar valores superiores a sete; este efeito está ligado à ação dos microrganismos (ROSSETTO, 1987).

Cunha et al. (1981) estudando a utilização de vinhaça como fertilizante e condicionador de solos, observaram que a acumulação de potássio no perfil não foi grande, ficando este elemento retido na camada de 0,50 m de profundidade, sendo que sua lixiviação foi pequena, acompanhando a drenagem interna no perfil.

Com relação ao nitrato, um dos maiores problemas citados na literatura acerca de contaminação de lençol freático, Madejón et al. (2001) observaram que, com a retirada da vegetação após cada colheita, os teores de nitrato se elevavam nos solos e concluíram que sua lixiviação abaixo da zona radicular pode ser desprezível quando esses compostos são aplicados em áreas vegetadas com emprego de práticas agrícolas adequadas, como a utilização de áreas afastadas de nascentes ou de regiões com lençol freático superficial.

Verificou-se unanimidade em relação à dosagem aplicada que apresentaria menores chances de contaminação de águas subterrâneas devendo ser relacionada ao tipo e condições do solo local, isto é, de acordo com o conteúdo de matéria orgânica, classe textural, existência de vinhaça residual, uma vez que esses exercem influência sobre a CTC, capacidade de armazenamento e infiltração de água no solo, além da profundidade do lençol freático, proximidade de nascentes e intensidade de atividade vegetal na área.

## 2.4 Uso do sensoriamento remoto na quantificação de atributos do solo

A estimativa de atributos de solos é um desafio que vem sendo buscado por pesquisadores da área de sensoriamento remoto. Metodologias com este objetivo vêm sendo desenvolvidos e testados, buscando o seu aperfeiçoamento.

A metodologia denominada NIRA (Near-Infrared Analysis) foi desenvolvido baseado nas informações do infravermelho próximo, em laboratório, com o objetivo de avaliar a radiação espectral relacionada aos aspectos químicos de materiais (STARK et al., 1986). Essa metodologia foi desenvolvida há 30 anos para uma rápida análise da umidade de grãos (BEN-GERA; NORRIS, 1968). O início dos estudos do infravermelho, data dos anos 50, com maior avanço e interesse nos anos 60, motivado pelas necessidades de aplicação no setor agrícola. Os métodos com avaliação espectral mostraram-se bem mais práticos e rápidos que os convencionais na agricultura (STARK et al., 1986). Apesar de iniciado há anos atrás, o uso da aquisição remota de espectros da superfície terrestre aumentou drasticamente na última década. Hoje os métodos do NIRA são bem aceitos e aplicados em várias áreas (NORRIS, 1988). Este método é conhecido por permitir analisar vários constituintes de um material ao mesmo tempo (STARK et al., 1986).

Em adição ao NIRA, Coleman et al. (1991) utilizaram desde o visível até o infravermelho para avaliação de propriedades do material solo, obtendo bons resultados na estimativa de matéria orgânica, argila e ferro. Ou seja, basicamente, os métodos de estimativa baseiam-se em equações lineares, que são constantemente calibradas em função da região de estudo e porção do espectro eletromagnético que se tem em mãos.

As feições espectrais de materiais de solos no visível e infravermelho (450-2500 nm) estão associadas a vibrações moleculares de grupos específicos. Esses módulos vibracionais são o fundamento dos estudos em faixas (ou bandas) espectrais (BEN-DOR; BANIN, 1995). Os minerais dos solos têm distintas “impressões digitais espectrais” em determinadas faixas de comprimento de onda, devido a absorções em bandas específicas ou combinadas, como por exemplo dos grupos $OH^-$ e $CO_3$ (HUNT; SALISBURY, 1970).

Portanto, esses métodos assumem que a concentração de um dado constituinte é uma combinação linear de várias feições de absorção. O método é empírico, e nenhum aspecto físico ou químico é realmente necessário. A reflectância espectral de uma dada superfície é extremamente complexa, sendo afetada pelo número e tipos de materiais presentes, sua

concentração, tamanho, peso e geometria de visada (CLARK; ROUSH, 1984). Além disso, os métodos de NIRA são baseados na medida de pequenas mudanças de absorbância que ocorrem em múltiplos comprimentos de onda.

Durante a última década, o sensoriamento remoto no estudo do solo em laboratório vem se desenvolvendo. Nestas condições, os parâmetros físicos permanecem constantes, não há problemas atmosféricos e os ruídos espectrais são mínimos, permitindo o uso de técnicas não destrutivas na quantificação dos solos (BEN-DOR; BANIN, 1995; MADEIRA NETTO, 1996; CAMPOS, 2002). Vários autores também vêm buscando respostas pelas análises de correlação entre atributos do solo e reflectância espectral (GALVÃO et al., 1997; DEMATTÊ; GARCIA, 1999; FIORIO; DEMATTÊ, 2009), como base para a quantificação. Da mesma forma, modelos de previsão de atributos dos solos têm apresentado alto potencial (MORRA et al., 1991; BEN-DOR et al., 1997; DEMATTÊ, et al., 2009; FIORIO; DEMATTÊ, 2009).

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. Posteriormente, Coleman et al. (1993) estabeleceram modelos estatísticos para estimativa dos atributos do solo por meio da reflectância obtida pelo sensor TM do Landsat. Apesar dos resultados terem sido pouco consistentes, os autores sugerem a continuidade do processo, o que é ratificado por Ben-Dor et al. (1999). Seguindo esta linha de trabalho, Nanni e Demattê (2001) e Fiorio et al. (2009) implementaram uma metodologia que permitiu quantificar alguns atributos do solo pelo sensor TM em satélite, com alto grau de confiabilidade.

Apesar dos atributos dos solos serem rotineiramente quantificados pelos métodos tradicionais, tanto em levantamentos de solos como em agricultura de precisão, estes estão dependentes da 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. Considerando ainda a importância e responsabilidade da quantificação dos solos na agricultura, o assunto continua complexo e sujeito a discussão, evidenciando a necessidade de maiores investigações.

## 2.5 Efeito da vinhaça na resposta espectral do solo

Vários estudos têm avaliado a resposta espectral como metodologia na identificação e quantificação de atributos químicos e físicos do solo. A resposta espectral do solo pode ser alterada por diversos fatores, tais como variações na constituição química, teor de matéria orgânica, textura, conteúdo de óxidos de ferro, material de origem e mineralogia (BEN-DOR et al., 1999).

Porém, poucos estudos investigam a relação entre a aplicação de resíduos industriais e sensoriamento remoto, como por exemplo o trabalho de Banninger (1986) o qual avaliou metais pesados em solos e plantas por sensoriamento remoto por imagens orbitais.

Demattê et al. (2004) realizaram um trabalho para avaliar as alterações químicas causadas pela aplicação de vinhaça e sua interação com a resposta espectral em laboratório, utilizando-se de amostras de dois tipos de solos, Neossolo Quartizarênico e Argissolo Vermelho, com adição de vinhaça em laboratório. Ainda segundo os autores, a metodologia proposta foi capaz de diferenciar amostras de solos com aplicação de vinhaça e amostras de solo sem vinhaça, onde o incremento de cálcio e potássio foi responsável pelo aumento da reflectância das amostras com vinhaça.

## Referências

AGUJARO, R. O uso da vinhaça na Usina Tamoio como fertilizante. **Saccharum**, São Paulo, v. 2, n. 4, p. 23-27, 1979.

BANNINGER, C. Relationship between soil and leaf metal content and Landsat MSS and TM acquired canopy reflectance data. In: SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING FOR RESOURCES DEVELOPMENT AND ENVIROMENT MANAGEMENT TO EN SHEDE, 1986, Enschede. **Proceedings…** Enschede: Elsevier, 1986. p. 195-200.

BEN-DOR, E.; BANIN, A. Near-infrared analysis as a rapid method to simultaneously evaluate several soil properties. **Soil Science Society of America Journal**, Baltimore, v. 59, p. 364-372, 1995.

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: ANDREW, N.R. (Ed.). **Remote sensing for the earth sciences:** manual of remote sensing. 3rd ed. Danvers: John Wiley, 1999. v. 3, p. 111-188.

BEN-GERA, I.; NORRIS, K. Determination of moisture content in soybeans by direct spetrophotometry. **Israel Journal of Agricultural Research**, Rehovot, v. 18, p. 124-132, 1968.

CAMPOS, R.C. **Determinação da cor do solo e sua utilização na estimativa dos teores de hematita**. 2002. 59 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

CENTURIÓN, R.E.B.; MORAES, V.A.; PERCEBON, C.M.; RUIZ, R.T. Destinação final da vinhaça produzida por destilarias autônomas e anexas, enquadradas no programa nacional do álcool. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 11., 1989, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: ABES, 1989. p. 7.

COLEMAN, T.L.; AGBU, P.A.; MONTGOMERY, O.L. Spectral differentiation of soils and soil properties: is it possible from space platforms? **Soil Science Society of America Journal**, Baltimore, v. 155, p. 283-293, 1993.

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 Society of America Journal**, Baltimore, v. 151, n. 5, p. 355-361, 1991.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Norma técnica P4.231**. São Paulo, 2005. 17 p.

CLARK, R.N.; ROUSH, T.L. Reflectance spectroscopy: quantitative analysis techniques for remote sensing applications. **Journal of Geophysics Research**, Washington, v. 89, p. 6329-6340, 1984.

CUNHA, R.C.A.; COSTA, A.C.S.; MASET FILHO, B.; CASARINI, D.C.P. Effects of irrigation with vinasse and dynamics of its constituents in the soil: I – physical and chemical aspects. **Water Science Technology**, London, v. 19, n. 8, p. 155-165, 1981.

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

DEMATTÊ, J.A.M.; FIORIO, P.R.; BEN.DOR, E. Estimation of soil properties by orbital and laboratory reflectance means and its relation with soil classification. **The Open Remote Sensing Journal,** Monterey, v. 2, p. 12-23, 2009.

FIORIO, P.R.; DEMATTÊ, J.A.M. Orbital and laboratory Spectral data to optimize soil analysis. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 66, p. 250-257, 2009.

FNP CONSULTORIA & COMERCIO. Cana-de-açúcar. In: _____. **Agrianual 2008:** anuário da agricultura brasileira. São Paulo, 2008. p. 235-264.

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.

GLÓRIA, N.A.; ORLANDO FILHO, J. Aplicação de vinhaça: um resumo e discussões sobre o que foi pesquisado. **Álcool e Açúcar**, São Paulo, v. 4, n. 15, p. 22-31, 1984.

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

HUNT, G.R.; SALISBURY, J.W. Visible and infrared spectra of minerais and rocks. II. Carbonate. **Modern Geology**, Lausanne, v. 2, p.23-30, 1970.

LELIS NETO, J.A. **Monitoramento de componentes químicos da vinhaça aplicados em diferentes tipos de solo**. 2008. 88 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiros”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

LYRA, M.R.C. **Toposseqüência de solos fertigados com vinhaça: contribuição para a qualidade das águas do lençol freático**. 2003. 122 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2003.

MADEIRA NETTO, J.S. Spectral reflectance properties of soils. **Photo Interpretation**, Paris, v. 34, p. 59-70, 1996.

MADEJÓN, E.; LOPEZ, R.; MURILLO, J.M.; CABRERA, F. Agricultural use of three (sugar-beet) vinasse composts: effect on crops and chemical properties of a Cambisol soil in the Guadalquivir river valley (SW Spain). **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Seville, v. 84, n. 1, p. 55-65, 2001.

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**, Baltimore, v. 55, p. 288-291, 1991.

NANNI, M.R.; DEMATTÊ, J.A.M. Is it possible estimate physical-chemical soil attributes by using laboratory and orbital sensors. In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF GEOSPATIAL INFORMATION IN AGRICULTURE AND FORESTRY, 3., 2001, Denver. **Proceedings…** Denver: Veridian, 2001. CD-ROM.

NORRIS, K.H. History, present state, and future, prospects for near infrared spectroscopy. In: CREASER, C.S.; DAVISE, A.M.C. (Ed.). **Analytical application of spectroscopy.** London: Royal Society of Chemistry, 1988. p. 3-8.

PENATTI, C.P.; CAMBRIA, S.; BONI, P.S.; ARRUDA, F.C.O.; MANOEL, L.A. Efeitos da aplicação de vinhaça e nitrogênio na soqueira da cana-de-açúcar. **Boletim Técnico Copersucar,** São Paulo, v. 44, p. 32-38, 1988.

PRADA, S.M.; GUEKEZIAN, M.; SUÁREZ-ILHA, M.E.V. Metodologia analítica para a determinação de sulfato em vinhoto. **Química Nova**, São Paulo, v. 21, n. 3, p. 249-252, 1998.

ROSSETTO, A.J. Utilização agronômica dos subprodutos e resíduos da indústria açucareira e alcooleira. In: PARANHOS, S.B. (Ed.). **Cana-de-açúcar:** cultivo e utilização. Campinas: Fundação Cargill, 1987. v. 2, p. 435-504.

SILVA, A.J.N.; RIBEIRO, M.R. Caracterização de um Latossolo Amarelo sob cultivo contínuo de cana-de-açúcar no Estado de Alagoas: propriedades químicas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, n. 2, p. 291-299, 1998.

SILVA, G.M.A.; ORLANDO FILHO, J. Caracterização da composição química dos diferentes tipos de vinhaça no Brasil. **Boletim Técnico Planalsucar,** São Paulo, v. 3, n. 8, p. 5-22, 1981.

SILVA, M.A.S.; GRIEBELER, N.P.; BORGES, L.C. Uso da vinhaça e impactos nas propriedades do solo e lençol freático. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 11, n. 1, p. 108-114, 2007.

STARK, E.; LUCHTER, K.; MARGOSHES, M. Near-infrared analysis (NIRA): a technology for quantitative and qualitative analysis. **Applied Spectroscopy Reviews**, Philadelphia, v. 22, n. 4, p. 335-399, 1986.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR. Disponível em: <http://www.unica.com.br/>. Acesso em: 18 set. 2011.

# 3 ALTERAÇÕES NOS ATRIBUTOS DO SOLO FERTIRRIGADO COM DIFERENTES DOSES DE VINHAÇA, VIA GOTEJAMENTO SUBSUPERFICIAL


## Resumo

A utilização da vinhaça como biofertilizante, torna-se importante no momento atual de expansão das áreas cultivadas com cana-de-açúcar; porém devido à sua alta capacidade poluente, cuidados devem ser atentados em sua aplicação, sendo a aplicação parcelada uma das alternativas. Neste sentido o presente trabalho foi desenvolvido, na área experimental do departamento de Engenharia de Biossistemas da ESALQ-USP, município de Piracicaba, SP, com objetivo de avaliar as alterações químicas no solo, decorrentes da aplicação de vinhaça. O arranjo experimental foi um delineamento inteiramente casualizado, constando de 6 tratamentos e quatro repetições. A aplicação da vinhaça foi realizada por gotejamento subsuperficial sendo o tratamento 1 sem aplicação de vinhaça, 2 fertirrigado com químicos, 3, 4, 5 e 6 com 0,5, 1, 2 e 3 vezes a dose recomendada pela CETESB. Observou-se que a aplicação parcelada de vinhaça, não proporcionou grandes variações nos atributos do solo, sendo possível visualizar um aumento nos teores de K para os tratamentos com maiores doses havendo também uma tendência de elevação do pH ao longo do tempo. A análise multivariada dos dados possibilitou a separação da testemunha dos demais tratamentos na maioria dos casos, havendo também uma tendência de agrupamento entre os tratamentos com maiores doses de vinhaça. Para profundidades acima de 40 cm, não foram verificadas alterações nos atributos químicos que pudessem ser associadas a aplicação da vinha, indicando que a lixiviação dos elementos presentes neste resíduo para camadas mais profundas foi insignificante.


Palavras-chave: Resíduo industrial; Biofertilizante; Impactos ambientais


## Abstract

The vinace use as biofertilizer becomes important on the actual moment of cultivated sugar cane areas expansion; however due their high pollutant capacity, much caution must be taken on their application, being one alternative way, the split application. In this sense, the present work was developed on experimental area of the Biosystems Department of ESALQ-USP, in Piracicaba, São Paulo State, Brazil, in order to evaluate soil chemicals alterations due vinace application. The experimental design was completely randomized design, with 6 treatments and 4 repetitions. The vinace application was implemented by subsuperficial drip, being the treatment 1 with no vinace application, 2 chemical fertirrigation, 3, 4, 5 e 6 with 0,5, 1, 2 e 3 times the CETESB dose. |It was observed that the split vinace application, did not provide higher variations on soil chemical properties, being possible see a increase on K concentrations for the treatments with higher doses, there is also a tendency of pH elevation over the time. The multivariate analysis allowed the separation between parcels without vinace application and others treatments; there is also a tendency of grouping for treatments with higher doses of vinace. For the depths above 40 cm, it was not observed alterations on chemicals properties that could be associated with vinace application, indicating that lixiviation of this residue element to a deeper layer were insignificant.

Keywords: Industrial residue; Biofertilizer; Environmental impacts

## 3.1 Introdução

Concomitantemente ao aumento da produção de álcool, é também acrescida a produção de vinhaça, um subproduto oriundo da sua fabricação. Para cada litro de álcool são produzidos de dez a dezoito litros de vinhaça, cuja composição é bastante variável dependendo principalmente da composição do vinho. Este resíduo agroindustrial possui alto potencial fertilizante, porém muitos cuidados devem ser adotados para sua utilização na agricultura, uma vez que seu impacto como poluente pode ser maior que o esgoto doméstico (FREIRE; CORTEZ, 2000).

Em meio aos efeitos associados à adição de vinhaça ao solo destaca-se a elevação do pH, que pode retornar aos valores originais após determinado período de tempo (RODELLA et al., 1983), a elevação da CTC, devido principalmente a ação coloidal da matéria orgânica presente na vinhaça, reduzindo o risco da lixiviação de cátions e o aumento dos teores de macronutrientes no solo (GLÓRIA; ORLANDO FILHO, 1983). Portanto, esta prática tem sido associada à melhoria da fertilidade do solo, devido ao fornecimento de nutrientes e incremento de matéria orgânica propiciado pelo resíduo. O uso agrícola da vinhaça e conseqüentemente redução dos riscos ambientais, fez com que o resíduo adquirisse valor econômico, a partir de 1975, passando de agente poluidor a condicionador químico e físico do solo (ROSSETTO, 1987).

Embora o Brasil ainda não possua uma política nacional específica para o uso de resíduos, já existem algumas leis e decretos que devem ser obedecidos para a utilização de subprodutos agroindustriais na agricultura (ABREU JÚNIOR et al., 2005). Devido a grande importância da utilização da vinhaça, a Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB), ligada a secretaria de meio ambiente do estado de São Paulo, através de diversos estudos, propôs uma equação para quantificar o volume de vinhaça a ser aplicado nos solos (CETESB, 2005).

A aplicação da vinhaça nos solos geralmente é realizada em doses únicas, sendo comum a utilização de sistemas de aspersão por canhões autopropelidos. Com o aumento das áreas irrigadas para produção de cana-de-açúcar, em especial atenção a região nordeste e centro-oeste (FARIAS et al., 2008), nasce uma grande possibilidade de aplicação parcelada deste biofertilizante. Sendo assim, uma das investigações imprescindíveis a se realizar é entorno do comportamento dos constituintes da vinhaça no solo quando aplicada de forma parcelada.

O presente trabalho realizado a campo visou avaliar as alterações químicas do solo, submetidos à aplicação de diferentes doses de vinhaça via gotejamento subsuperficial, utilizando doses geralmente recomendadas para este subproduto e superiores, aplicadas de forma parcelada, comparando estas com a fertirrigação química e adubação convencional sem aplicação de vinhaça.

## 3.2 Material e métodos

### 3.2.1 Caracterização do experimento

O experimento foi realizado na Fazenda Areão da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (ESALQ/USP), 22º41'55'' de latitude sul, 47º38'41'' longitude oeste e altitude de 511m; na área experimental do Departamento de Engenharia Biossistemas, situada no município de Piracicaba-SP. O clima da região é classificado no sistema Koppen como Cwa, denominado subtropical úmido, com pluviosidade anual em torno de 1.257 mm, sendo o período seco o inverno, as médias de temperatura são 22º C no mês mais quente, 18° C no mês mais frio e média anual de 21,4º C. O solo estudado é um Nitossolo Vermelho Eutroférrico (NVef) de acordo com a classificação brasileira de solos da Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias (EMBRAPA) (EMBRAPA, 1999). Foram realizadas coletas de solos antes a instalação do experimento para verificação das condições físicas e de fertilidade do solo, onde não foram encontradas variações espaciais significativas entre os atributos. As características químicas e físicas do solo antes da aplicação dos tratamentos podem ser observadas nas Tabelas 3.1 e 3.2, respectivamente.

Tabela 3.1 - Características químicas prévias do solo da área experimental

| Profundidade | pH | M.O. | P | K | Ca | Mg | H+Al | Al | SB | CTC | V |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $CaCl_2$ | $g.dm^{-3}$ | $mg.dm^{-3}$ | .....$mmol_c.dm^{-3}$..... | | | | | | | % |
| **0-20 cm** | 5,0 | 27 | 8 | 2,5 | 30 | 15 | 39 | 1 | 48 | 86 | 55 |
| **20-40 cm** | 5,2 | 20 | 5 | 1,7 | 28 | 14 | 33 | 0 | 43 | 77 | 57 |
| **40-60 cm** | 5,5 | 13 | 5 | 0,6 | 22 | 14 | 25 | 0 | 37 | 62 | 60 |
| **60-80 cm** | 5.6 | 12 | 5 | 0.5 | 19 | 12 | 24 | 0 | 31.5 | 55.5 | 62 |

Tabela 3.2 - Características físico-hídricas prévias do solo da área experimental

| Características | Unidade | Valor |
|---|---|---|
| Areia | $g.kg^{-1}$ | 210 |
| Silte | $g.kg^{-1}$ | 309 |
| Argila | $g.kg^{-1}$ | 481 |
| Densidade | $g.cm^{-3}$ | 1,2 |
| Capacidade de Campo | $cm^3 . cm^{-3}$ | 0,28 |
| Ponto de murcha permanente | $cm^3 . cm^{-3}$ | 0,20 |

### 3.2.2. Preparo da área e instalação do experimento

Com base nas análises químicas realizadas foram realizadas as devidas correções de acidez do solo, no intuito de se elevar a saturação por bases para 60%. É importante ressaltar que a área nunca havia recebido vinhaça.

Os sulcos para instalação do sistema de irrigação e plantio da cana foi realizado por um sulcador de duas linhas. Após a sulcagem da área, o sistema de gotejamento subsuperficial foi instalado, sendo que os tubos gotejadores foram alocados a uma profundidade de 20 cm. O plantio foi realizado visando obter de 12 a 16 gemas por metro linear com a variedade SP 891115. Para uma melhor utilização do sistema de irrigação selecionado, o sistema de plantio foi em fileiras duplas, sendo a configuração: 0,4 m entre linha de plantas e 1,4 m entre fileiras duplas, neste sentido, a distância entre as linhas de gotejo foi de 1,8 m (Figura 3.1).

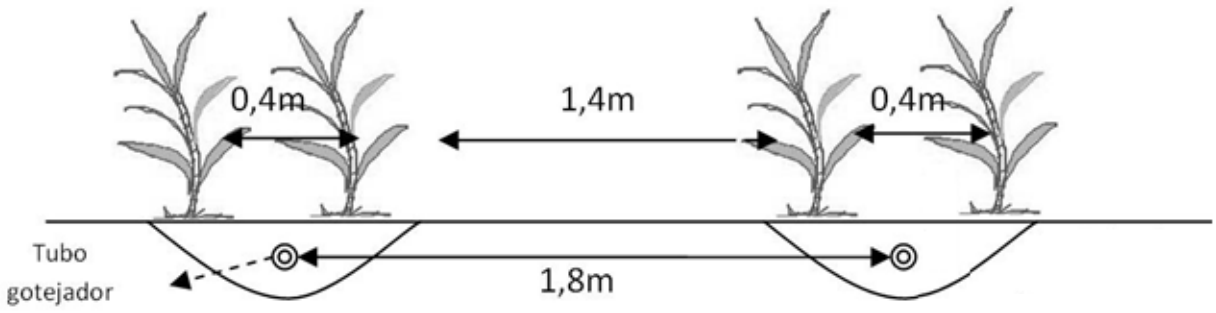


Figura 3.1 - Ilustração dos espaçamentos de plantio e entre tubos gotejadores utilizados no experimento

Foram plantadas 24 parcelas, com 5 linhas duplas de 8 m de comprimento cada uma. Desta forma cada parcela possuía aproximadamente 88 $m^2$ sendo a área total do experimento de 2.112 $m^2$. Para área útil, onde foram realizadas as coletas de solos, considerou-se as três linhas

duplas centrais, eliminando um metro no início e no final de cada parcela, resultando em 24 m² de área útil por parcela.

### 3.2.3 Descrição dos tratamentos e delineamento estatístico

O arranjo experimental foi em delineamento inteiramente casualizado (Figura 3.2), com seis tratamentos e quatro repetições. Todos os tratamentos foram fertirrigados, com exceção da testemunha (T1), e diferenciados pelas doses de vinhaça (Tabela 3.3).

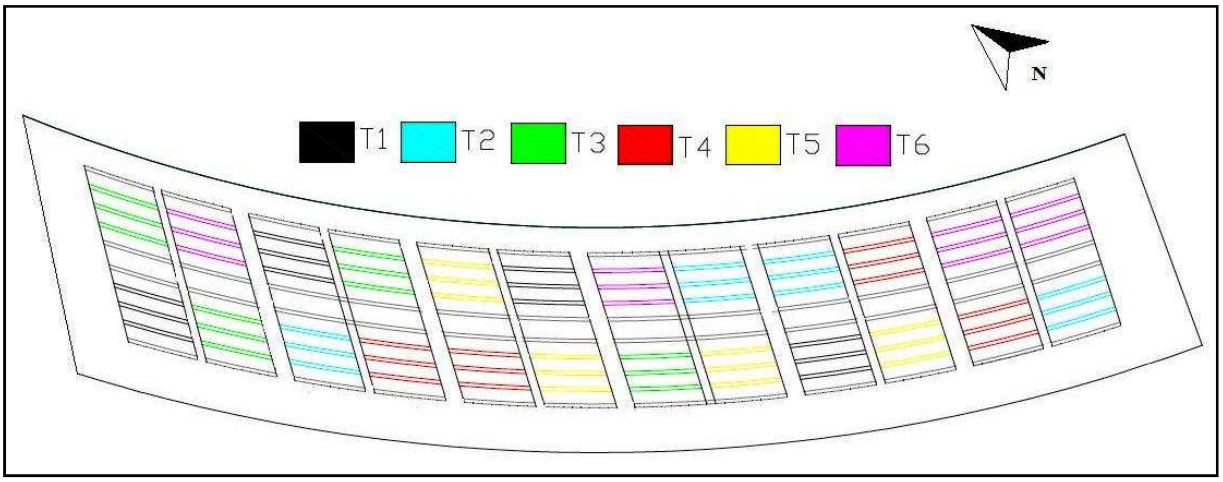


Figura 3.2 - Croqui da área experimental com alocação dos tratamentos

Tabela 3.3 - Descrição dos tratamentos

| Tratamento | Descrição |
|---|---|
| T1 | Sem Irrigação + adubação convencional (Testemunha) |
| T2 | Fertirrigada + Dose Zero ($D_0$) |
| T3 | Fertirrigada + 1/2x Dose CETESB ($D_1$) |
| T4 | Fertirrigada + Dose CETESB ($D_2$) |
| T5 | Fertirrigada + 2x Dose CETESB ($D_3$) |
| T6 | Fertirrigada + 3x Dose CETESB ($D_4$) |

### 3.2.4 Aplicação dos tratamentos

As adubações foram realizadas seguindo as recomendações de Raij et al. (1996) com base na fertilidade do solo e produtividade esperada. Na testemunha a adubação foi realizada junto ao plantio, no tratamento fertirrigado foi realizado ao longo do ciclo da cultura baseando-se na

marcha de absorção de nutrientes pela planta. A aplicação de vinhaça foi dividida em quatro aplicações, sendo a composição do resíduo aplicado apresentada na Tabela 3.5.

Tabela 3.4 – Resultado médio das análises químicas para macro e micronutrientes da vinhaça aplicada

| **N** | **P** | **K** | **Ca** | **Mg** | **S** | **C** | **Na** | **Cu** | **Fe** | **Zn** | **Mn** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| .....g/L..... | | | | | | .....mg/L..... | | | | | |
| 0.35 | 0.06 | 1.91 | 0.97 | 0.20 | 0.47 | 5.20 | 122.00 | 0.40 | 17.00 | 0.70 | 6.00 |

Com base nos resultados das análises químicas e físicas prévias da área experimental (Tabelas 3.1 e 3.2) e análises químicas da vinhaça a ser aplicada (Tabela 3.4), procedeu-se o cálculo da dose recomendada para este solo segundo a eq. (3.1) (CETESB, 2005).

$$m^3 \text{ vinhaça } ha^{-1} = \frac{[(0{,}05 \times CTC - ks) \times 3744 + 185]}{Kvi} \qquad (3.1)$$

Onde:

CTC = Capacidade de Troca Catiônica, expressa em $cmol_c.dm^{-3}$, a pH 7,0;

Ks = concentração de potássio no solo, expresso em $cmol_c.dm^{-3}$, a profundidade de 0,80 metros;

3744 = constante para transformar os resultados da análise de fertilidade, expressos em $cmol_c.dm^{-3}$ ou $meq.100cm^{-3}$ , para kg de potássio em um volume de um hectare por 0,80 metros de profundidade;

185 = kg de $K_2O$ extraído pela cultura por ha, por corte;

Kvi = concentração de potássio na vinhaça, expressa em kg de $K_2O$ /$m^3$.

### 3.2.5 Coleta de solo e análises químicas e físicas

Foram realizadas amostragens deformadas de solo, utilizando o trado holandês, sendo uma amostragem simples por parcela do experimento, com seis períodos de coleta; a primeira delas antes da aplicação dos tratamentos; da segunda a quinta coleta realizada 24 horas após cada aplicação da fertirrigação convencional e doses de vinhaça e a sexta coleta dois meses após o término das aplicações, para verificação residual da vinhaça no solo, sendo as datas das coletas os dias 21/06/2010, 19/08/2010, 20/10/2010, 15/12/2010, 20/02/2011 e 18/04/2011. As coletas

foram realizadas em quatro profundidades, variando de 20 em 20 cm; sendo assim foram coletadas 24 amostras para cada camada por período de coleta.

As análises químicas do solo constaram dos atributos pH (CaCl2), teor de matéria orgânica (M.O), fósforo (P), potássio (K), magnésio (Mg), cálcio (Ca), hidrogênio mais alumínio (H+Al), alumínio (Al), sendo assim possível os cálculos de soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica em pH 7 (CTC), saturação por bases (V%) e saturação por alumínio (m%) (RAIJ; QUAGGIO, 1983).

### 3.2.6 Análise estatística

As análises estatísticas foram realizadas pelo programa Statistical Analysis System (SAS ) (SAS, 1997). Os resultados das análises químicas do solo foram submetidos análise de variância pelo teste F a 5% de probabilidade e as médias comparadas pelo teste Tukey ($P < 0,05$), foram verificadas altercações entre os diferentes tratamentos dentro de cada período de coleta, bem como diferenças dos mesmos tratamentos em períodos de coletas diferentes. Posteriormente o conjunto de dados foi submetido à análise de componentes principais visando verificar as alterações globais ocorridas pela aplicação da vinhaça nos atributos do solo.

## 3.3 Resultados e Discussão

### 3.3.1 Condições climáticas no decorrer do experimento

As variações climáticas no decorrer do experimento foram monitoradas por uma estação meteorológica automática do departamento de Engenharia de Biossistemas da ESALQ, instalada na fazenda Areão, próximo a área experimental onde foi realizado o presente trabalho (ESALQ, 2001)

A precipitação total ocorrida no período de avaliação do presente trabalho, totalizou 1.404 mm, sendo o primeiro decêndio de Janeiro o mais chuvoso com precipitação acima de 250 mm. Nos dois primeiros decêndios de Junho, três decêndios de Agosto e o segundo de Setembro, não ocorreram precipitações. As chuvas ocorridas nos meses de Dezembro de 2010 e Janeiro de 2011 corresponderam a 45% do total para todo o período de avaliação experimental.

Com relação à temperatura os valores médios para o período foi de 21.9 °C, tendo como mínima registrada 9.4 °C e máxima de 34 °C nos meses de Junho de 2010 e Janeiro de 2011 respectivamente. Valores médios observados para umidade relativa foi de 80,5% e radiação global 18.28 $MJ/m^2.dia^{-1}$. Não existiram ocorrências de grandes precipitações entre os dias de aplicação dos tratamentos e coleta das amostras de solo, no entanto entre os períodos de coleta ocorreram grandes volumes de precipitação, principalmente nos meses de Dezembro, Janeiro e Fevereiro, o que pode ter afetado significativamente a dinâmica dos solutos no solo.

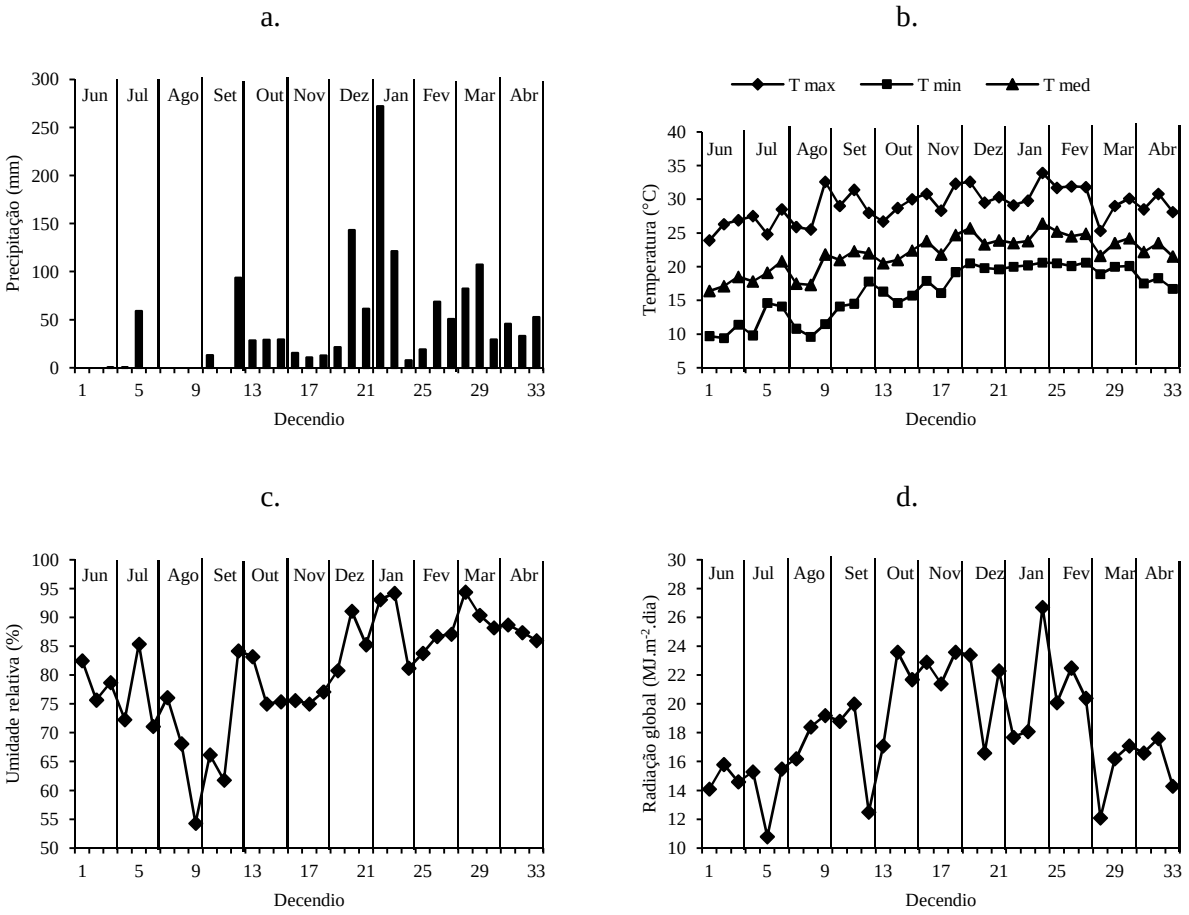


Figura 3.3 – Dados decendiais das variáveis climáticas para o período de avaliação experimental (Junho de 2010 a Abril de 2011): a. precipitação; b. temperatura; c. umidade relativa; d. radiação solar

### 3.3.2 Efeito das diferentes doses de vinhaça nos atributos químicos e físicos do solo

Os resultados das análises químicas para macronutrientes obtidos no experimento são apresentados nas Tabelas 3.5, 3.6, 3.7 e 3.8. Pode-se observar que para a profundidade de 0-20

cm (Tabela 3.5), quando analisadas as diferenças entre os tratamentos para um mesmo período de coleta, não foram identificadas diferenças estatisticamente significativas com relação ao pH, H+AL, SB, m%, V%, embora houve uma tendência de redução de pH no tratamento que não recebeu vinhaça (T1), o tratamento fertirrigado (T2) e os que receberam diferentes doses de vinhaça tiveram tendências de estabilidade ou aumento do pH do solo.

Silva e Ribeiro (1998) apontam que nos primeiros 10 dias após a aplicação da vinhaça pode ocorrer uma redução no pH do solo, no entanto ao longo do tempo os valores de pH se elevam até valores próximos a 7, caso ocorra utilização contínua nas áreas, efeito da decomposição da matéria orgânica, principal constituinte deste subproduto, promovida pela ação dos microorganismos do solo (ROSSETTO, 1987). No presente trabalho, embora a coleta tenha sido realizada apenas um dia após as aplicações de vinhaça, o efeito da decomposição das aplicações anteriores pode ser observado nos resultados, uma vez que os valores de pH durante as aplicações da vinhaça (coletas 2 a 6) passaram de 5,0 para 4,8 no tratamento 1, enquanto que no tratamento 6 esses valores subiram de 5,0 para 5,3, nos demais tratamentos estes valores se estabilizaram próximos a 5,0.

Com relação ao fósforo, embora observado diferenças significativas ao longo do experimento, seu comportamento foi irregular, não mostrando nenhuma relação direta com os tratamentos aplicados, podendo estar associado a processos de absorção pela cultura e reações deste elemento com o solo (Tabela 3.5). A matéria orgânica mostrou uma redução dos seus teores ao longo do tempo na camada superficial mesmo em tratamentos com altas doses de vinhaça, como é o caso do tratamento 6, que previamente a aplicação da vinhaça possuía teores de matéria orgânica próximos a 24 $g.kg^{-1}$ e após a ultima aplicação da vinhaça estes valores reduziram para 19 $g.kg^{-1}$ (Tabela 3.5), fato não esperado, uma vez que a vinhaça possui entre 2 a 6% de sólidos em suspensão, sendo em maior parte construído de matéria orgânica (BARROS et al., 2010).

Para todos os tratamentos, pode-se observar uma redução na soma de bases do solo, sendo que na ultima coleta, realizada dois meses após a colheita da cana, estes valores voltaram a subir, devido à reciclagem de nutrientes ocorridos pela decomposição dos restos vegetais. Embora a cana-de-açúcar seja uma gramínea, que possuem como característica a alta relação C/N em sua fitomassa, estudos realizados por Yaday et al. (1987), mostraram que nutrientes como K, Ca e Mg tiveram porcentagens significativas de liberação em um período de 120 dias, com valores de 70, 44 e 39% respectivamente, em especial o K, que para os 15 primeiros dias já haviam sido

liberados cerca de 35%, relacionando este evento ao fato de parte destes elementos estar ligados a compostos iônicos e moleculares solúveis; o que não acontece com o N, P e S permanecendo estes por mais tempo na palhada.

Tabela 3.5 - Resultados das análises químicas de solos para os seis períodos de coleta, na profundidade de 0-20 cm

| Trat. | Coleta | pH[1,2] | M.O[1,2] | P[1,2] | K[1,2] | Ca[1,2] | Mg[1,2] | H+Al[1,2] | Al[1,2] | SB[1,2] | CTC[1,2] | V% [1,2] | m% [1,2] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $CaCl_2$ | g.kg-1 | $mg.dm^{-3}$ | .....$mmol_c.dm^{-3}$..... | | | | | | | | |
| T1 | C1 | 4.5 Ab | 24.0 Aa | 5.0 Ab | 4.0 Aa | 32.2 Ab | 15.2 Aab | 41.2 Aa | 2.2 Aa | 51.5 Aab | 92.7 Aa | 55.5 Ab | 4.0 Aa |
| | C2 | 5.0 Aab | 17.5 Aab | 9.5 Aab | 4.0 Ba | 42.0 Aa | 17.8 Aa | 31.0 Aab | 1.0 Aab | 64.0 Aa | 95.0 Aa | 67.5 Aa | 1.8 Aab |
| | C3 | 5.0 Aab | 17.0 Aab | 5.3 Aab | 2.3 Ba | 27.5 Ab | 14.8 Aa | 29.5 Aab | 0.5 Aab | 45.0 Aab | 80.0 Aa | 55.8 Aab | 0.8 Aab |
| | C4 | 4.8 Aa | 15.3 Ab | 7.8 Aab | 3.3 Ba | 31.8 Aab | 12.8 Aab | 33.5 Ab | 0.3 Ab | 48.0 Aab | 84.3 Aa | 56.0 Aa | 0.5 Ab |
| | C5 | 4.8 Aab | 22.5 Aa | 11.8 Aa | 3.3 Ba | 29.0 Ab | 12.3 Ab | 41.5 Aa | 1.8 Aab | 45.0 Ab | 86.5 Aa | 52.0 Ab | 3.8 Aab |
| | C6 | 5.0 Aab | 20.5 Aab | 10.5 Aab | 2.5 Aa | 34.0 Aab | 13.8 Aab | 36.5 Aab | 1.8 Aab | 50.5 Ab | 87.0 Aa | 58.3 Aab | 3.5 Aab |
| T2 | C1 | 4.5 Aa | 23.8 Aa | 4.5 Aa | 4.0 Aab | 34.3 Aa | 15.5 Aa | 41.5 Aa | 2.7 Aab | 53.7 Aa | 95.2 Aa | 56.5 Aa | 4.0 Aa |
| | C2 | 5.0 Aa | 18.0 Ab | 8.3 Aa | 5.0 ABa | 35.5 Aa | 14.0 ABa | 36.0 Aa | 1.3 Aab | 53.0 ABa | 89.0 Aab | 59.8 Aa | 3.0 Aa |
| | C3 | 5.0 Aa | 17.0 Ab | 5.5 Aa | 3.5 ABbc | 29.3 Aa | 15.3 Aa | 30.3 Aa | 0.5 Aab | 47.8 Aa | 81.3 Ab | 58.0 Aa | 1.0 Aa |
| | C4 | 5.0 Aa | 16.5 Ab | 8.3 Aa | 4.5 ABab | 31.8 Aa | 14.0 Aa | 33.8 Aa | 0.5 Ab | 49.0 Aa | 85.0 Aab | 57.0 Aa | 1.0 Aa |
| | C5 | 5.0 Aa | 18.5 ABb | 10.3 Aa | 4.3 ABab | 33.8 Aa | 14.3 Aa | 32.5 Aa | 0.3 Ab | 51.0 Aa | 83.5 Aab | 61.3 Aa | 0.5 Aa |
| | C6 | 4.8 Aa | 18.0 Ab | 8.8 Aa | 2.5 Aa | 29.0 Aa | 12.0 Aa | 40.3 Aa | 4.0 Aa | 43.5 Aa | 83.8 Aab | 51.8 Aa | 8.8 Aa |
| T3 | C1 | 4.5 Aa | 22.5 Aa | 4.8 Aa | 4.0 Aa | 33.3 Aab | 15.8 Aa | 38.3 Aa | 2.0 Aa | 53.0 Aa | 91.3 Aa | 58.3 Aa | 4.3 Aa |
| | C2 | 5.0 Aa | 20.3 Aab | 10.8 Aa | 4.3 ABa | 38.0 Ab | 15.8 ABa | 33.5 Aa | 1.3 Aa | 57.0 ABa | 90.5 Aa | 63.0 Aa | 2.3 Aa |
| | C3 | 5.0 Aa | 18.3 Ab | 6.0 Aa | 2.8 ABb | 31.5 Aab | 16.0 Aa | 32.5 Aa | 0.8 Aa | 51.8 Aa | 82.5 Aa | 60.0 Aa | 1.5 Aa |
| | C4 | 5.0 Aa | 17.0 Ab | 8.5 Aa | 3.8 ABab | 32.8 Aab | 14.8 Aa | 34.3 Aa | 0.8 Aa | 51.3 Aa | 85.8 Aa | 58.5 Aa | 1.5 Aa |
| | C5 | 4.8 Aa | 19.3 ABab | 9.5 Aa | 3.5 Bab | 29.5 Ab | 12.0 Aa | 40.8 Aa | 2.5 Aa | 44.5 Aa | 85.3 Aa | 52.5 Aa | 5.3 Aa |
| | C6 | 5.0 Aa | 19.5 Aab | 14.8 Aa | 3.0 Aab | 33.8 Aab | 13.3 Aa | 35.0 Aa | 2.0 Aa | 50.0 Aa | 85.0 Aa | 59.0 Aa | 4.3 Aa |
| T4 | C1 | 4.8 Aa | 22.5 Aa | 4.8 Aa | 4.3 Ab | 33.5 Aa | 15.3 Aa | 41.5 Aa | 2.5 Aa | 53.0 Aa | 94.5 Aa | 56.5 Aa | 4.5 Aa |
| | C2 | 4.5 Aa | 19.3 Aab | 14.8 Aa | 5.0 ABa | 32.0 Aa | 11.8 Ba | 42.8 Aa | 1.5 Aa | 47.5 Ba | 90.3 Aab | 52.8 Aa | 7.5 Aa |
| | C3 | 5.0 Aa | 18.5 Aab | 7.0 Aa | 4.0 Aab | 32.3 Aa | 17.3 Aa | 34.8 Aa | 1.5 Aa | 52.3 Aa | 84.8 Ab | 61.5 Aa | 2.8 Aa |
| | C4 | 5.0 Aa | 17.0 Ab | 9.0 Aa | 4.8 ABa | 34.3 Aa | 14.8 Aa | 36.3 Aa | 0.8 Aa | 52.3 Aa | 89.0 Ab | 60.8 Aa | 1.5 Aa |
| | C5 | 5.0 Aa | 18.3 Bb | 8.5 Aa | 4.3 ABab | 29.8 Aa | 12.0 Aa | 37.3 Aa | 1.8 Aa | 45.0 Aa | 82.3 Ab | 54.8 Aa | 3.5 Aa |
| | C6 | 4.8 Aa | 17.5 Ab | 14.3 Aa | 2.8 Aa | 30.5 Aa | 10.8 Aa | 37.0 Aa | 3.8 Aa | 44.0 Aa | 81.0 Ab | 54.0 Aa | 8.5 Aa |
| T5 | C1 | 5.0 Aa | 23.8 Aa | 4.5 Ab | 4.0 Abc | 34.5 Aa | 15.8 Aab | 39.0 Aa | 2.3 Aa | 54.3 Aa | 93.3 Aa | 58.3 Aa | 4.6 Aa |
| | C2 | 4.8 Aa | 19.8 Aab | 10.3 Aab | 5.0 ABa | 35.5 Aa | 14.8 ABab | 40.8 Aa | 2.0 Aa | 54.0 ABa | 94.8 Aa | 57.3 Aa | 4.5 Aa |
| | C3 | 5.0 Aa | 19.5 Ab | 7.3 Aab | 3.5 ABbc | 32.8 Aa | 17.3 Aa | 35.0 Aa | 2.3 Aa | 52.5 Aa | 87.5 Aa | 63.8 Aa | 5.5 Aa |
| | C4 | 5.0 Aa | 17.8 Ab | 10.8 Aab | 4.8 ABab | 34.3 Aa | 15.0 Aab | 37.5 Aa | 1.3 Aa | 52.8 Aa | 90.3 Aa | 60.8 Aa | 2.8 Aa |
| | C5 | 5.0 Aa | 17.0 Bb | 14.0 Aab | 4.3 ABab | 30.0 Aa | 11.8 Ab | 41.3 Aa | 2.3 Aa | 44.8 Aa | 86.0 Aa | 51.8 Aa | 5.0 Aa |
| | C6 | 4.8 Aa | 19.3 Ab | 18.8 Aa | 3.0 Ac | 33.8 Aa | 12.5 Ab | 33.5 Aa | 2.3 Aa | 49.3 Aa | 82.8 Aa | 59.3 Aa | 5.0 Aa |
| T6 | C1 | 4.8 Aa | 24.0 Aa | 5.5 Aa | 4.0 Abc | 30.8 Aa | 14.8 Aa | 40.0 Ab | 2.3 Aa | 49.5 Aa | 89.5 Aa | 55.3 Aa | 5.0 Aa |
| | C2 | 5.0 Aa | 18.5 Aa | 14.8 Aa | 5.5 Aa | 37.0 Aa | 14.0 ABa | 40.0 Aab | 3.8 Aa | 55.0 ABa | 95.0 Aa | 58.0 Aa | 2.0 Aa |
| | C3 | 5.3 Aa | 19.8 Aa | 8.3 Aa | 4.0 Abc | 37.0 Aa | 18.8 Aa | 35.0 Aab | 3.0 Aa | 58.8 Aa | 89.0 Aa | 66.0 Aa | 7.3 Aa |
| | C4 | 5.3 Aa | 18.3 Aa | 14.8 Aa | 5.3 Aa | 38.8 Aa | 15.8 Aa | 40.0 Aab | 1.8 Aa | 58.5 Aa | 92.8 Aa | 63.0 Aa | 3.5 Aa |
| | C5 | 4.8 Aa | 19.0 ABa | 9.3 Aa | 5.0 Aab | 30.8 Aa | 12.5 Aa | 31.0 Aa | 2.8 Aa | 46.5 Aa | 77.5 Aa | 59.3 Aa | 7.0 Aa |
| | C6 | 5.0 Aa | 19.0 Aa | 9.0 Aa | 3.0 Ac | 32.5 Aa | 13.5 Aa | 35.0 Aa | 1.8 Aa | 49.0 Aa | 84.0 Aa | 58.0 Aa | 3.3 Aa |

[1] Médias seguidas da mesma letra maíscula não diferem os tratamentos para o mesmo período de coleta pelo teste tukey a 5% de probabilidade

[2] Médias seguidas da mesma letra minúscula não diferem os mesmos tratamentos no decorrer das coletas pelo teste tukey a 5% de probabilidade

Como era de se esperar, as médias para os teores de potássio foram superiores nos tratamentos com diferentes doses de vinhaça ao longo do tempo se comparados com a testemunha, não mostrando, no entanto diferença entre o tratamento fertirrigado com químicos tradicionais (T2). Os valores de K para a testemunha durante o período de aplicação dos tratamentos não ultrapassaram valores de 4 $mmol_c.dm^{-3}$, sendo observado para a segunda coleta valores mínimos de 2,3 $mmol_c.dm^{-3}$ enquanto que para o tratamento com maior dose de vinhaça os valores máximos e mínimos foram de 5,5 e 4 $mmol_c.dm^{-3}$ respectivamente.

Entre as diferentes doses de vinhaça, o tratamento que recebeu a metade da dose recomendada pela CETESB, mostrou teores inferiores de potássio para a maioria das coletas realizadas, no entanto não foi possível diferenciar as demais doses entre si. Para a coleta realizada dois meses após a colheita da cana-de-açúcar, os valores deste íon já haviam se estabilizado, não sendo possível diferenciar os tratamentos (Tabela 3.5).

Outro ponto importante a se observar é que não houve um aumento linear na concentração de potássio no solo, sendo que em alguns casos, não foram constatados diferenças significativas entre os tratamentos (Tabela 3.5). Segundo Werle et al. (2008), sendo o potássio um íon fracamente ligado as cargas do solo, sua lixiviação é de difícil controle, principalmente em solos bem drenados e em regiões com altos índices de precipitação. Aliado a este fator, este elemento é requerido em grandes quantidades pela cultura da cana-de-açúcar, que em média extrai cerca de 210 kg de $K_2O$ para cada 100 toneladas de colmo produzido (KONDÖRFER; OLIVEIRA, 2005).

O comportamento dos atributos do solo para as demais profundidades seguiram a mesma tendência da camada superficial, sendo que os teores de matéria orgânica foram regredindo até valores menores a 1%. A fertilidade também regrediu nas camadas mais profundas, como pode ser observado nas concentrações dos nutrientes essenciais no solo (Tabelas 3.6, 3.7 e 3.8). Por sua vez, os valores se saturação por bases sempre estiveram próximos ou superiores aos valores recomendados para a cultura da cana-de-açúcar, que é de 60%, até mesmo para profundidades maiores a 40 cm (MORELLI et al., 1992).

A saturação por alumínio (m%) não mostrou diferenças significativas entre os tratamentos para todas as coletas, sendo que estes valores não ultrapassaram em média a 9% em todo o período experimental. As ultimas coletas mostraram os maiores valores médios para m%, este fato está ligado a absorção das bases trocáveis pela cultura da cana durante seu desenvolvimento,

uma vez que, as bases Ca e Mg não foram repostos no tratamento fertirrigado e estes elementos são encontrados em doses muito baixas na vinhaça (PRADA et al., 1998).

As variações das concentrações dos nutrientes nas camadas inferiores a 40 cm (Tabelas 4.7 e 4.8) foram menos acentuadas, sendo observadas menores ocorrências de diferenciação estatísticas, tanto entre tratamento como para períodos de coleta. Cunha et al. (1981) estudando a utilização de vinhaça como fertilizante e condicionador de solos, observaram que a acumulação dos nutrientes provindo desta não foi grande, ficando retidos principalmente nas camadas de 0 a 50 cm de profundidade, com pequenas ocorrências de lixiviação.

Tabela 3.6 - Resultados das análises químicas de solos para os seis períodos de coleta, na profundidade de 20-40 cm

| Trat. | Coleta | pH[1,2] | M.O[1,2] | P[1,2] | K[1,2] | Ca[1,2] | Mg[1,2] | H+Al[1,2] | Al[1,2] | SB[1,2] | CTC[1,2] | V% [1,2] | m% [1,2] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $CaCl_2$ | g.kg-1 | mg.dm$^{-3}$ | .....mmol$_c$.dm$^{-3}$..... | | | | | | | | |
| T1 | C1 | 4.8 Aa | 16.3 Aa | 4.5 Ac | 2.5 Aa | 30.8 Aa | 14.5 Aa | 35.0 Aa | 2.0 Aa | 48.0 Aa | 83.0 Aa | 58.3 Aa | 4.5 Aa |
| | C2 | 5.0 Aa | 13.3 Ba | 8.3 Aab | 1.8 Ca | 36.3 Aa | 16.5 Aa | 25.8 Aa | 0.3 Aa | 55.5 Aa | 81.3 Aa | 68.3 Aa | 0.5 Aa |
| | C3 | 5.3 Aa | 14.0 Aa | 6.0 Abc | 1.5 Ba | 31.8 Aa | 18.0 Aa | 25.0 Aa | 0.0 Aa | 51.5 Aa | 76.5 Aa | 66.8 Aa | 0.0 Aa |
| | C4 | 5.0 Aa | 14.0 Aa | 8.0 Aa | 3.3 Ba | 30.5 Aa | 14.3 Aa | 34.5 Aa | 1.3 Aa | 47.5 Aa | 82.0 Aa | 58.0 Aa | 3.0 Aa |
| | C5 | 5.0 Aa | 21.0 Aa | 9.5 Aa | 2.5 Aa | 31.8 Aa | 13.5 Aa | 36.0 Aa | 0.8 Aa | 48.8 Aa | 84.8 Aa | 57.8 Aa | 1.3 Aa |
| | C6 | 5.0 Aa | 16.3 Aa | 7.8 Aab | 2.3 Aa | 34.3 Aa | 15.3 Aa | 29.8 Aa | 0.8 Aa | 51.8 Aa | 81.5 Aa | 63.8 Aa | 1.5 Aa |
| T2 | C1 | 5.0 Aa | 18.8 Aa | 3.8 Ab | 2.3 Aa | 31.5 Aa | 15.3 Aab | 32.5 Aa | 0.5 Aab | 49.0 Aab | 81.5 Aa | 60.0 Aa | 1.0 Aab |
| | C2 | 5.0 Aa | 15.8 ABab | 5.5 Aab | 4.3 ABa | 32.3 Aa | 13.5 ABab | 29.8 Aa | 0.8 Aab | 49.0 Aab | 78.8 Aa | 62.8 Aa | 1.5 Aab |
| | C3 | 5.0 Aa | 12.5 Ab | 5.8 Aab | 2.5 ABa | 28.8 Aa | 17.5 Aa | 25.8 Aa | 0.0 Ab | 48.0 Aab | 73.8 Aa | 65.3 Aa | 0.0 Ab |
| | C4 | 5.0 Aa | 15.5 Aab | 9.0 Aa | 4.5 ABa | 37.8 Aa | 18.5 Aa | 28.8 Aa | 0.0 Ab | 59.3 Aa | 88.0 Aa | 67.0 Aa | 0.0 Ab |
| | C5 | 5.3 Aa | 15.5 Aab | 8.8 Aa | 4.8 Aa | 34.8 Aa | 16.5 Aab | 27.3 Aa | 0.0 Ab | 54.5 Aab | 81.8 Aa | 66.5 Aa | 0.0 Ab |
| | C6 | 5.0 Aa | 13.8 Ab | 7.0 Aab | 2.8 Aa | 30.0 Aa | 12.3 Ab | 33.0 Aa | 2.3 Aa | 43.8 Ab | 76.8 Aa | 57.3 Aa | 4.8 Aa |
| T3 | C1 | 4.8 Aa | 17.5 Aa | 4.5 Ab | 2.3 Aa | 32.8 Aa | 16.3 Aa | 32.3 Aa | 1.3 Aa | 51.5 Aa | 83.8 Aa | 61.3 Aa | 2.8 Aa |
| | C2 | 5.0 Aa | 18.5 Aa | 7.8 Aab | 3.3 Ba | 34.3 Aa | 15.0 ABa | 30.3 Aa | 0.8 Aa | 52.0 Aa | 82.3 Aa | 63.3 Aa | 1.5 Aa |
| | C3 | 5.5 Aa | 15.3 Aa | 5.8 Aab | 3.0 ABa | 31.0 Aa | 18.8 Aa | 24.3 Aa | 0.0 Aa | 52.0 Aa | 76.3 Aa | 68.3 Aa | 0.0 Aa |
| | C4 | 5.0 Aa | 13.0 Aa | 7.8 Aab | 3.8 ABa | 29.8 Aa | 14.3 Aa | 34.3 Aa | 2.0 Aa | 48.3 Aa | 82.5 Aa | 58.8 Aa | 5.5 Aa |
| | C5 | 5.0 Aa | 18.3 Aa | 8.5 Aa | 3.3 Aa | 29.5 Aa | 12.8 Aa | 32.0 Aa | 0.3 Aa | 45.5 Aa | 77.5 Aa | 58.8 Aa | 0.5 Aa |
| | C6 | 5.5 Aa | 17.0 Aa | 7.0 Aab | 2.8 Aa | 33.8 Aa | 16.5 Aa | 28.0 Aa | 1.0 Aa | 52.0 Aa | 80.0 Aa | 65.0 Aa | 2.3 Aa |
| T4 | C1 | 5.0 Aa | 17.5 Aa | 4.0 Ab | 2.5 Ab | 35.5 Aa | 18.0 Aa | 31.0 Aa | 0.5 Aa | 56.0 Aa | 87.0 Aa | 64.3 Aa | 1.0 Aa |
| | C2 | 5.0 Aa | 15.8 ABa | 6.8 Aab | 4.5 Aa | 29.0 Aa | 10.8 Ab | 30.3 Aa | 1.0 Aa | 43.3 Aa | 73.5 Ab | 58.5 Aa | 2.3 Aa |
| | C3 | 5.3 Aa | 15.0 Aa | 5.8 Aab | 3.8 Aab | 27.5 Aa | 16.5 Aab | 26.8 Aa | 0.5 Aa | 46.8 Aa | 73.5 Ab | 63.8 Aa | 1.3 Aa |
| | C4 | 5.0 Aa | 13.5 Aa | 7.5 Aa | 4.8 ABab | 35.8 Aa | 16.3 Aab | 25.8 Aa | 0.0 Aa | 54.8 Aa | 80.5 Aab | 67.8 Aa | 0.0 Aa |
| | C5 | 5.0 Aa | 15.5 Aa | 8.5 Aa | 3.3 Aab | 32.0 Aa | 13.3 Aab | 32.8 Aa | 0.8 Aa | 47.5 Aa | 80.3 Aab | 59.3 Aa | 1.5 Aa |
| | C6 | 4.8 Aa | 14.3 Aa | 6.8 Aab | 2.5 Aa | 32.5 Aa | 12.3 Aab | 31.5 Aa | 2.0 Aa | 46.8 Aa | 78.3 Aab | 59.3 Aa | 5.3 Aa |
| T5 | C1 | 5.0 Aa | 20.0 Ab | 4.5 Ac | 2.8 Abc | 34.8 Aa | 17.3 Aa | 32.5 Aa | 0.5 Aa | 55.0 Ab | 87.5 Aa | 62.8 Aa | 1.0 Aa |
| | C2 | 4.8 Aa | 16.3 ABb | 6.5 Abc | 4.8 Aa | 32.8 Aa | 14.3 ABa | 40.5 Aa | 2.0 Aa | 50.0 Aab | 90.5 Aa | 56.8 Aa | 4.8 Aa |
| | C3 | 5.3 Aa | 13.8 Ab | 6.0 Abc | 4.0 Aab | 34.0 Aa | 18.0 Aa | 25.8 Aa | 0.0 Aa | 54.0 Aa | 79.8 Aa | 67.5 Aa | 0.0 Aa |
| | C4 | 5.0 Aa | 12.5 Aab | 7.3 Abc | 4.8 ABbc | 35.8 Aa | 17.8 Aa | 27.3 Aa | 0.0 Aa | 55.8 Aa | 83.0 Aa | 67.3 Aa | 0.0 Aa |
| | C5 | 5.0 Aa | 13.3 Aab | 9.0 Aab | 3.5 Abc | 30.8 Aa | 13.8 Aa | 28.0 Aa | 0.0 Aa | 46.0 Aa | 74.0 Aa | 62.3 Aa | 0.0 Aa |
| | C6 | 4.8 Aa | 14.3 Aa | 10.5 Aa | 2.0 Aa | 31.0 Aa | 14.0 Aa | 32.8 Aa | 0.5 Aa | 39.8 Aa | 79.0 Aa | 58.5 Aa | 7.5 Aa |
| T6 | C1 | 5.0 Aa | 17.8 Aa | 4.0 Aa | 2.3 Aa | 30.8 Aa | 14.8 Aa | 32.5 Aa | 1.0 Aa | 47.8 Aa | 80.3 Aa | 59.3 Aa | 2.3 Aa |
| | C2 | 5.0 Aa | 15.3 ABa | 7.3 Aa | 4.8 Aa | 33.3 Aa | 14.3 ABa | 34.0 Aa | 0.3 Aa | 50.3 Aa | 84.3 Aa | 59.5 Aa | 0.5 Aa |
| | C3 | 5.3 Aa | 16.8 Aa | 5.3 Aa | 3.5 Aa | 34.8 Aa | 17.3 Aa | 28.8 Aa | 0.3 Aa | 54.5 Aa | 83.3 Aa | 65.5 Aa | 0.5 Aa |
| | C4 | 5.0 Aa | 15.5 Aa | 8.5 Aa | 5.3 Aa | 35.8 Aa | 16.8 Aa | 28.8 Aa | 0.0 Aa | 56.5 Aa | 85.3 Aa | 66.3 Aa | 0.0 Aa |
| | C5 | 4.8 Aa | 15.8 Aa | 7.5 Aa | 4.0 Aa | 30.3 Aa | 13.8 Aa | 39.5 Aa | 3.0 Aa | 46.0 Aa | 85.5 Aa | 56.0 Aa | 8.5 Aa |
| | C6 | 5.3 Aa | 13.3 Aa | 7.8 Aa | 2.3 Aa | 30.3 Aa | 15.5 Aa | 28.8 Aa | 0.3 Aa | 47.8 Aa | 76.5 Aa | 62.8 Aa | 0.5 Aa |

[1] Médias seguidas da mesma letra maíscula não diferem os tratamentos para o mesmo período de coleta pelo teste tukey a 5% de probabilidade

[2] Médias seguidas da mesma letra minúscula não diferem os mesmos tratamentos no decorrer das coletas pelo teste tukey a 5% de probabilidade

Tabela 3.7 - Resultados das análises químicas de solos para os seis períodos de coleta, na profundidade de 40-60 cm

| Trat. | Coleta | pH[1,2] | M.O[1,2] | P[1,2] | K[1,2] | Ca[1,2] | Mg[1,2] | H+Al[1,2] | Al[1,2] | SB[1,2] | CTC[1,2] | V% [1,2] | m% [1,2] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $CaCl_2$ | g.kg-1 | mg.dm$^{-3}$ | .....mmol$_c$.dm$^{-3}$..... | | | | | | | | |
| T1 | C1 | 5.0 Ab | 16.0 Aab | 3.0 Ab | 2.0 Aab | 35.0 Aa | 16.0 ABab | 28.0 Aa | 0.0 Aa | 54.0 Aab | 82.0 Aa | 66.0 Aa | 0.0 Aa |
| | C2 | 5.3 Aab | 11.3 ABab | 5.5 Abc | 2.5 Ba | 35.3 Aa | 17.3 Aa | 21.5 Aa | 0.0 Aa | 56.5 Aa | 78.0 Aab | 72.5 Aa | 0.0 Aa |
| | C3 | 6.0 Aa | 10.8 Aab | 5.8 ABbc | 0.8 Cb | 29.3 ABa | 16.3 Aa | 20.0 Aa | 0.0 Aa | 46.3 Abc | 66.3 Ac | 69.8 Aa | 0.0 Aa |
| | C4 | 5.3 Aab | 9.8 ABb | 7.8 Aab | 1.3 Bab | 31.5 Aa | 15.3 Ab | 26.5 Aa | 0.0 Aa | 49.0 Ac | 75.5 Abc | 64.8 Aa | 0.0 Aa |
| | C5 | 5.3 Aab | 17.3 Aa | 9.3 Aa | 1.8 Aab | 30.8 Aa | 14.0 Aab | 30.3 Aa | 0.5 Aa | 49.3 Aab | 79.5 Aab | 62.5 Aa | 1.0 Aa |
| | C6 | 5.5 Aab | 12.8 Aab | 7.8 Aab | 1.3 Aab | 31.3 Aa | 15.0 Aab | 24.3 Aa | 0.5 Aa | 47.8 Abc | 72.0 Aab | 66.3 Aa | 1.0 Aa |
| T2 | C1 | 5.4 Aa | 14.3 Aa | 3.3 Ac | 1.6 Aa | 30.0 Ba | 13.7 Bb | 24.0 Aa | 0.0 Aa | 45.3 Ca | 69.3 Ba | 65.3 Aa | 0.0 Aa |
| | C2 | 5.3 Aa | 11.8 ABab | 6.0 Aab | 3.0 ABa | 30.8 Ba | 13.5 Ab | 24.0 Aa | 0.0 Aa | 45.5 Ba | 69.5 ABa | 65.5 Ba | 0.0 Aa |
| | C3 | 6.0 Aa | 10.0 Aab | 5.3 ABbc | 2.3 Ba | 31.0 ABa | 17.0 Aab | 20.5 Aa | 0.0 Aa | 49.8 Aa | 70.3 Aa | 70.5 Aa | 0.0 Aa |
| | C4 | 5.5 Aa | 13.0 Aab | 8.0 Aa | 2.5 ABa | 36.3 Aa | 18.5 Aa | 25.0 Aa | 0.0 Aa | 57.0 Aa | 82.0 Aa | 69.5 Aa | 0.0 Aa |
| | C5 | 5.5 Aa | 11.0 Aab | 8.0 Aa | 2.3 Aa | 30.8 Aa | 15.0 Aab | 19.5 Aa | 0.0 Aa | 49.0 Aa | 68.5 Aa | 70.8 Aa | 0.0 Aa |
| | C6 | 5.3 Aa | 9.3 Ab | 5.5 Abc | 1.8 Aa | 30.5 Aa | 14.0 Ab | 21.8 Aa | 0.0 Aa | 46.3 Aa | 68.0 Aa | 68.0 Aa | 0.0 Aa |
| T3 | C1 | 5.2 Aa | 13.5 Aa | 4.0 Ac | 1.1 Ab | 30.0 Ba | 16.0 ABa | 26.5 Aa | 0.0 Aa | 47.0 ABa | 73.5 Ba | 64.0 Aa | 0.0 Aa |
| | C2 | 5.0 Aa | 13.0 Aa | 5.3 Ac | 3.0 ABa | 31.5 ABa | 14.8 Aa | 23.0 Aa | 0.0 Aa | 49.3 Ba | 72.3 ABa | 68.0 ABa | 0.0 Aa |
| | C3 | 5.8 Aa | 13.5 Aa | 5.8 ABbc | 2.0 Bab | 31.0 ABa | 17.3 Aa | 23.0 Aa | 0.0 Aa | 49.8 Aa | 72.8 Aa | 68.3 Aa | 0.0 Aa |
| | C4 | 5.8 Aa | 11.3 ABa | 7.5 Aab | 2.3 ABab | 30.3 Aa | 14.3 Aa | 24.5 Aa | 0.8 Aa | 49.8 Aa | 74.3 Aa | 66.5 Aa | 2.0 Aa |
| | C5 | 5.3 Aa | 14.0 Aa | 8.0 Aa | 2.3 Aab | 29.8 Aa | 13.5 Aa | 28.8 Aa | 0.0 Aa | 45.8 Aa | 74.5 Aa | 61.5 Aa | 0.0 Aa |
| | C6 | 5.8 Aa | 14.0 Aa | 5.0 Ac | 1.5 Aa | 34.3 Aa | 16.5 Aa | 22.5 Aa | 0.0 Aa | 52.3 Aa | 74.8 Aa | 70.8 Aa | 0.0 Aa |
| T4 | C1 | 5.0 Ab | 14.5 Ab | 4.0 Ac | 1.8 Aa | 31.3 Ba | 15.0 ABa | 25.0 Aa | 0.0 Aa | 48.0 ABa | 73.0 Ba | 65.8 Aa | 0.0 Aa |
| | C2 | 5.5 Ab | 10.0 ABab | 5.3 Abc | 3.5 ABa | 32.3 ABa | 13.8 Aa | 21.8 Aa | 0.0 Aa | 47.3 Ba | 69.0 ABa | 68.5 ABa | 0.0 Aa |
| | C3 | 6.0 Ab | 11.3 Aab | 5.5 ABbc | 2.8 ABa | 28.0 Ba | 16.5 Aa | 21.3 Aa | 0.0 Aa | 46.8 Aa | 68.0 Aa | 68.5 Aa | 0.0 Aa |
| | C4 | 6.0 Aab | 8.5 Bab | 6.8 Abc | 2.0 ABa | 32.5 Aa | 16.0 Aa | 19.5 Aa | 0.0 Aa | 50.8 Aa | 70.3 Aa | 72.3 Aa | 0.0 Aa |
| | C5 | 5.0 Aa | 13.0 Aab | 9.0 Aab | 3.3 Aa | 28.5 Aa | 12.8 Aa | 25.0 Aa | 0.0 Aa | 43.3 Aa | 68.3 Aa | 63.0 Aa | 0.0 Aa |
| | C6 | 5.3 Aa | 10.3 Aa | 5.0 Aa | 1.8 Aa | 29.0 Aa | 12.8 Aa | 23.3 Aa | 1.0 Aa | 43.5 Aa | 66.8 Aa | 65.0 Aa | 2.5 Aa |
| T5 | C1 | 5.0 Ab | 16.3 Aa | 3.8 Ab | 1.5 Ab | 32.0 ABab | 16.8 Aa | 25.0 Aa | 0.0 Aa | 50.3 BCa | 75.3 ABa | 67.0 Aa | 0.0 Aa |
| | C2 | 5.3 Aab | 9.0 ABb | 6.3 Aab | 4.3 Aa | 31.0 Bab | 14.8 Aa | 24.3 Aa | 0.3 Aa | 47.8 Ba | 72.0 ABa | 66.3 Ba | 0.5 Aa |
| | C3 | 6.0 Aa | 10.0 Ab | 6.8 Aa | 2.5 ABab | 36.3 Aa | 18.0 Aa | 21.3 Aa | 0.0 Aa | 55.0 Aa | 76.3 Aa | 72.0 Aa | 0.0 Aa |
| | C4 | 6.0 Aa | 10.5 ABb | 7.3 Aa | 2.5 ABab | 32.3 Aab | 16.0 Aa | 20.5 Aa | 0.0 Aa | 49.8 Aa | 70.3 Aa | 70.5 Aa | 0.0 Aa |
| | C5 | 5.5 Aab | 10.5 Ab | 7.5 Aa | 3.3 Aab | 27.5 Ab | 13.3 Aa | 22.0 Aa | 0.0 Aa | 43.0 Aa | 65.0 Aa | 65.8 Aa | 0.0 Aa |
| | C6 | 5.8 Aab | 9.0 Ab | 5.3 Aab | 1.3 Aa | 30.0 Aab | 15.8 Aa | 23.5 Aa | 1.0 Aa | 47.0 Aa | 70.5 Aa | 66.8 Aa | 2.5 Aa |
| T6 | C1 | 5.4 Aa | 15.3 Aa | 3.7 Ab | 1.4 Ab | 32.7 ABa | 14.7 ABab | 24.0 Aa | 0.0 Aa | 48.7 ABab | 72.7 Bab | 67.3 Aa | 0.0 Aa |
| | C2 | 5.3 Aa | 7.5 Bc | 6.5 Aa | 4.3 Aa | 31.8 ABab | 14.0 Aab | 20.5 Aa | 0.0 Aa | 47.5 Bb | 68.0 Bab | 69.8 ABa | 0.0 Aa |
| | C3 | 5.5 Aa | 13.5 Aab | 4.0 Bb | 3.5 Aa | 35.3 ABa | 15.5 Aab | 24.3 Aa | 0.0 Aa | 53.3 Aab | 77.5 Aa | 69.3 Aa | 0.0 Aa |
| | C4 | 5.5 Aa | 11.0 ABab | 7.0 Aa | 2.8 Aab | 35.0 Aa | 17.0 Aa | 21.0 Aa | 0.0 Aa | 57.3 Aa | 78.3 Aa | 72.8 Aa | 0.0 Aa |
| | C5 | 5.8 Aa | 11.5 Aab | 7.5 Aa | 3.3 Aa | 30.5 Aab | 13.0 Ab | 22.3 Aa | 0.0 Aa | 45.3 Ab | 67.5 Aab | 67.3 Aa | 0.0 Aa |
| | C6 | 5.8 Aa | 8.5 Abc | 5.3 Aab | 1.5 Ab | 27.8 Ab | 15.3 Aab | 19.5 Aa | 0.0 Aa | 45.0 Ab | 64.5 Ab | 70.0 Aa | 0.0 Aa |

[1] Médias seguidas da mesma letra maíscula não diferem os tratamentos para o mesmo período de coleta pelo teste tukey a 5% de probabilidade

[2] Médias seguidas da mesma letra minúscula não diferem os mesmos tratamentos no decorrer das coletas pelo teste tukey a 5% de probabilidade

Tabela 3.8 - Resultados das análises químicas de solos para os seis períodos de coleta, na profundidade de 60-80 cm

| Trat. | Coleta | pH[1,2] | M.O[1,2] | P[1,2] | K[1,2] | Ca[1,2] | Mg[1,2] | H+Al[1,2] | Al[1,2] | SB[1,2] | CTC[1,2] | V% [1,2] | m% [1,2] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $CaCl_2$ | g.kg-1 | mg.dm$^{-3}$ | .....mmol$_c$.dm$^{-3}$..... | | | | | | | | |
| T1 | C1 | 5.5 Aa | 16.0 Aa | 3.5 ABc | 1.4 Aab | 36.0 Aa | 16.0 Aa | 22.5 Aab | 0.0 Aa | 53.5 Aa | 76.0 Aa | 70.5 Aa | 0.0 Aa |
| | C2 | 6.0 Aa | 7.5 ABc | 6.8 Aab | 1.0 Aab | 31.8 ABa | 16.0 Aa | 17.0 Ab | 0.0 Aa | 48.8 Aa | 65.8 Aa | 74.3 Aa | 0.0 Aa |
| | C3 | 6.0 Aa | 8.3 Ac | 5.0 ABbc | 1.0 Cb | 33.0 Aa | 15.0 Aa | 18.0 Aab | 0.0 Aa | 48.3 Aa | 66.3 Aa | 72.8 Aa | 0.0 Aa |
| | C4 | 6.0 Aa | 8.5 ABabc | 7.8 Aa | 1.0 Aab | 32.3 Aa | 13.0 Aa | 19.5 Aa | 0.0 Aa | 46.3 Aa | 65.8 Ba | 70.5 Aa | 0.0 Aa |
| | C5 | 5.5 Aa | 13.8 Aab | 8.5 Aa | 2.0 Aa | 33.0 Aa | 13.5 Aa | 21.8 Aab | 0.0 Aa | 53.0 Aa | 74.8 Aa | 69.5 Aa | 0.0 Aa |
| | C6 | 5.5 Aa | 7.3 Abc | 5.3 Ab | 0.3 Ab | 25.3 Ba | 11.5 Aa | 16.5 Aab | 0.0 Aa | 39.0 Ba | 51.8 Aa | 70.3 Aa | 0.0 Aa |
| T2 | C1 | 5.6 Aa | 13.7 ABa | 3.0 Bc | 1.2 Aa | 33.7 ABa | 15.3 Ab | 21.0 Aa | 0.0 Aa | 50.3 ABa | 71.3 ABa | 70.7 Aa | 0.0 Aa |
| | C2 | 5.8 Aa | 9.5 Aab | 5.5 Aab | 1.5 Aa | 36.0 Aa | 13.3 ABb | 19.0 Aa | 0.0 Aa | 50.0 Aa | 69.0 Aa | 72.5 Aa | 0.0 Aa |
| | C3 | 6.0 Aa | 8.5 Aab | 5.3 ABbc | 1.3 BCa | 32.8 Aa | 14.3 Aab | 17.5 Aa | 0.0 Aa | 47.8 Aa | 65.3 Aa | 73.3 Aa | 0.0 Aa |
| | C4 | 6.0 Aa | 8.8 ABab | 7.5 Aa | 1.3 Aa | 33.3 Aa | 16.0 Aa | 20.0 Aa | 0.0 Aa | 47.0 Aa | 70.0 Ba | 71.3 Aa | 0.0 Aa |
| | C5 | 6.0 Aa | 9.8 Aab | 8.0 Aa | 2.8 Aa | 32.8 Aa | 13.0 Aab | 18.8 Aa | 0.0 Aa | 48.0 Aa | 66.8 Aa | 72.0 Aa | 0.0 Aa |
| | C6 | 5.8 Aa | 7.5 Ab | 5.5 Abc | 1.3 Aa | 28.5 ABa | 12.5 Ab | 16.8 Aa | 0.0 Aa | 42.3 ABa | 55.5 Aa | 70.5 Aa | 0.0 Aa |
| T3 | C1 | 5.5 Aa | 11.0 Ba | 4.0 ABc | 0.9 Ab | 32.0 Ba | 14.0 Aa | 20.0 Aa | 0.0 Aa | 47.0 Aa | 67.0 Ba | 70.0 Aa | 0.0 Aa |
| | C2 | 6.0 Aa | 9.5 Aa | 5.0 Abc | 1.8 Aab | 30.3 Ba | 14.8 ABa | 20.0 Aa | 0.0 Aa | 46.8 Aa | 66.8 Aa | 70.0 Aa | 0.0 Aa |
| | C3 | 6.0 Aa | 9.8 Aa | 5.5 ABab | 1.8 ABb | 32.3 Aa | 13.5 Aa | 19.5 Aa | 0.0 Aa | 46.8 Aa | 66.3 Aa | 70.8 Aa | 0.0 Aa |
| | C4 | 5.8 Aa | 8.5 ABa | 7.8 Aab | 1.8 Aab | 31.8 Aa | 13.8 Aa | 20.0 Aa | 0.0 Aa | 49.0 Aa | 67.0 Ba | 70.0 Aa | 0.0 Aa |
| | C5 | 5.8 Aa | 11.5 Aa | 7.0 Aa | 2.8 Aa | 31.3 Aa | 12.8 Aa | 21.0 Aa | 0.0 Aa | 46.3 Aa | 67.3 Aa | 68.5 Aa | 0.0 Aa |
| | C6 | 5.8 Aa | 8.0 Aa | 5.8 Aa | 0.8 Ab | 30.5 ABa | 13.8 Aa | 19.0 Aa | 0.3 Aa | 46.3 ABa | 59.0 Aa | 70.8 Aa | 0.5 Aa |
| T4 | C1 | 5.6 Aa | 10.8 Ba | 4.3 Ac | 1.4 Aa | 32.0 Ba | 14.0 Aa | 21.0 Aa | 0.0 Aa | 47.5 Aa | 68.5 Ba | 69.3 Aa | 0.0 Aa |
| | C2 | 5.8 Aa | 9.8 Aa | 5.3 Abc | 2.0 Aa | 33.5 ABa | 14.0 ABa | 19.8 Aa | 0.0 Aa | 48.5 Aa | 68.3 Aa | 71.0 Aa | 0.0 Aa |
| | C3 | 6.0 Aa | 10.5 Aa | 5.3 ABbc | 2.8 ABa | 31.5 Aa | 16.3 Aa | 19.0 Aa | 0.0 Aa | 49.5 Aa | 68.5 Aa | 72.0 Aa | 0.0 Aa |
| | C4 | 6.0 Aa | 6.5 Bb | 7.0 Aab | 2.8 Aa | 33.5 Aa | 15.0 Aa | 17.0 Aa | 0.0 Aa | 50.0 Aa | 67.8 Ba | 74.5 Aa | 0.0 Aa |
| | C5 | 6.0 Aa | 9.3 Aab | 9.3 Aa | 1.8 Aa | 30.0 Aa | 12.5 Aa | 20.0 Aa | 0.0 Aa | 44.0 Aa | 64.0 Aa | 68.8 Aa | 0.0 Aa |
| | C6 | 5.8 Aa | 9.3 Aab | 6.0 Abc | 1.3 Aa | 31.5 ABa | 14.3 Aa | 20.0 Aa | 0.3 Aa | 47.0 ABa | 65.3 Aa | 70.8 Aa | 0.5 Aa |
| T5 | C1 | 5.6 Aa | 12.5 ABa | 3.8 ABb | 1.0 Aa | 32.5 ABa | 15.0 Aa | 20.0 Aa | 0.0 Aa | 48.8 ABa | 68.8 Ba | 71.0 Aa | 0.0 Aa |
| | C2 | 5.5 Aa | 7.3 ABb | 6.3 Aab | 2.3 Aa | 31.8 ABa | 12.8 ABa | 24.5 Aa | 1.3 Aa | 46.0 Aa | 70.5 Aa | 66.5 Aa | 2.5 Aa |
| | C3 | 6.0 Aa | 7.8 Ab | 6.0 Aab | 1.8 ABa | 34.0 Aa | 14.5 Aa | 18.5 Aa | 0.0 Aa | 49.0 Aa | 67.5 Aa | 72.8 Aa | 0.0 Aa |
| | C4 | 6.0 Aa | 8.5 ABab | 7.3 Aa | 1.8 Aa | 34.0 Aa | 14.3 Aa | 18.0 Aa | 0.0 Aa | 50.8 Aa | 67.0 Ba | 73.0 Aa | 0.0 Aa |
| | C5 | 6.0 Aa | 9.5 Aab | 7.5 Aa | 2.5 Aa | 30.0 Aa | 12.8 Aa | 18.5 Aa | 0.0 Aa | 44.8 Aa | 63.3 Aa | 70.5 Aa | 0.0 Aa |
| | C6 | 6.0 Aa | 9.5 Ab | 6.3 Aa | 1.0 Aa | 33.0 ABa | 14.5 Aa | 20.3 Aa | 0.3 Aa | 48.5 ABa | 67.0 Aa | 71.5 Aa | 0.5 Aa |
| T6 | C1 | 5.6 Aa | 13.0 ABa | 3.7 ABb | 0.8 Ab | 36.0 Aa | 13.7 Aa | 19.3 Aa | 0.0 Aa | 50.7 ABab | 70.0 Bb | 72.3 Aa | 0.0 Aa |
| | C2 | 6.0 Aa | 6.0 Bc | 6.3 Aab | 1.8 Aab | 32.5 ABab | 11.5 Ba | 18.0 Aa | 0.0 Aa | 45.3 Aab | 63.3 Abc | 71.5 Aa | 0.0 Aa |
| | C3 | 6.0 Aa | 9.8 Aab | 4.0 Bb | 2.0 ABab | 37.0 Aa | 13.8 Aa | 18.8 Aa | 0.0 Aa | 52.8 Aa | 71.5 Ab | 73.8 Aa | 0.0 Aa |
| | C4 | 5.3 Aa | 11.8 Aab | 10.5 Aa | 2.0 Aab | 35.3 Aa | 15.0 Aa | 30.3 Aa | 1.8 Aa | 56.3 Aa | 86.5 Aa | 66.3 Aa | 3.3 Aa |
| | C5 | 6.0 Aa | 9.5 Aab | 7.0 Aab | 2.8 Aa | 32.5 Aab | 11.8 Aa | 19.0 Aa | 0.0 Aa | 45.8 Aab | 64.8 Abc | 70.5 Aa | 0.0 Aa |
| | C6 | 6.0 Aa | 11.5 Abc | 6.8 Aab | 1.0 Ab | 35.5 Ab | 16.0 Aa | 21.5 Aa | 0.3 Aa | 52.8 Ab | 68.8 Ac | 72.0 Aa | 0.8 Aa |

[1] Médias seguidas da mesma letra maíscula não diferem os tratamentos para o mesmo período de coleta pelo teste tukey a 5% de probabilidade

[2] Médias seguidas da mesma letra minúscula não diferem os mesmos tratamentos no decorrer das coletas pelo teste tukey a 5% de probabilidade

### 3.3.3 Análise de componentes principais para os atributos químicos do solo

A vinhaça é um subproduto com composição heterogênea, portanto sua utilização pode causar alterações nos componentes químicos e biológicos do solo de forma simultânea. Nestes casos, uma aplicação da análise multivariada pode facilitar a diferenciação e interpretação dos dados. Foi realizada a análise de componentes principais (ACP), uma das ferramentas estatísticas multivariadas mais simples (SHADMER et al., 1992).

Em todas as situações analisadas os dois primeiros componentes principais explicaram mais de 80% das variações dos atributos do solo, o que permite a utilização apenas desses para explicação da dimensão dos dados em análise (HAIR et al., 2006). Os elementos que mais influenciaram nos componentes principias foram em geral o teor de pH, M.O, K, SB e V% para o primeiro componente principal (CP1) e CTC, P e M.O para o segundo (CP2).

Na camada de 0 a 20 cm (Figura 3.4), a coleta realizada antes da aplicação dos tratamentos não mostra nenhum tipo de agrupamento entre as parcelas, bem como nenhuma das parcelas mostraram grandes variações da nuvem de pontos (outliers) indicando que as condições do solo no início do experimento eram homogêneas. Para as coletas 2, 4 e 5, foi possível separar a testemunha dos demais tratamentos, no entanto apenas na coleta 5 houve um agrupamento para o tratamento com maior dose de vinhaça (T6) e do tratamento fertirrigado com adubos químicos (T2), sendo que não houveram agrupamentos entre os tratamentos 3, 4 e 5. Valores positivos para o CP1 nesta profundidade está ligado a maiores valores de pH, M.O, K, SB e V%, indicando que para o tratamento quimicamente fertirrigado e com maiores doses de vinhaça os valores foram superiores para uma ou mais destas propriedades na coleta 5.

A coleta realizada dois meses após o termino das aplicações de vinhaça, não foram observadas diferenças entre os tratamentos, sugerindo que não existiu algum tipo de efeito residual da vinhaça no solo, com relação aos atributos em estudo (Figura 3.4). Alguns trabalhos já haviam constatado que os efeitos residuais da aplicação da vinhaça, não influenciaram significativamente a produtividade da cana de açúcar para cortes posteriores aos da aplicação do resíduo (CÓ JÚNIOR et al., 2008; SCHULTZ et al., 2010).

Quando analisada a camada de 20 a 40 cm (Figura 3.5), o comportamento dos componentes principais não variou muito daqueles discutidos sobre a camada superior, sendo possível a separação da testemunha em relação aos demais tratamentos em todas as coletas

realizadas após a aplicação da vinhaça, não sendo observado nenhum agrupamento entre estes. Na coleta 1, realizada antes da aplicação dos tratamentos, não houveram agrupamentos, o mesmo acontecendo com a coleta 6 que visou avaliar o efeito residual da vinhaça dois meses após o fim da aplicação dos tratamentos.

A aplicação da vinhaça em doses parceladas promoveu alterações significativas nos atributos avaliados até a profundidade de 40 cm, uma vez quem em camadas mais profundas, os componentes principais não diferenciaram adequadamente nenhum dos tratamentos (Figuras 3.6 e 3.7), para todos os períodos de coleta; no entanto é interessante se observar que as camadas mais profundas apresentaram maiores ocorrências de outliers se comparados com as camadas superficiais. É difícil relacionar este fenômeno a um evento específico, uma vez que pode estar ligado a diversos fatores, tais como erros pontuais na aplicação dos tratamentos, contaminação das amostras no momento da coleta de solos, ou mesmo erros associados a análises laboratoriais.

Observa-se que a aplicação parcelada de vinhaça no solo, tem potencial para maximizar o aproveitamento dos nutrientes provindos desta pela cultura da cana-de-açúcar, bem como minimizar os impactos de seus constituintes no decorrer do perfil do solo e conseqüentemente nos corpos d’água subterrâneos; embora a análise dos efeitos na produção da cultura provenientes de doses únicas ou parceladas não foi o objetivo do presente trabalho.

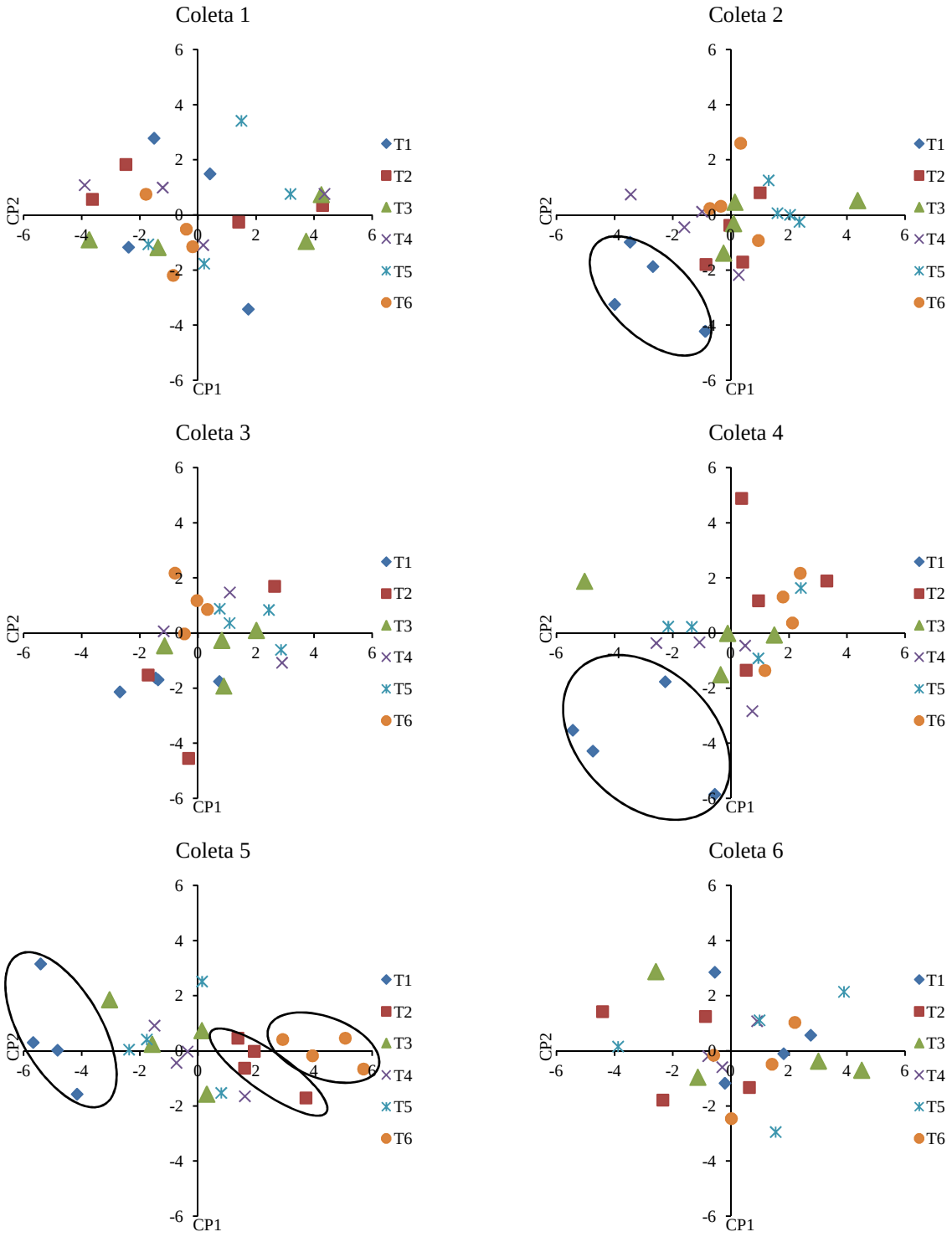


Figura 3.4 – Análise de componentes principais da camada de 0 a 20 cm, para os seis períodos de amostragem de solos

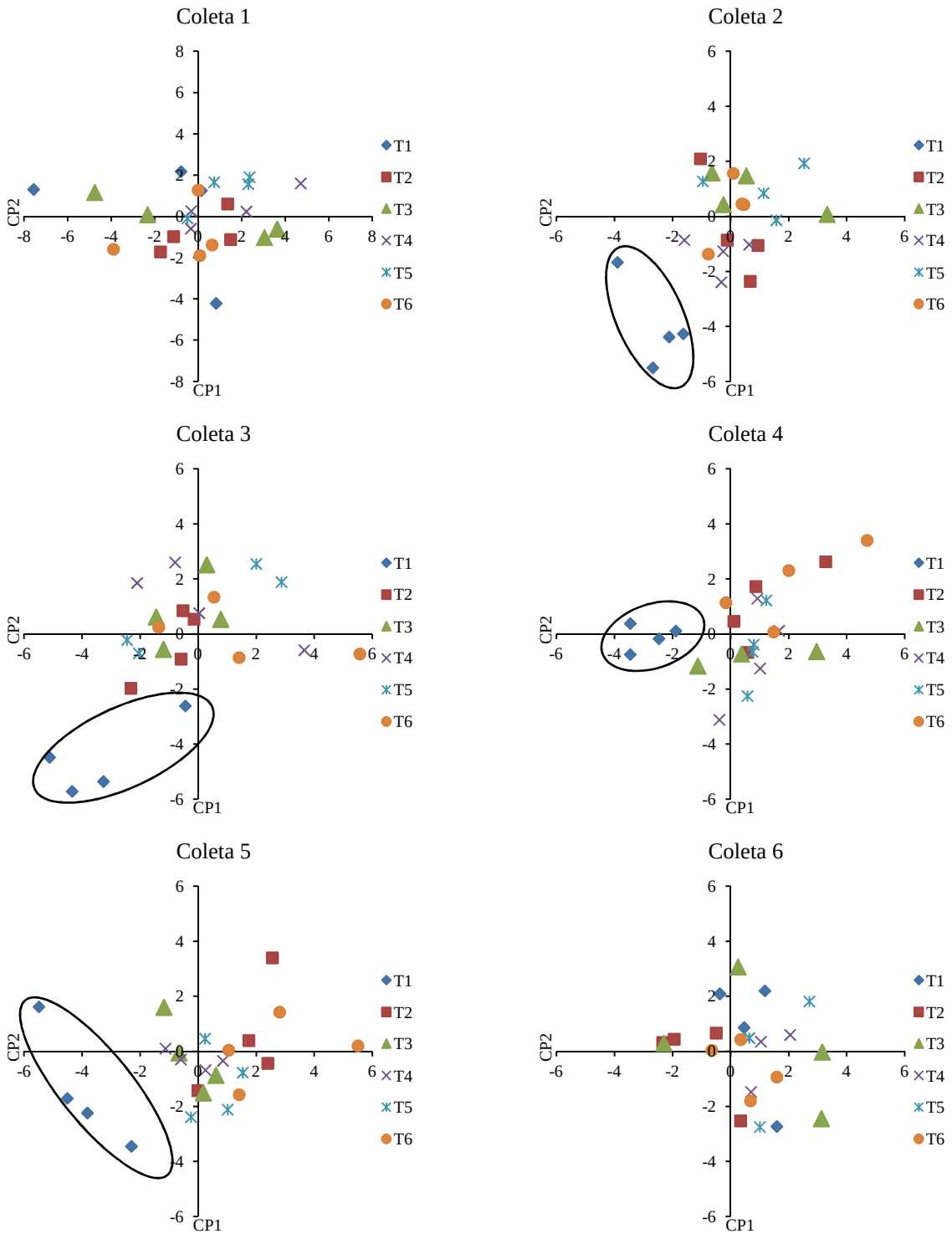


Figura 3.5 – Análise de componentes principais da camada de 20 a 40 cm, para os seis períodos de amostragem de solos

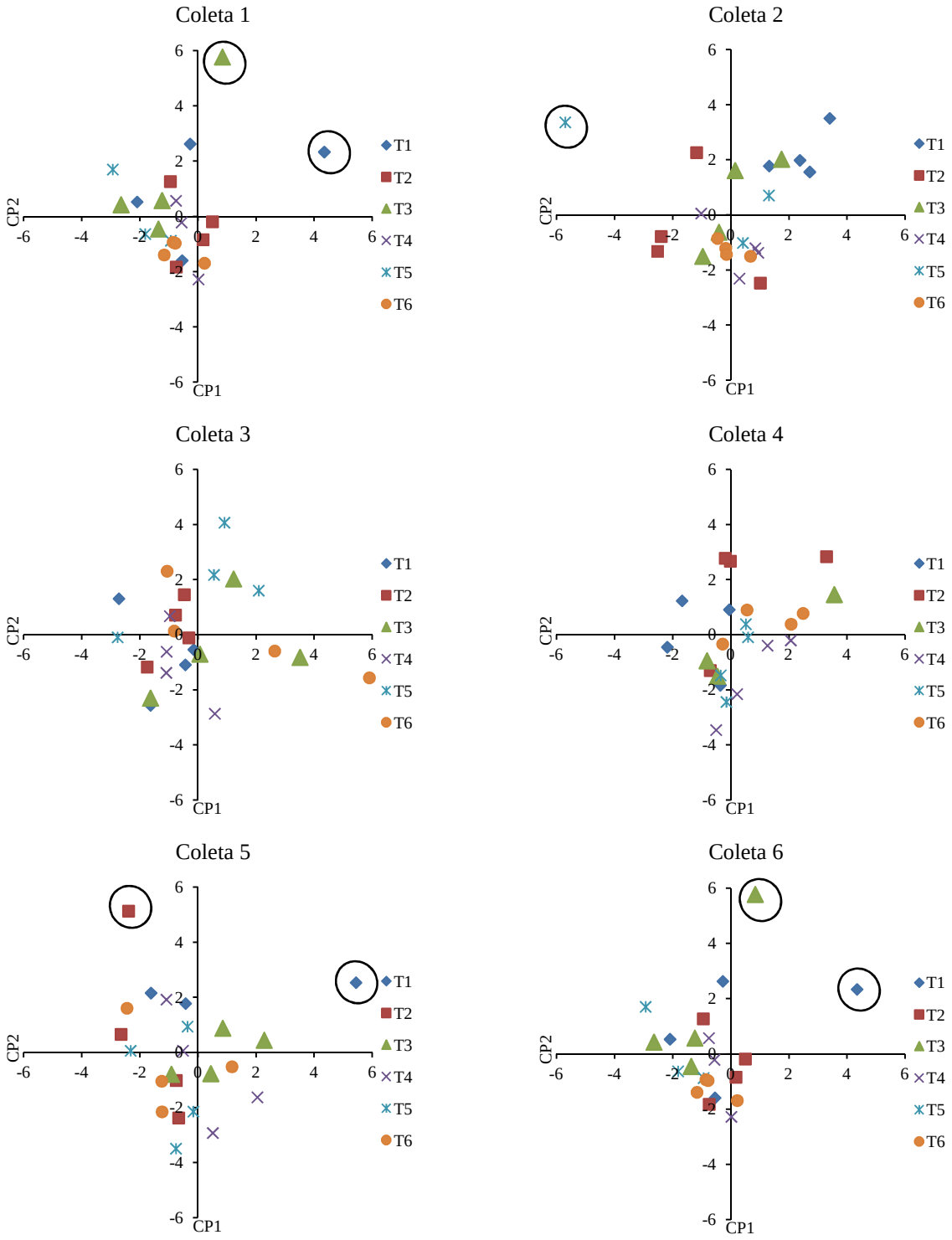


Figura 3.6 – Análise de componentes principais da camada de 40 a 60 cm, para os seis períodos de amostragem de solos

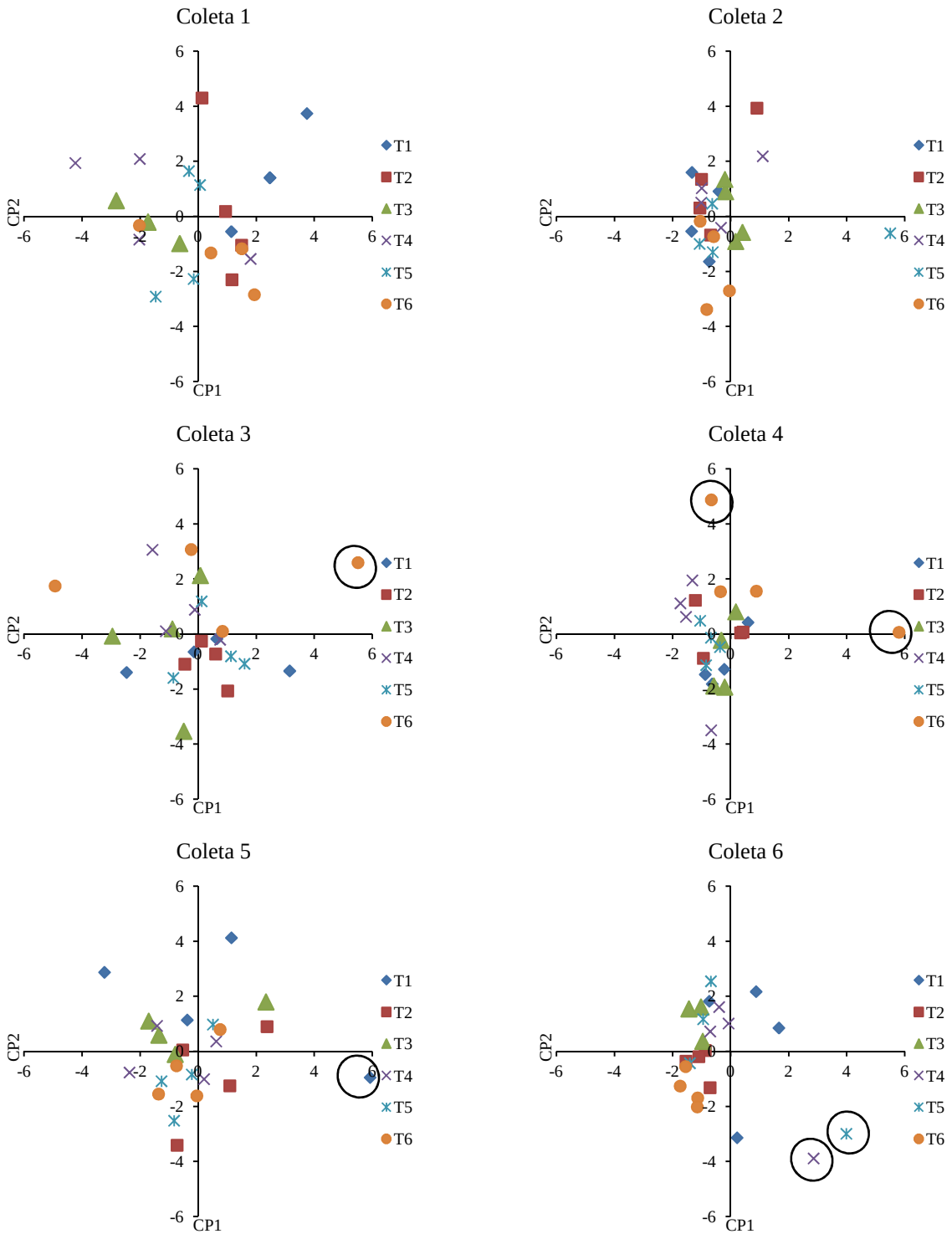


Figura 3.7 – Análise de componentes principais da camada de 60 a 80 cm, para os seis períodos de amostragem de solos

## 3.4 Conclusões

1. Quando avaliadas de forma univariada as principais alterações para os atributos químicos do solo foram para K, sendo possível também detectar ao longo do tempo uma tendência de aumento do pH do solo;
2. A análise multivariada de componentes principais permitiu a separação da testemunha dos demais tratamentos, sendo que agrupamentos entre estes, em geral não foi observado;
3. Para profundidades superiores a 40 cm, não foram observadas diferenças diretamente ligadas à aplicação dos tratamentos em questão, para os atributos avaliados neste trabalho.

## Referências

ABREU JÚNIOR, C.H.; BOARETTO, A.E.; MURAOKA, T.; KIEHL, J.C. Uso agrícola de resíduos orgânicos potencialmente poluentes: propriedades químicas do solo e produção vegetal. **Tópicos Especiais em Ciência do Solo**, Viçosa, v. 4, p. 391-470, 2005.

BARROS, R.P.; VIEGAS, P.R.A.; SOUZA, R.M.; BARBOSA, L.; VIEGAS, R.A.; BARRETO, M.C.V.; MELO, A.S. Alterações em atributos químicos de solo cultivado com cana-de-açúcar e adição de vinhaça. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 40, n. 3, p. 341-346, 2010.

CÓ JÚNIOR, C.; MARQUES, M.O.; TASSO JÚNIOR, L.C.; Efeito residual de quatro aplicações anuais de lodo de esgoto e vinhaça na qualidade tecnológica da cana-de-açúcar. **Engenharia agrícola**, Jaboticabal, v. 28, n. 1, p. 196-203, 2008.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Norma técnica P4.231.** São Paulo, 2005. 17 p.

CUNHA, R.C.A.; COSTA, A.C.S.; MASET FILHO, B.; CASARINI, D.C. P. Effects of irrigation with vinasse and dynamics of its constituents in the soil: I – physical and chemical aspects. **Water Science Technology**, London, v. 19, n. 8, p. 155-165, 1981.

EMBRAPA. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Brasília: Embrapa Solos; Embrapa Informática Agropecuária; Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia, 1999. 370 p.

ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA LUIZ DE QUIROZ. Disponível em: <http://www.esalq.usp.br/departamentos/leb/postoaut.html>. Acesso em: 05 out. 2011.

FARIAS, C.H.A.; FERNANDES, P.D.; AZEVEDO, H.M.; DANTAS NETO, J. Índices de crescimento da cana-de-açúcar irrigada e de sequeiro no estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental,** Campina Grande, v. 12, n. 4, p. 356-362, 2008.

FREIRE, W. J.; CORTEZ, L.A.B. **Vinhaça de cana-de-açúcar**. Guaíba: Agropecuária, 2000. 203 p.

GLÓRIA, N.A.; ORLANDO FILHO, J. Aplicação de vinhaça como fertilizante. **Boletim Técnico do Planalsucar,** Araras, v. 5, p. 5-38, 1983.

HAIR, J.F.; ANDERSON, R.E.; TATHAM, R.L.; BLACK, W.C. **Análise multivariada de dados**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2005. 593 p.

MORELLI, J.L.; DALBEN, A.E.; ALMEIDA, J.O.C.; DEMATTÊ, J.L.I. Calcário e gesso na produtividade da cana-de-açúcar e nas características químicas de um latossolo de textura média álico. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Campinas, v. 16, p. 187-194, 1992.

PRADA, S.M.; GUEKEZIAN, M.; SUÁREZ-IHA, M.E.V. Metodologia analítica para a determinação de sulfato de vinhoto. **Química Nova**, São Paulo, v. 21, n. 3, p. 249-252, 1998.

KONDÖRFER, G.H.; OLIVEIRA, L.A. O potássio na cultura da cana-de-açúcar. In: YAMADA, T.; ROBERTS, T.L. (Ed.). **Potássio na agricultura brasileira**. Piracicaba: POTAFOS, 2005. p. 469-490.

RAIJ, B. van; QUAGGIO, J.A. **Métodos de análise do solo para fins de fertilidade**. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas, 1983. 40 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.** 2. ed. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas, 1996. 285 p. (IAC. Boletim Técnico, 100).

RODELLA, A.A.; ZAMBELLO JR., E.; ORLANDO FILHO, J.O. Calibração de análises de fósforo e potássio no solo em cana-de-açúcar: 2ª aproximação. **Saccharum**, São Paulo, v. 28, n. 1, p. 39-42, 1983.

ROSSETTO, A.J. Utilização agronômica dos subprodutos e resíduos da indústria açucareira e alcooleira. In: PARANHOS, S.B. (Ed.). **Cana-de-açúcar:** cultivo e utilização. Campinas: Fundação Cargill, 1987. v. 2, p. 435-504.

SAS INSTITUTE. **SAS/STAT software:** changes and enhancements through release 6.12. Version 9.2. Cary, 1997. 1167 p.

SCHULTZ, N.; LIMA, E.; PEREIRA, M.G.; ZONTA, E. Efeito residual da adubação na cana-planta e da adubação nitrogenada e potássica na cana-soca colhidas com e sem a queima da palhada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 3, p. 811-820, 2010.

SHADMEHR, R.; ANGELL, D.; CHOU, P.B.; OEHRLEIN, G.S.; JAFFE, R.S. Principal component analysis of optical emission spectroscopy and mass spectrometry: Application using neural networks. **Journal of The Electrochemical Society**, Pennington, v. 139, n. 3, p. 907-914, 1992.

SILVA, A.J.N.; RIBEIRO, M.R. Caracterização de um Latossolo Amarelo sob cultivo contínuo de cana-de-açúcar no Estado de Alagoas: propriedades químicas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, n. 2, p. 291-299, 1998.

WERLE, R.; GARCIA, R.A.; ROSOLEM, C.A. Lixiviação de potássio em função da textura e da disponibilidade do nutriente no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, v. 32, n. 6, p. 2297-2305, 2008.

YADAY, D.V.; TODI, S.; SRIVASTAVA, A.K. Recycling of nutrients in trash with N for higher cane yield. **Biological Wastes**, Oxford, v. 20, p. 133-141, 1987.

# 4 DETERMINAÇÃO DE ATRIBUTOS DE UM NITOSSOLO SUBMETIDO A DIFERENTES DOSES DE VINHAÇA, UTILIZANDO SENSORIAMENTO REMOTO


## Resumo

A utilização de métodos tradicionais para avaliação das alterações nas propriedades do solo decorrente da aplicação de subprodutos industriais é inviável, uma vez que o monitoramento ambiental deve ser ágil e de baixo custo. Uma das alternativas a este inconveniente é a utilização do sensoriamento remoto. Neste sentido o presente trabalho foi desenvolvido visando analisar as alterações das propriedades químicas e físicas em um solo cultivado com cana-de-açúcar e submetido a diferentes doses de vinhaça, na área experimental do departamento de Engenharia de Biossistemas da ESALQ-USP, localizada no município de Piracicaba, SP. O experimento foi inteiramente casualizado (DIC), com 6 tratamentos e 4 repetições sendo os tratamento: 1. Sem vinhaça; 2. Fertirrigado com químicos; 3., 4., 5. e 6., com 0,5, 1, 2, e 3 vezes a dose recomendada pela CETESB respectivamente. Foram gerados modelos para amostras de terra fina seca em estufa e amostras em condição de campo. Para determinação da granulometria foram gerados modelos aceitáveis a bons ($R^2$ entre 0,7 e 0,9), sendo que estes não foram afetados pela profundidade ou tipo de amostra utilizada. Com relação aos atributos químicos foram gerados modelos com capacidade apenas de diferenciação entre altas e baixas concentrações ($R^2$ entre 0,5 e 0,65) para os atributos pH, M.O, H+Al e CTC até a profundidade de 40 cm sendo os modelos de TFSE melhores que os gerados para ACC. Para camadas mais profundas devido ao fato da aplicação parcelada da vinhaça não ter causado grandes variações dos atributos químicos e estes não possuírem uma resposta primária para a faixa do espectro avaliada não foi possível a determinação destas propriedades.


Palavras chave: Espectrorradiometria; Análise multivariada; Propriedades do solo


## Abstract

The use of conventional methods to evaluate alterations in soil properties due to application of industrial sub-products is impracticable, being that the environment monitoring has to be fast and low cost. One alternative to this drawback is the use of remote sense techniques. In this sense the present work was developed in order to analyze the chemical and physical changes in a soil cultivated with sugar cane and submitted to different doses of vinace, on the experimental area of the Biosystems Engineering department of ESALQ-USP, in Piracicaba, São Paulo state, Brazil. The statistical arrangement was in completely randomized design, with 6 treatments and 4 repetitions being the treatments: 1. No vinace; 2. Chemical Fertirrigation; 3, 4, 5 e 6, with 0.5, 1, 2 and 3 times the recommended dose of CETESB respectively. Models were generated to samples of air-dried soil and samples in field conditions. For determination of granulometry it was generated good and acceptable models ($R^2$ between 0.7 and 0.9), being that this were not affected for the depths or type of samples used. With relation to chemicals attributes, it was generated just models with capacity of differentiation between high and low concentrations ($R^2$ range from 0.50 to 0.65) for the attributes pH, O.M, H+Al and CEC just to depths of 0 to 20 and 20 to 40 cm being the models to air-dried soils better than those to samples in field conditions. For the deeper layers, due to the vinace split application it has not caused high

variations in chemical properties, ally to this attributes it could not be seen a primary response on the spectrum bands evaluated thus it was not possible the determination of this soil properties.

Keywords: Spectroradiometry; Multivariate analysis; Soil properties

## 4.1 Introdução

A vinhaça é um dos principais subprodutos da agroindústria canavieira, caracterizada como um efluente de alto poder poluente e também por possuir alto valor fertilizante; o que impulsionou nos últimos anos sua utilização em larga escala nas lavouras de cana-de-açúcar do Brasil. Seu principal constituinte é a matéria orgânica, contendo em menor quantidade Cálcio, Magnésio, Potássio e outros nutrientes essenciais, sendo sua riqueza nutricional diretamente ligada à origem do mostro (SILVA et al., 2007).

O grande número de estudos recentes, mostram o potencial de utilização da vinhaça na otimização da produção do setor sucroalcoleiro, porém grande cuidado deve ser adotado em sua aplicação, para se minimizar os impactos negativos a nível de solo, água e biodiversidade. Neste sentido, a Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB), ligada à Secretaria do Meio Ambiente do governo paulista, criou uma norma técnica que regulamenta a aplicação da vinhaça no estado de São Paulo, sendo que, as doses calculadas levam em conta a concentração de K e CTC do solo, e concentração de K na vinhaça a ser aplicada (CETESB, 2005).

As alterações dos atributos do solo provenientes da aplicação da vinhaça ao longo do tempo podem ser observadas com a utilização de análises de rotina, o que para fins de monitoramento de grandes áreas, acaba se tornando inviável devido principalmente ao alto custo e baixa agilidade deste método. Neste sentido, técnicas alternativas para a avaliação das condições químicas e físicas dos solos vêm sendo estudadas, dentre elas o sensoriamento remoto (SR) tem recebido grande atenção por parte dos pesquisadores, principalmente por se tratar de uma técnica não destrutiva, de ágil verificação e processamento dos resultados, permitindo ainda avaliar vários atributos simultaneamente sem a geração de poluentes em potencial (DUNN et al., 2002; BROWN et al., 2006), possibilitando ainda seu uso tanto em laboratório quanto in loco (VISCARRA ROSSEL et al., 2006).

Estudos referentes à espectroscopia de reflectância difusa utilizando regiões do visível e infravermelho próximo (vis-NIR) na área de ciências do solo têm aumentado rapidamente nos

últimos dez anos. O principal foco destas investigações tem sido principalmente em torno dos componentes básicos do solo, como matéria orgânica, nutrientes, fertilidade, umidade, estrutura, mineralogia da fração argila entre outros.

Vários trabalhos têm avaliado as variações químicas e físicas ao longo dos perfis dos solos e sua relação com as alterações na resposta espectral destes (DEMATTÊ; GARCIA, 1999; CHANG et al., 2001; LEE et al., 2003; DEMATTÊ et al., 2006, 2010; FIORIO; DEMATTÊ, 2009; VISCARRA ROSSEL et al., 2010). Segundo Cohen et al. (2007) é possível a predição de atributos do solo com precisão igual a resultados de análises convencionais, no entanto não há duvidas que as variações quanto ao tipo de solo, faixa do espectro avaliado, condições das amostras com relação a umidade, rugosidade e atributos envolvidos na análise, exercem grande influência na geração e validação de um modelo universal, o que torna importante estudos localizados para verificação do potencial desta ferramenta.

Com base nos argumentos apresentados, fica evidente a importância da investigação em torno da capacidade de utilização de técnicas de sensoriamento remoto nas reais condições do sistema produtivo brasileiro, dando destaque neste caso a aplicação de subprodutos do setor agroindustrial (vinhaça), com o objetivo de auxiliar tanto o monitoramento quanto o gerenciamento desta atividade.

O presente trabalho teve como objetivo, gerar modelos utilizando a análise de regressão por mínimos quadrados parciais (PLSR) a partir de curvas espectrais de um Nitossolo Vermelho Eutroférrico (NVef), para determinação de alguns atributos químicos e físicos do solo, utilizando amostras de terra fina seca em estufa (TFSE), comumente utilizadas nesse tipo de avaliação e amostras em condição de campo (ACC), sendo estas deformadas e mantidas as condições do momento da coleta, o que aproximaria de uma investigação in loco, comparando ambos os resultados com os métodos já consagrados de análises laboratoriais.

## 4.2 Material e métodos

### 4.2.1 Descrição do experimento

O experimento foi realizado na Fazenda Areão da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP), 22º41’55’’ de latitude sul, 47º38’41’’ longitude oeste e altitude de

511m; na área experimental do Departamento de Engenharia Biossistemas, situada no município de Piracicaba-SP. O clima da região é classificado no sistema Koppen como Cwa, denominado subtropical úmido, com pluviosidade anual em torno de 1.257 mm, sendo o período seco o inverno, as médias de temperatura são 22º C no mês mais quente, 18° C no mês mais frio e média anual de 21,4º C. O solo estudado é um Nitossolo Vermelho Eutroférrico (NVef) de acordo com a classificação brasileira de solos da Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias (EMBRAPA) (EMBRAPA, 1999). Foram realizadas coletas de solos antes a instalação do experimento para verificação das condições físicas e de fertilidade do solo, onde não foram encontradas variações espaciais significativas entre os atributos. As características químicas e físicas do solo antes da aplicação dos tratamentos podem ser observadas nas Tabelas 4.1 e 4.2, respectivamente.

Tabela 4.1 - Características químicas prévias do solo da área experimental

| Profundidade | pH | M.O. | P | K | Ca | Mg | H+Al | Al | SB | CTC | V |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $CaCl_2$ | $g.dm^{-3}$ | $mg.dm^{-3}$ | ..... | ..... | ..... | $mmol_c.dm^{-3}$ | ..... | ..... | ..... | % |
| **0-20 cm** | 5,0 | 27 | 8 | 2,5 | 30 | 15 | 39 | 1 | 48 | 86 | 55 |
| **20-40 cm** | 5,2 | 20 | 5 | 1,7 | 28 | 14 | 33 | 0 | 43 | 77 | 57 |
| **40-60 cm** | 5,5 | 13 | 5 | 0,6 | 22 | 14 | 25 | 0 | 37 | 62 | 60 |
| **60-80 cm** | 5.6 | 12 | 5 | 0.5 | 19 | 12 | 24 | 0 | 31.5 | 55.5 | 62 |

Tabela 4.2 - Características físico-hídricas prévias do solo da área experimental

| Características | Unidade | Valor |
|---|---|---|
| Areia | $g.kg^{-1}$ | 210 |
| Silte | $g.kg^{-1}$ | 309 |
| Argila | $g.kg^{-1}$ | 481 |
| Densidade | $g.cm^{-3}$ | 1,2 |
| Capacidade de Campo | $cm^3.\ cm^{-3}$ | 0,28 |
| Ponto de murcha permanente | $cm^3.\ cm^{-3}$ | 0,20 |

A sulcagem para instalação do sistema de irrigação e plantio da cana foi realizada por um sulcador de duas linhas. Posteriormente o sistema de irrigação por gotejamento subsuperficial foi instalado, sendo os tubos gotejadores alocados em uma profundidade de 30 cm. O plantio foi realizado com a variedade SP 891115, visando obter de 12 a 16 gemas por metro linear. Para uma

melhor utilização do sistema de irrigação selecionado, o esquema de plantio foi em fileiras duplas, sendo a configuração: 0,4 m entre linha de plantas e 1,4 m entre fileiras duplas, neste sentido, as linhas de gotejo foram instaladas no centro das fileiras duplas ficando equidistantes a 1,8 m.

Á área experimental foi dividida em 24 parcelas, com 5 linhas duplas de 8 m de comprimento cada uma. Dessa forma cada parcela possuía aproximadamente 88 $m^2$ sendo a área total do experimento de 2.112 $m^2$. Para área útil, onde foram realizadas as coletas de solos, considerou-se as três linhas duplas centrais, descartando um metro nas extremidades de cada parcela, logo cada parcela possuía 24 m² de área útil.

Apesar da grande variação da composição química da vinhaça, foi considerado o resultado médio das análises de várias amostragens e os valores obtidos estão apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Resultado médio das análises químicas para macro e micronutrientes da vinhaça aplicada

| **N** | **P** | **K** | **Ca** | **Mg** | **S** | **C** | **Na** | **Cu** | **Fe** | **Zn** | **Mn** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| .....g/L..... | | | | | | .....mg/L..... | | | | | |
| 0.35 | 0.06 | 1.91 | 0.97 | 0.20 | 0.47 | 5.20 | 122.00 | 0.40 | 17.00 | 0.70 | 6.00 |

### 4.2.2 Delineamento experimental e aplicação dos tratamentos

O arranjo experimental do foi em delineamento inteiramente casualizado (DIC), com seis tratamento e quatro repetições, sendo estes: Tratamento 1. Sem aplicação de vinhaça, com adubação segundo as recomendações para a cultura realizadas no momento do plantio; Tratamento 2. Fertirrigado com fertilizantes químicos, de acordo com a marcha de absorção de nutrientes da cultura; Tratamento 3. Fertirrigado com meia dose de vinhaça recomendada para este solo de acordo com as normas técnicas da CETESB; Tratamento 4. Fertirrigado com a dose de vinhaça recomendada pela CETESB; Tratamento 5. Fertirrigado com duas vezes a dose de vinhaça recomendada pela CETESB e Tratamento 6. Fertirrigado com três vezes a dose de vinhaça recomendada pela CETESB.

Com base nas características químicas do solo (Tabela 4.1), e os resultados das análises químicas da vinhaça a ser aplicada (Tabela 4.3), as doses de vinhaça foram calculadas de acordo com a eq. (4.1) (CETESB, 2005).

$$m^3 \text{ vinhaça } ha^{-1} = \frac{[(0{,}05 \times CTC - ks) \times 3744 + 185]}{Kvi} \quad (4.1)$$

Onde:

CTC = Capacidade de Troca Catiônica, expressa em $cmol_c.dm^{-3}$, a pH 7,0;

Ks = concentração de potássio no solo, expresso em $cmol_c.dm^{-3}$, a profundidade de 0,80 m;

3744 = constante para transformar os resultados da análise de fertilidade expressos em $cmol_c.dm^{-3}$ ou $meq.100cm^{-3}$, para kg de potássio em volume de um hectare a 0,80 m de profundidade;

185 = kg de $K_2O$ médio extraído pela cultura por ha, por corte;

Kvi = concentração de potássio na vinhaça, expressa em kg de $K_2O.m^{-3}$.

As quantidades reais aplicadas no solo foram de 150, 300, 600, e 900 $m^3$ de vinhaça por $ha^{-1}$ para os tratamentos 3, 4, 5 e 6 respectivamente, sendo estas doses, bem como as doses da fertirrigação convencional (Tratamento 2) parceladas em 4 vezes aplicações, realizadas aproximadamente a cada dois meses, com início no dia 20/06/2010, visando a melhor utilização dos nutrientes pela cultura e redução de riscos de contaminação ambiental.

### 4.2.3 Coleta de solo e análises químicas e físicas

Foram realizadas amostragens deformadas de solo, utilizando o trado holandês, sendo uma amostragem simples por parcela do experimento, com seis períodos de coleta; a primeira delas antes da aplicação dos tratamentos, da segunda a quinta foram realizadas 24 horas após cada aplicação da fertirrigação convencional e doses de vinhaça, e a sexta, dois meses após o término das aplicações, sendo as datas das coletas os dias 21/06/2010, 19/08/2010, 20/10/2010, 15/12/2010, 20/02/2011 e 18/04/2011. As coletas eram realizadas em quatro profundidades, variando de 20 em 20 cm, sendo assim foram coletadas ao final do experimento 144 para cada camada.

Foram realizadas análises químicas do solo para os atributos pH (CaCl2), teor de matéria orgânica (M.O), fósforo (P), potássio (K), magnésio (Mg), cálcio (Ca), hidrogênio mais alumínio (H+Al), sendo assim possível os cálculos de soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica em pH 7 (CTC) e saturação por bases (V%) (RAIJ; QUAGGIO, 1983). Foram realizadas também análises físicas para determinação dos teores de areia, silte e argila (CAMARGO et al., 1986).

### 4.2.4 Aquisição dos dados espectrais

Do solo coletado foram obtidos dados espectrais de dois tipos de amostras: 1. Amostras em condição de campo (ACC), mantendo-se as condições de campo no momento da coleta; 2. Terra Fina Seca em Estufa, (TFSE), onde o solo foi seco em estufa a 45° C por 24 horas, moído e peneirado em malha de 2 mm, procedimento usualmente utilizado em espectroscopia (HENDERSON et al., 1992). Ambos os tipos amostras foram acondicionadas em placas de petri com diâmetro de 9 cm, formando uma camada com espessura de aproximadamente 1,5 cm. Os dados espectrais foram obtidos em laboratório com o espectrômetro FieldSpec Pro (Analytical Spectral Devices, Boulder, Colo). Trata-se de um espectrorradiômetro com fibra ótica possuindo resolução espectral de 1 nm na faixa espectral de 350 a 1100 nm, e 2 nm de 1100 a 2500 nm.

O sensor foi colocado na vertical, a 27 cm de altura das amostras de solo. A fonte de iluminação utilizada foi uma lâmpada halógena de 650 W, com feixe não colimado para o plano visado, posicionada a 35 cm do recipiente amostral, com um ângulo zenital de 20 °. Como padrão de referência, foi utilizado uma placa branca de sulfato de bário considerada como padrão de 100% de reflectância. Dessa forma, a razão entre o fluxo radiante espectral refletido pela superfície de uma amostra de solo e o fluxo radiante espectral refletido por um padrão de referência, iluminados e visados sob as mesmas condições geométricas, gera o “fator de reflectância espectral bidirecional”.

A partir do fator de reflectância bidirecional dos solos, são então obtidas as curvas espectrais destes. Para cada amostra analisada, foram efetuadas três leituras em diferentes posições da placa, de modo a aumentar a área escaneada, sendo que o valor médio foi posteriormente calculado. No presente trabalho foram utilizados os comprimentos de onda de 400 a 2440 nm, uma vez que as demais bandas apresentaram elevado grau de ruído, prejudicando a determinação dos modelos.

### 4.2.5 Análise estatística

#### 4.2.5.1 Pré-processamento das curvas espectrais

Os dados foram pré-processados utilizando metodologias consagradas em espectroscopia, visando corrigir possíveis erros e melhorar a estabilidade da regressão. Primeiramente realizou-se a normalização do espectro com o processo de centralização em relação a média de reflectância das curvas. Posteriormente, para correção de possíveis erros devidos a não linearidade, os dados foram transformados em função da eq. (2).

$$\mathrm{Log}\frac{1}{\mathrm{R}} \tag{4.2}$$

Em que:

R= reflectância

As novas curvas obtidas podem ser denominadas como absorbância aparente das amostras. As variações devido ao espalhamento da luz foram corrigidas utilizando a formula de variação normal padrão (SNV), para todos os atributos analisados.

Foram previamente realizadas análises de componentes principais (ACP) para as curvas espectrais e atributos do solo, a fim de se observar e eliminar possíveis outliers (WORKMAN, 1992). Posteriormente, com o novo conjunto de dados, foram sorteados aleatoriamente 25% das curvas e atributos para posterior validação dos modelos que atingirem valores satisfatórios na fase de calibração.

Os modelos para predição dos atributos químicos e físicos avaliados, foram gerados por meio da análise de regressão por mínimos quadrados parciais (PLS) utilizando o software ParLes versão 3.1 (VISCARRA ROSSEL, 2008). Esta metodologia é comumente utilizada em espectroscopia, por eliminar de forma mais eficiente erros devido a colinearidade entre variáveis, trabalhando com todos os comprimentos de onda, evitando desta maneira a perda de informações importantes. O método de regressão PLS é uma potente ferramenta de estimação do modelo de regressão linear, baseada na decomposição das matrizes de variáveis resposta e de covariáveis (MARTENS; NAES, 1989).

O algoritmo PLSR seleciona fatores ortogonais sucessivos com o objetivo de se obter maiores covariâncias entre os dados preditores (X, neste caso as curvas espectrais) e as variáveis resposta (y, resultados das análises de laboratório). O ajuste dos modelos PLSR, procura encontrar o menor número de fatores que expliquem a maior parte da variação tanto das variáveis preditoras quanto as de resposta. Resumidamente, a idéia do método PLS é extrair componentes

que consigam capturar as variâncias das covariáveis e também obter correlações com as variáveis independentes simultaneamente.

Geralmente, as matrizes de fatores resultantes, têm uma menor dimensão que as matrizes X e y originais. Após gerados os modelos, a partir de novos espectros (X), a propriedade do solo (y) pode ser estimada com uma combinação (bi)linear dos fatores de X (MARTENS; NAES, 1989).

#### 4.2.5.2 Calibração dos modelos

Foi utilizado o método de validação cruzada denominado “leave-one-out”, sendo selecionados os modelos que apresentaram o menor número de fatores (N.F), com maiores coeficientes de determinação ($R^2$), menores valores de raiz quadrada do erro médio (RMSE) definida pela eq. (4.3) e maiores valores de desvio padrão do erro (RPD) definido pela eq. (4.4) (WILLIANS, 2001).

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n-m} \frac{(yi' - yi)}{n - m}} \tag{4.3}$$

Onde:

n = Número de amostras;

m = numero de amostras usadas para predição;

yi’-yi = Valores preditos e observados respectivamente.

$$\mathrm{RPD} = \frac{\mathrm{sd}}{\mathrm{SEP}} \tag{4.4}$$

Sendo:

sd = taxa de desvio padrão dos dados analisados;

SEP = erro padrão da predição

Estes parâmetros são comumente utilizados para avaliação de técnicas de espectroscopia, na determinação da melhor correlação entre os dados químicos e espectrais.

#### 4.2.5.3 Validação dos dados e avaliação dos modelos

Os modelos gerados quando atingiram valores que segundo a literatura permitam sua utilização ao menos na determinação de altas e baixas concentrações do atributo do solo em questão, foram posteriormente testados verificando sua capacidade de estimar tais propriedades nos 25% das amostras anteriormente selecionadas e não utilizadas na calibração do modelo. Este processo, segundo Dardenne at al. (2000) fornece uma idéia mais otimista da real exatidão dos modelos criados.

A avaliação do desempenho dos modelos foi realizado com base no trabalho de Araújo (2008), que utilizou os parâmetros propostos por Sayes et al. (2005), onde indicaram quatro faixas de satisfação para os valores de $R^2$, sendo elas: 1. 0,50 e 0,65, com capacidade de descriminação entre altas e baixas concentrações do atributo; 2. 0,66 a 081, modelos de predição aceitáveis; 3. 0,82 a 0,90, modelos de predição bons; 4. Acima de 0.90 excelentes. Com relação aos valores de RPD, Dunn et al. (2002) e Chang et al. (2001) sugerem que valores menores que 1,5 sejam insuficientes para a maioria das aplicações, valores entre 1,5 e 2,0 são considerados úteis e acima de 2,0 excelentes.

## 4.3 Resultados e Discussão

### 4.3.1 Calibração dos modelos de predição

Observando os resultados das análises químicas do solo, constata-se que as variações dos atributos não foram acentuadas ocorrendo principalmente nas camadas de 0 a 20 e 20 a 40 cm, já para a granulometria, embora nas camadas mais profundas mostrem maiores teores de argila, não foram constatadas grandes diferenças por se tratar de um solo que não possui gradiente textural.

Os parâmetros utilizados na calibração dos modelos bem como a capacidade destes em predizer os atributos do solo para as profundidades avaliadas são apresentados nas Tabelas 4.4, 4.5. 4.6 e 4.7. Pode-se observar o número de fatores PLS utilizados (N.F), bem como a raiz quadrada do erro médio (RMSE), o desvio padrão do erro (RPD) e o coeficiente de determinação ($R^2$), tanto para amostras de terra fina seca em estufa (TFSE) como amostras em condições de campo (ACC).

Os modelos gerados para a profundidade de 0 a 20 cm (Tabela 4.4), não apresentaram resultados satisfatórios para os atributos P, K, Ca, Mg, SB e V%, com valores de $R^2$ inferiores a 0,50 e RPD menores que 1,50, o que impossibilita a utilização destes modelos para qualquer tipo de objetivo. Uma das explicações para estes resultados com exceção do K foi a baixa variação dos teores destes elementos no solo, uma vez que a presença dos mesmos na composição da vinhaça ocorre em quantidades baixas (PRADA et al., 1998). Já para o íon potássio, outros estudos observaram que sua estimativa usando a região do visível e infravermelho próximo, não é aceitável, principalmente se tratando de solos com alto teor de argila (ISLAM et al., 2003).

Para os atributos pH, M.O, H+Al e CTC, os valores de $R^2$ estiveram entre 0,5 e 0,65 para as amostras de TFSE, sendo que seus RPD estiveram muito próximos ou acima de 1.5, podendo então estes modelos serem utilizados para a distinção entre altas e baixas concentrações (SAYES et al., 2005; DUNN et al., 2002; CHANG et al., 2001). Quando utilizados as ACC, os valores dos coeficientes de determinação ficaram acima de 0,5 apenas para o teor de matéria orgânica (Tabela 4.4). Ainda sobre estes modelos, com exceção da M.O, os modelos gerados com as ACC, foram estatisticamente diferentes dos modelos de TFSE, quando comparadas pelo teste t a 5% de probabilidade.

Já para a granulometria do solo, foram gerados modelos considerados de bons a excelentes com relação a exatidão de predição para argila com valores de $R^2$ = 0,96 e RPD = 4.44 para TFSE e $R^2$ = 0,96 e RPD = 4.44 para ACC, o mesmo ocorrendo com a fração areia que alcançou $R^2$ = 0,88 e RPD = 2.92 para TFSE e $R^2$ = 0,94 e RPD = 3.67 para ACC, os modelos para silte, apenas permitem a determinação de alta ou baixa concentração, no entanto o teor desta fração pode ser obtida pela diferença entre a soma de areia+argila (Tabela 4.4). Para granulometria, não houveram diferenças estatísticas entre os modelos de ACC e TFSE.

Resultados semelhantes a este, já haviam sido observados por Viscarra Rossel et al. (2009), onde estes obtiveram resultados melhores com leituras realizadas diretamente em trincheiras abertas no campo, que em laboratório, sugerindo que o preparo das amostras para análises espectrais tem baixa influência sobre a determinação da granulometria do solo, o que também foi observado nesse trabalho em relação aos valores de $R^2$ obtidos.

Tabela 4.4 – Resultado da calibração dos modelos na profundidade de 0 a 20 cm, para TFSE e ACC

| Atributo | Terra Fina Seca em Estufa (TFSE) | | | | Amostra em Condição de Campo (ACC) | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | N.F | RMSE | RPD | $R^2$ | N.F | RMSE | RPD | $R^2$ |
| Argila ($g.kg^{-1}$) | 16 | 7.67 | 4.44 | 0.96 | 13 | 8.34 | 4.28 | 0.95 |
| Silte ($g.kg^{-1}$) | 15 | 19.65 | 1.58 | 0.59 | 11 | 21.89 | 1.42 | 0.50 |
| Areia ($g.kg^{-1}$) | 15 | 5.79 | 2.92 | 0.88 | 13 | 4.23 | 3.67 | 0.94 |
| pH ($CaCl_2$) | 10 | 0.37 | 1.51 | 0.55* | 5 | 0.37 | 1.27 | 0.39* |
| M.O ($g.kg^{-1}$) | 11 | 3.82 | 1.67 | 0.64 | 6 | 3.14 | 1.63 | 0.62 |
| P ($mg.dm^{-3}$) | 19 | 2.20 | 1.02 | 0.19* | 5 | 2.26 | 0.99 | 0.09* |
| K ($mmol_c.dm^{-3}$) | 10 | 1.39 | 1.17 | 0.32 | 5 | 1.31 | 1.17 | 0.28 |
| Ca ($mmol_c.dm^{-3}$) | 10 | 4.99 | 0.94 | 0.08* | 10 | 5.54 | 0.93 | 0.05* |
| Mg ($mmol_c.dm^{-3}$) | 6 | 2.97 | 0.98 | 0.04* | 12 | 3.01 | 1.08 | 0.17* |
| H+Al ($mmol_c.dm^{-3}$) | 13 | 7.37 | 1.56 | 0.59* | 6 | 5.82 | 1.36 | 0.46* |
| SB ($mmol_c.dm^{-3}$) | 10 | 7.48 | 0.99 | 0.11* | 10 | 8.99 | 0.93 | 0.06* |
| CTC ($mmol_c.dm^{-3}$) | 12 | 8.07 | 1.69 | 0.65* | 6 | 10.72 | 1.27 | 0.40* |
| V% | 10 | 7.46 | 1.23 | 0.37 | 6 | 4.23 | 1.26 | 0.39 |

**N.F**: número de Fatores PLS; **RMSE**: raiz quadrada do erro médio; **RPD**: desvio padrão do erro; **$R^2$**: coeficiente de determinação; *: diferença significativa ente os modelos pelo teste t ($P < 0.05$).

Na profundidade de 20 a 40 cm (Tabela 4.5), os modelos gerados foram muito semelhantes aqueles anteriormente discutidos, com resultados insatisfatórios para P, K, Ca, Mg, SB e V%; mostrando apenas capacidade de distinção entre altas e baixas concentrações para pH, M.O, H+Al e CTC, já para determinação das frações granulométricas argila e areia foram gerados modelos considerados de bons a excelentes.

Os modelos para a determinação dos atributos químicos para as ACC foram melhores que aqueles obtidos na profundidade de 0 a 20 cm para os atributos avaliados embora ainda inferiores aos de TFSE, no entanto não houve diferenças estatisticamente significativas apenas para os modelos para determinação de M.O. Com relação aos modelos gerados para a granulometria, não houve diferenças significativas, estando os resultados muito próximos daqueles citados anteriormente (Tabela 4.5). Em um realizado com o objetivo de determinação de propriedades para 4 classes de solos brasileiros, Fiorio e Demattê (2009) encontraram valores um pouco inferiores de $R^2$ para modelos de determinação de argila e areia, sendo estes valores de 0,86 e 0,81 respectivamente. No entanto vale ressaltar que estes autores utilizaram análise de regressão múltipla e propuseram uma equação global para avaliação destes atributos para diferentes solos e horizontes.

Tabela 4.5 – Resultado da calibração dos modelos para as variáveis analisadas na profundidade de 20 a 40 cm, para TFSE e ACC

| Atributo | Terra Fina Seca em Estufa (TFSE) | | | | Amostra em Condição de Campo (ACC) | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | N.F | RMSE | RPD | $R^2$ | N.F | RMSE | RPD | $R^2$ |
| Argila ($g.kg^{-1}$) | 16 | 13.12 | 2.63 | 0.87 | 13 | 13.41 | 2.58 | 0.85 |
| Silte ($g.kg^{-1}$) | 15 | 23.21 | 1.27 | 0.33 | 11 | 22.52 | 1.3 | 0.36 |
| Areia ($g.kg^{-1}$) | 15 | 6.70 | 3.03 | 0.88 | 13 | 7.88 | 2.58 | 0.86 |
| pH ($CaCl_2$) | 14 | 0.29 | 1.43 | 0.52 | 7 | 0.30 | 1.48 | 0.55 |
| M.O ($g.kg^{-1}$) | 13 | 2.30 | 1.67 | 0.64* | 7 | 2.59 | 1.46 | 0.54* |
| P ($mg.dm^{-3}$) | 13 | 1.83 | 1.03 | 0.19* | 6 | 1.64 | 1.02 | 0.07* |
| K ($mmol_c.dm^{-3}$) | 13 | 1.23 | 1.04 | 0.20* | 8 | 1.22 | 1.03 | 0.13* |
| Ca ($mmol_c.dm^{-3}$) | 11 | 4.75 | 0.96 | 0.09* | 8 | 6.11 | 0.76 | 0.02* |
| Mg ($mmol_c.dm^{-3}$) | 15 | 3.25 | 1.01 | 0.13 | 6 | 3.49 | 1.02 | 0.08 |
| H+Al ($mmol_c.dm^{-3}$) | 15 | 4.83 | 1.46 | 0.51 | 10 | 4.34 | 1.43 | 0.52 |
| SB ($mmol_c.dm^{-3}$) | 8 | 6.76 | 1.01 | 0.13 | 5 | 7.46 | 1.06 | 0.15 |
| CTC ($mmol_c.dm^{-3}$) | 12 | 5.55 | 1.59 | 0.61 | 6 | 6.47 | 1.49 | 0.55 |
| V% | 14 | 7.08 | 1.09 | 0.22 | 6 | 6.12 | 1.04 | 0.16 |

**N.F**: número de Fatores PLS; **RMSE**: raiz quadrada do erro médio; **RPD**: desvio padrão do erro; **$R^2$**: coeficiente de determinação; *: diferença significativa ente os modelos pelo teste T ($P < 0.05$).

Para as profundidades de 40 a 60 cm (Tabela 4.6) e 60 e 80 cm (Tabela 4.7), não foi possível estimar os atributos químicos do solo. Este fato está ligado principalmente a aplicação de doses parceladas de vinhaça, não ocorrendo desta maneira uma distribuição nas camadas mais profundas do solo. Havendo baixas variações do teor dos atributos químicos, aliado ao fato destes não possuírem resposta primária na região do espectro avaliada, as variações das curvas espectrais não puderam ser associadas aos seus teores (ZORNOSA et al., 2008). Este comportamento da vinhaça já havia sido observado em estudos prévios sobre a distribuição deste subproduto no perfil do solo ente eles, Cunha et al. (1981) estudando a utilização de vinhaça como fertilizante e condicionador de solos, observaram que a acumulação dos nutrientes provindo desta não foi grande, ficando retidos na camada de 0 a 50 cm de profundidade, com pequenas ocorrências de lixiviação.

Para granulometria, assim como nas demais profundidades os modelos gerados obtiveram coeficiente de determinação acima de 0.85 para areia e argila, com desvio padrão do erro maiores que 2,00, tanto para TFSE quanto para ACC (Tabelas 4.6 e 4.7), observa-se que a capacidade da espectrometria em gerar modelos para determinação destas frações granulométricas não foram

afetadas nem pela profundidade de coleta tampouco pelo tratamento das amostras para o solo em estudo.

Tabela 4.6 – Resultado da calibração dos modelos para as variáveis analisadas na profundidade de 40 a 60 cm, para TFSE e ACC

| **Atributo** | **Terra Fina Seca em Estufa (TFSE)** | | | | **Amostra em Condição de Campo (ACC)** | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **N.F** | **RMSE** | **RPD** | **$R^2$** | **N.F** | **RMSE** | **RPD** | **$R^2$** |
| Argila ($g.kg^{-1}$) | 17 | 7.74 | 4.57 | 0.95 | 13 | 12.18 | 3.09 | 0.89 |
| Silte ($g.kg^{-1}$) | 16 | 20.93 | 1.49 | 0.52* | 12 | 18.89 | 1.75 | 0.66* |
| Areia ($g.kg^{-1}$) | 16 | 3.12 | 4.8 | 0.94 | 13 | 4.29 | 3.49 | 0.92 |
| pH ($CaCl_2$) | 5 | 0.28 | 1.05 | 0.11 | 4 | 0.20 | 1.04 | 0.12 |
| M.O ($g.kg^{-1}$) | 12 | 2.69 | 1.07 | 0.22* | 4 | 1.75 | 1.3 | 0.41* |
| P ($mg.dm^{-3}$) | 15 | 1.44 | 1.27 | 0.42* | 4 | 1.33 | 1.16 | 0.27* |
| K ($mmol_c.dm^{-3}$) | 6 | 1.34 | 0.99 | 0.05 | 7 | 1.36 | 0.92 | 0.02 |
| Ca ($mmol_c.dm^{-3}$) | 11 | 3.38 | 1.05 | 0.16 | 13 | 3.31 | 1.03 | 0.15 |
| Mg ($mmol_c.dm^{-3}$) | 6 | 2.17 | 1.08 | 0.16* | 6 | 2.09 | 0.99 | 0.06* |
| H+Al ($mmol_c.dm^{-3}$) | 12 | 3.47 | 0.99 | 0.15 | 5 | 4.75 | 1.03 | 0.10 |
| SB ($mmol_c.dm^{-3}$) | 10 | 4.70 | 0.92 | 0.05 | 8 | 5.74 | 0.92 | 0.03 |
| CTC ($mmol_c.dm^{-3}$) | 8 | 7.48 | 1.02 | 0.12* | 5 | 5.89 | 1 | 0.05* |
| V% | 11 | 5.04 | 0.91 | 0.04* | 7 | 5.06 | 1 | 0.11* |

**N.F**: número de Fatores PLS; **RMSE**: raiz quadrada do erro médio; **RPD**: desvio padrão do erro; **$R^2$**: coeficiente de determinação; *: diferença significativa ente os modelos pelo teste t ($P < 0.05$).

Tabela 4.7 - Resultado da calibração dos modelos para as variáveis analisadas na profundidade de 60 a 80 cm, para TFSE e ACC

| Atributo | Terra Fina Seca em Estufa (TFSE) | | | | Amostra em Condição de Campo (ACC) | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | N.F | RMSE | RPD | $R^2$ | N.F | RMSE | RPD | $R^2$ |
| Argila ($g.kg^{-1}$) | 16 | 23.48 | 2.95 | 0.88 | 15 | 36.04 | 1.91 | 0.85 |
| Silte ($g.kg^{-1}$) | 15 | 40.13 | 1.59 | 0.57* | 11 | 34.17 | 1.87 | 0.73* |
| Areia ($g.kg^{-1}$) | 16 | 5.97 | 2.75 | 0.86 | 16 | 6.64 | 2.47 | 0.89 |
| pH ($CaCl_2$) | 5 | 0.17 | 1.09 | 0.17* | 5 | 0.19 | 0.97 | 0.41* |
| M.O ($g.kg^{-1}$) | 12 | 2.19 | 1.13 | 0.28* | 6 | 2.00 | 1.05 | 0.17* |
| P ($mg.dm^{-3}$) | 15 | 1.50 | 1.23 | 0.37* | 5 | 1.48 | 1.09 | 0.18* |
| K ($mmol_c.dm^{-3}$) | 6 | 0.96 | 1.05 | 0.13 | 6 | 1.70 | 1.05 | 0.12 |
| Ca ($mmol_c.dm^{-3}$) | 8 | 2.82 | 0.99 | 0.03 | 6 | 3.51 | 0.85 | 0.06 |
| Mg ($mmol_c.dm^{-3}$) | 6 | 2.31 | 1.03 | 0.08 | 6 | 2.58 | 0.93 | 0.03 |
| H+Al ($mmol_c.dm^{-3}$) | 9 | 2.84 | 0.86 | 0.02 | 6 | 2.34 | 0.97 | 0.04 |
| SB ($mmol_c.dm^{-3}$) | 6 | 4.53 | 1.01 | 0.06 | 5 | 5.65 | 0.82 | 0.02 |
| CTC ($mmol_c.dm^{-3}$) | 6 | 5.79 | 0.99 | 0.04 | 7 | 8.35 | 0.91 | 0.06 |
| V% | 5 | 2.46 | 0.98 | 0.02 | 6 | 3.07 | 0.99 | 0.07 |

**N.F**: número de Fatores PLS; **RMSE**: raiz quadrada do erro médio; **RPD**: desvio padrão do erro; **$R^2$**: coeficiente de determinação; *: diferença significativa ente os modelos pelo teste t ($P < 0.05$).

### 4.3.2 Validação dos modelos de predição

Os modelos gerados para P, K, Ca, Mg, SB e V%, não foram testados, uma vez que os resultados de calibração não mostram relações significativas entre as alterações dos dados espectrais e variações de concentração destes atributos. Já os modelos para determinação de pH, M.O, H+Al e CTC foram testados para amostras independentes não utilizadas na fase de calibração, até a profundidade de 40 cm, sendo que para camadas mais profundas estes atributos também não puderam ser estimados pela espectroscopia, devido principalmente a baixa variação de seus teores promovidos pelas doses parceladas de vinhaça.

Os modelos para as ACC foram testados mesmo quando os valores de calibração para esta foram baixos, desde que os modelos para TFSE tenham alcançado valores significativos, uma vez que um dos objetivos do presente trabalho é comparar a capacidade de predição de atributos do solo a partir dos dois tipos de amostra; não houve casos em que a calibração foi satisfatória para as ACC e não para TFSE. A determinação da granulometria do solo não sofreu influência com

relação à profundidade e tipos de amostras, portanto a validação para estes atributos físicos foram realizados para todas as profundidades de coleta.

Para a granulometria do solo na profundidade de 0 a 20 cm (Figuras 4.1 e 4.2) os modelos tiveram bom desempenho na predição de teores em novas amostras de solos, sendo que os resultados para areia ($R^2 > 0,85$ e RPD > 2,0) tiveram melhores resultados que para argila ($0,70 < R^2 > 0,85$ e $1,8 < RPD > 2,0$ ), sendo estes resultados considerados de aceitáveis a bons. Já para o teor de silte observa-se a capacidade apenas de descriminação entre altas e baixas concentrações, tanto nas amostras de TFSE como nas ACC. Utilizando a mesma metodologia e faixa do espectro, Cozzolino e Moron (2003), obtiveram valores semelhantes ao deste estudo.

Para os atributos químicos pH, M.O, H+Al e CTC, as amostras de TFSE (Figura 4.1) indicam potencial apenas para diferenciação de baixas e altas concentrações destes elementos ($0,50 < R^2 > 0,65$ e RPD ~ 1,5), no entanto para as ACC (Figura 4.2) na camada superficial do solo, apenas os teores de M.O mostraram resultados significativos. Os baixos resultados encontrados no presente trabalho para os atributos químicos, pode estar ligado principalmente a característica do solo em estudo, por possui altos teores de argila, sendo sua curva espectral governada pela presença de óxidos, possuindo geralmente elevados teores de M.O (BELLINASO et al., 2010).

Na profundidade de 20 a 40 cm, a exatidão dos modelos para determinação da granulometria não foram muito próximos aos resultados obtidos nas camadas superficiais do solo, sendo classificados como modelos aceitáveis a bons. Na determinação dos atributos químicos os resultados obtidos também se aproximaram daqueles anteriormente citados para as amostras de TFSE (Figura 4.3), no entanto o desempenho das ACC (Figura 4.4) foi melhor, se aproximando dos resultados obtidos com TFSE.

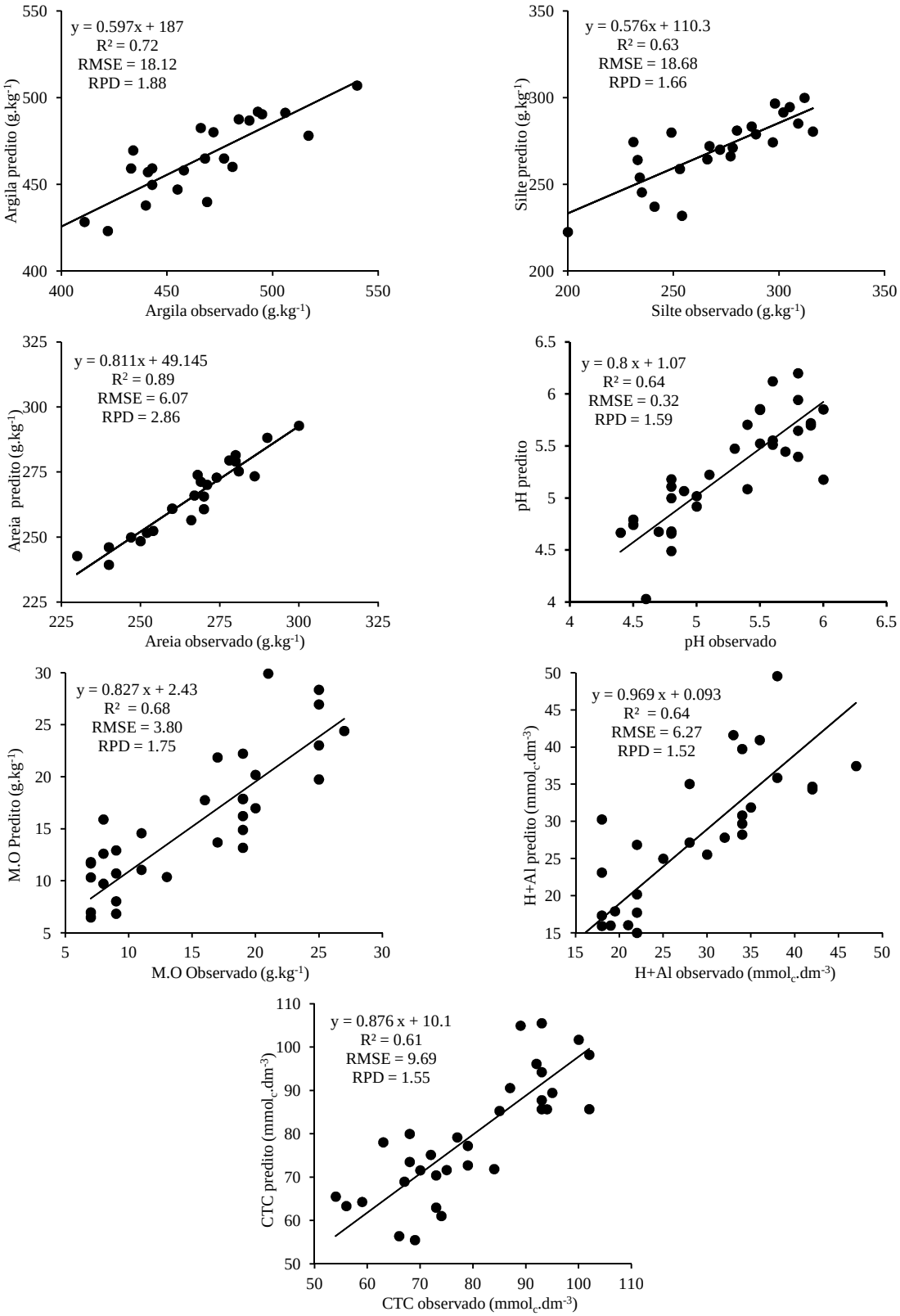


Figura 4.1 – Validação dos modelos PLS para os atributos químicos e físicos na profundidade de 0 a 20 cm para TFSE

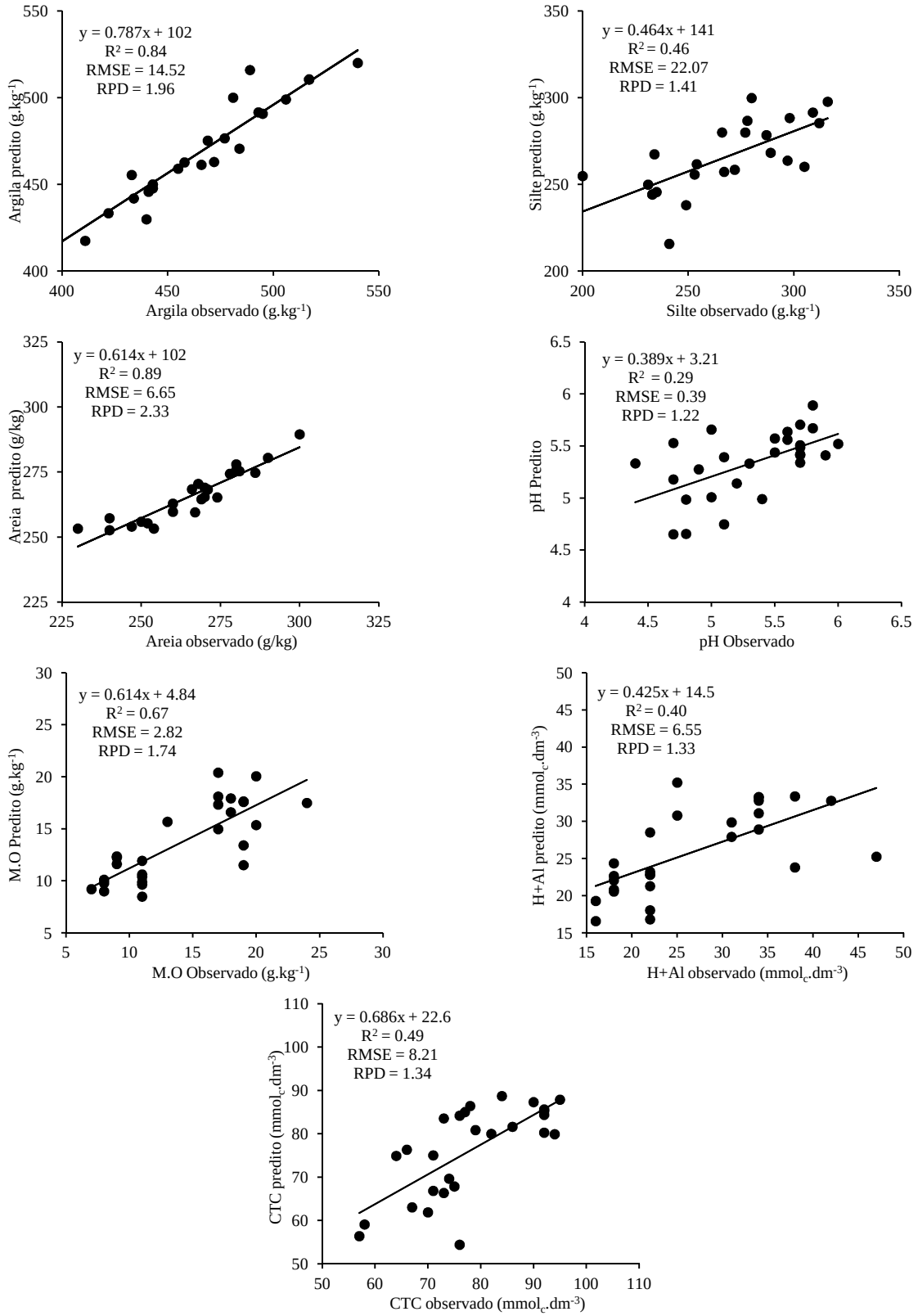


Figura 4.2 – Validação dos modelos PLS para os atributos químicos e físicos na profundidade de 0 a 20 cm para ACC

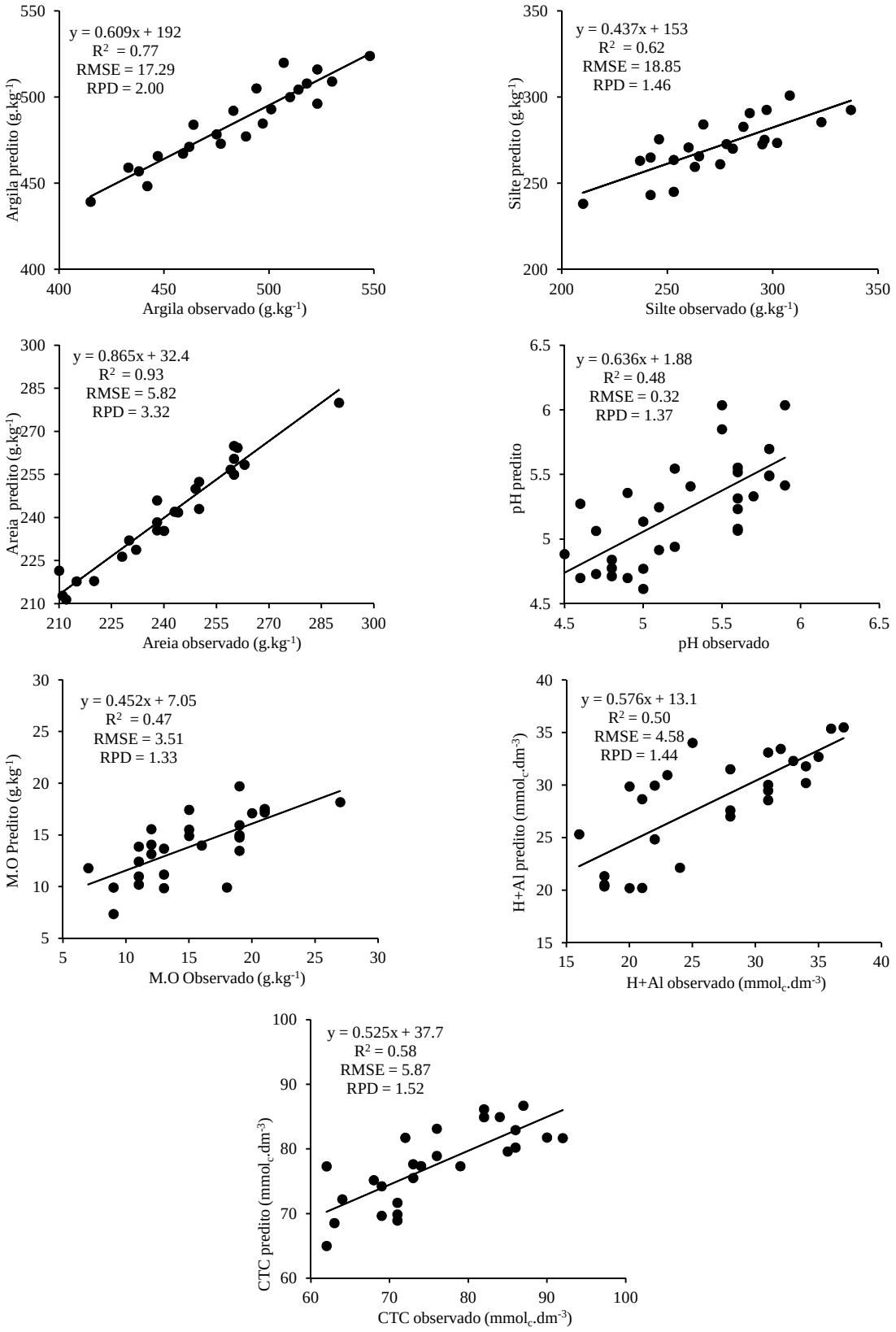


Figura 4.3 – Validação dos modelos PLS para os atributos químicos e físicos na profundidade de 20 a 40 cm para TFSE

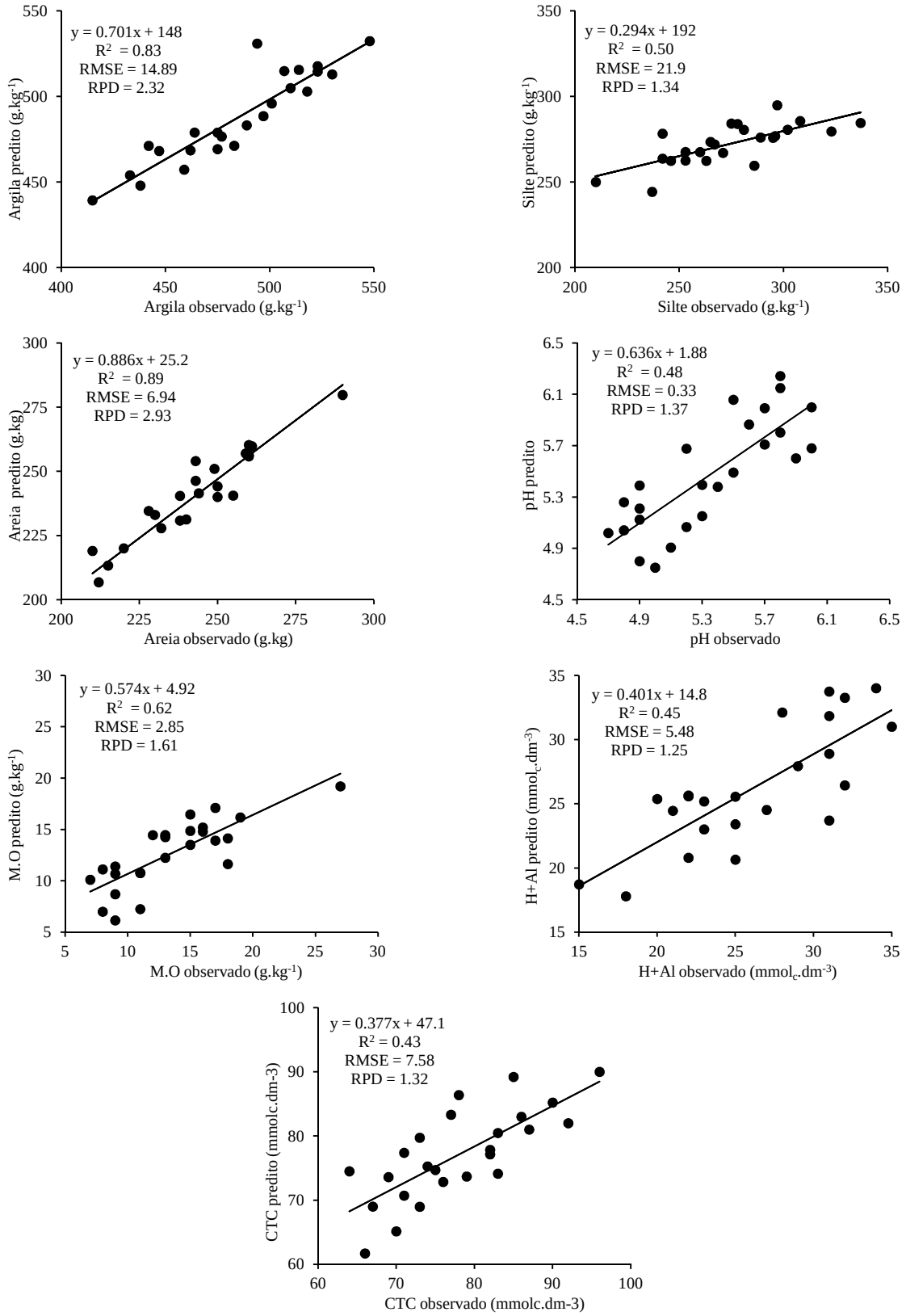


Figura 4.4 – Validação dos modelos PLS para os atributos químicos e físicos na profundidade de 20 a 40 cm para ACC

Segundo Zanette et al. (2007), a camada superficial do solo, sofre maiores influências externas, principalmente com relação a umidade que geralmente apresenta alta variação espacial, sendo este fenômeno normalizado nas subcamadas, este fato pode explicar o melhor desempenho das amostras ACC nas camadas de 20 a 40 cm.

O desempenho dos modelos para as camadas de 40 a 60 cm mostram que não existiram interferência na determinação da granulometria em profundidade, quando comparados os resultados obtidos para esta profundidade com relação às superiores, nos dois tipos de amostras avaliadas (Figuras 4.5 e 4.6); o mesmo pode ser argumentado para a camada de 60 a 80 cm (Figuras 4.7 e 4.8).

Para determinação de atributos químicos do solo as amostras em condição de campo, mostraram sempre menores resultados, com maior oscilação dos modelos se comparados as amostras de TFSE. No entanto na maior parte dos casos, os resultados obtidos foram muito semelhantes, não havendo reduções significativas quanto a capacidade da determinação da granulometria do solo.

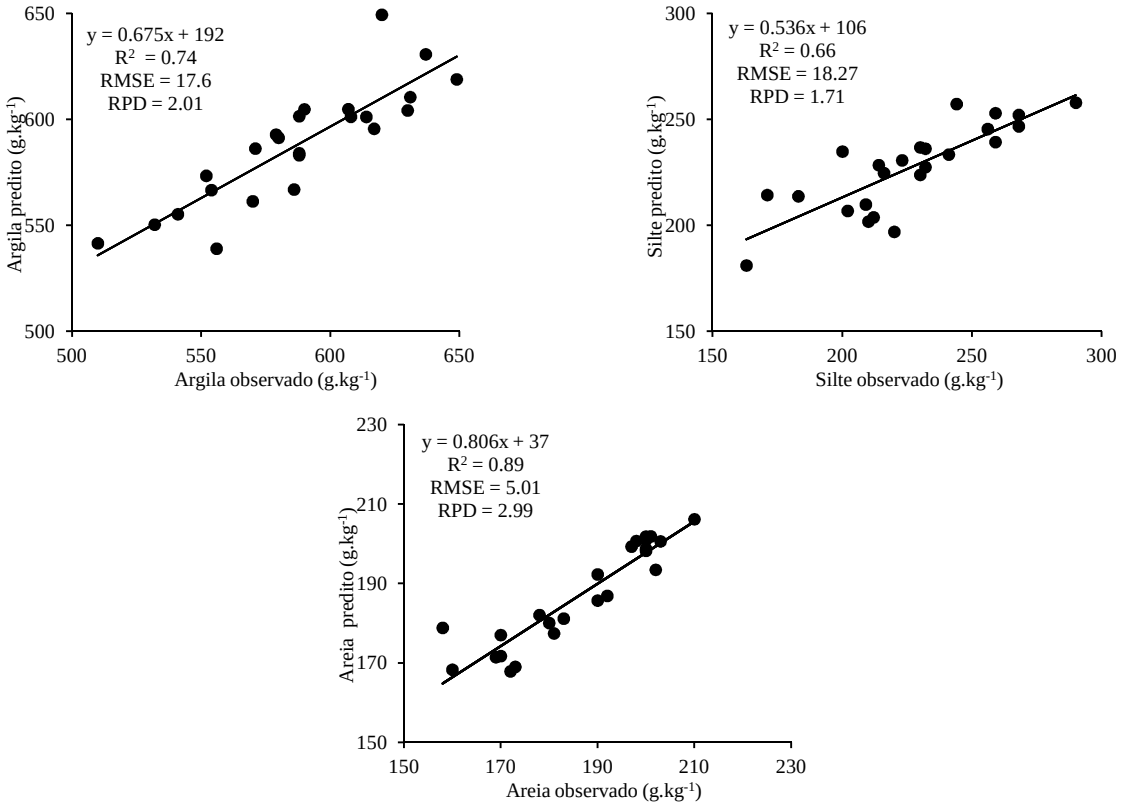


Figura 4.5 – Validação dos modelos PLS para os atributos físicos na profundidade de 40 a 60 cm para TFSE

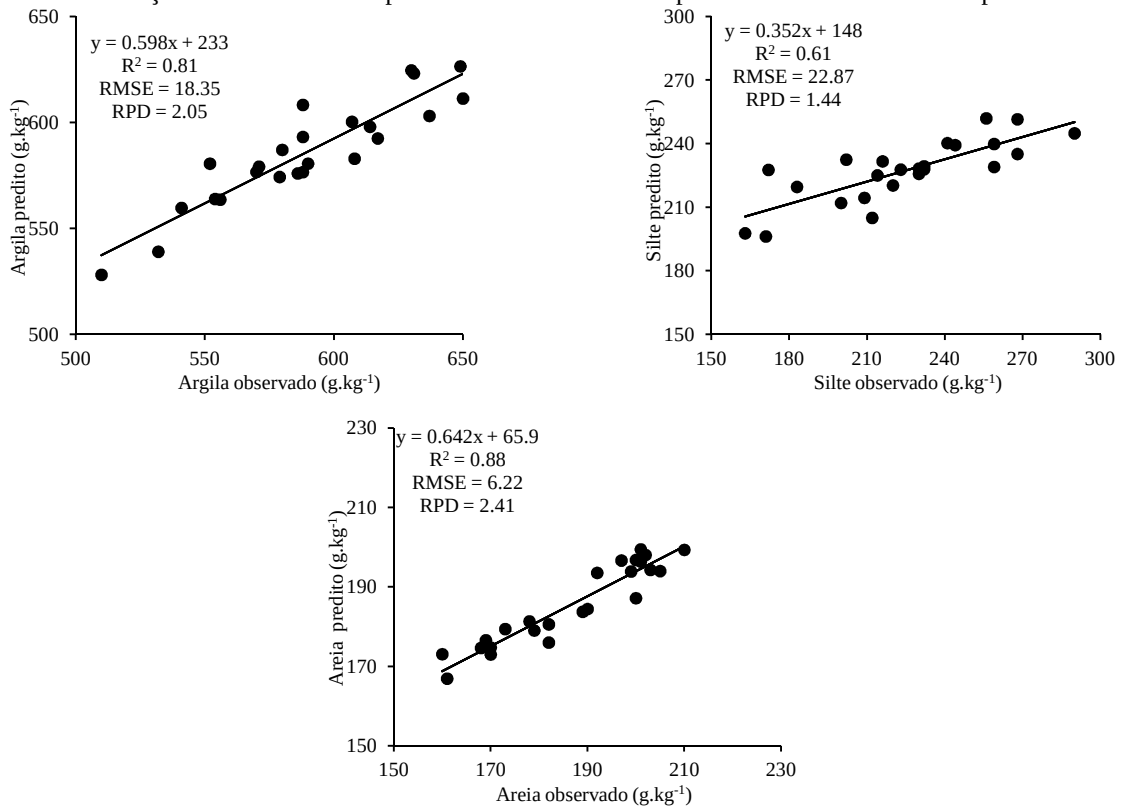


Figura 4.6 – Validação dos modelos PLS para os atributos físicos na profundidade de 40 a 60 cm para ACC

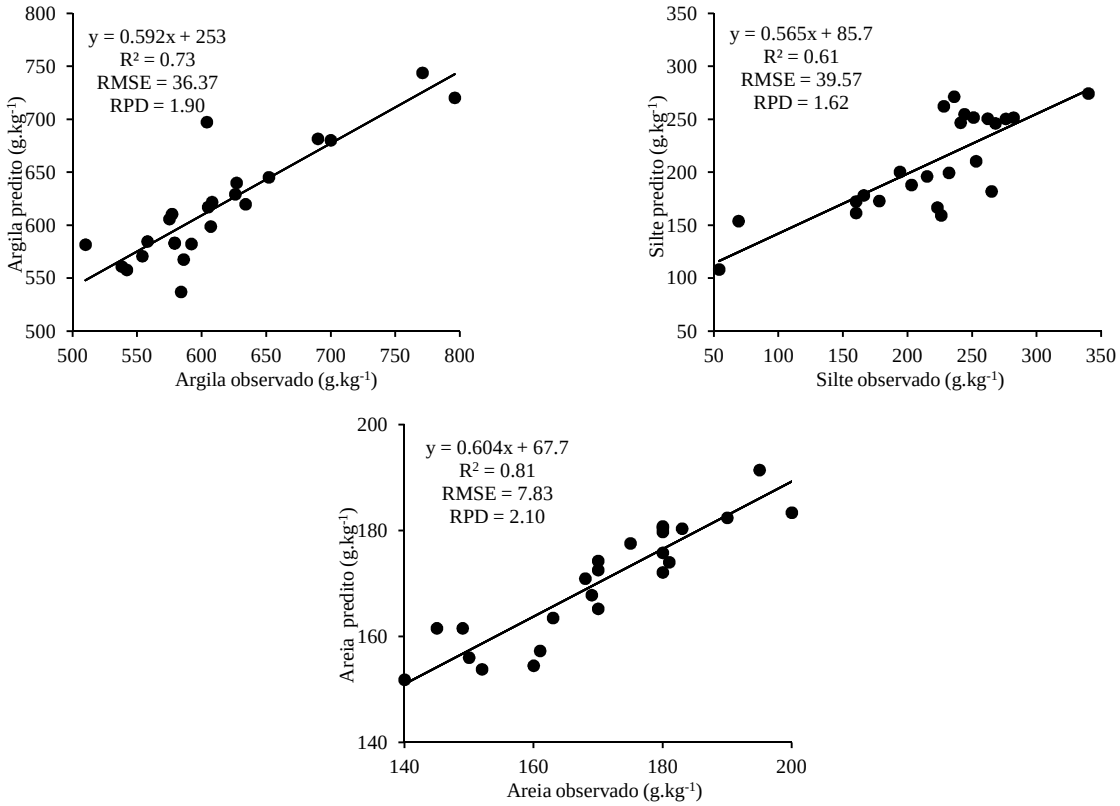


Figura 4.7 – Validação dos modelos PLS para os atributos físicos na profundidade de 60 a 80 cm para TFSE

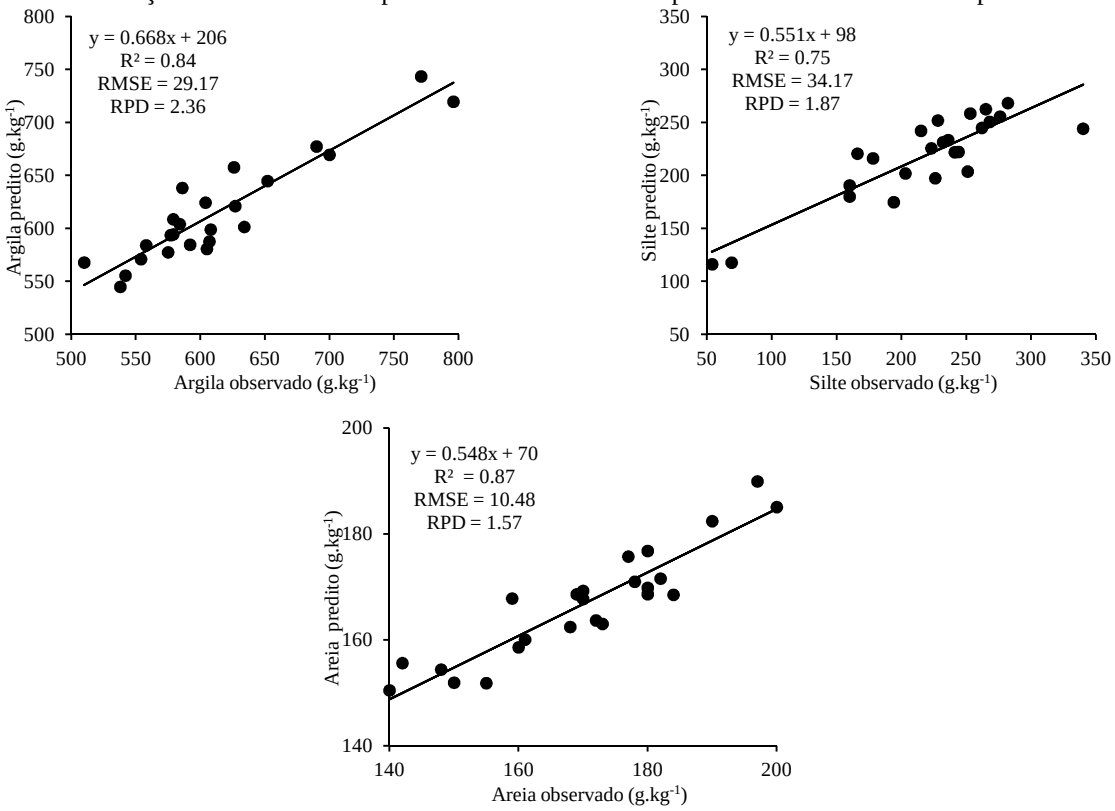


Figura 4.8 – Validação dos modelos PLS para os atributos físicos na profundidade de 60 a 80 cm para ACC

## 4.4 Conclusões

1. Foi possível estimar as frações granulométricas do solo, com exatidão aceitável a boa tanto para amostras em condição de campo quanto para terra fina seca em estufa, não havendo influência da profundidade de amostragem na eficiência dos modelos;
2. A determinação dos atributos químicos nas condições experimentais a que o solo foi submetido, satisfazem apenas a possibilidade de distinção entre altas e baixas concentrações de pH, M.O, H+Al e CTC;
3. As diferentes doses de vinhaça aplicadas de forma parcelada, não promoveram variações significativas dos atributos químicos do solo para profundidades superiores a 40 cm, o que afetou diretamente a capacidade de determinação destes atributos com o uso da espectroscopia.

## Referências

ARAÚJO, S.R. **Sensoriamento remoto laboratorial na detecção de alterações químicas no solo pela aplicação de corretivos**. 2008. 130 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

BELLINASO, H.; DEMATTÊ, J.A.M.; ROMEIRO, S.A. Spectral library and its use in soil classification. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, p. 861-867, 2010.

BROWN, D.J.; SHEPERD, K.D.; WLASH, 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, O.A.; MONIZ, A.C.; JORGE, J.A. VALADARES, J.M. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do IAC**. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas, 1986. 94 p. (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.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Norma técnica P4.231.** São Paulo, 2005. 17 p.

COHEN, M.; MYLAVARAPU, R.S.; BOGREKCI, I.; LEE, W.S.; CLARK, M.W. Reflectance Spectroscopy for routine agronomic soil analyses. **Soil Science of America Journal**, Baltimore, v. 172, n. 6, p. 469-485, 2007.

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

CUNHA, R.C.A.; COSTA, A.C.S.; MASET FILHO, B.; CASARINI, D.C. P. Effects of irrigation with vinasse and dynamics of its constituents in the soil: I – physical and chemical aspects. **Water Science Technology**, London, v. 19, n. 8, p. 155-165, 1981.

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, p. 229-237, 2000.

DEMATTÊ, J.A.M.; GARCIA, G.J. Avaliação de 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, 1999.

DEMATTÊ, J.A.M.; SOUSA, A.A.; ALVES, M.; NANNI, M.R.; FIORIO, P.R.; CAMPOS, R.C. Determing soil water status and other soil characteristics by spectral proximal sensing. **Geoderma**, Amsterdam, v. 135, p. 179-195, 2006.

DEMATTÊ, J.A.M.; NANNI, M.R.; SILVA, A.P.; MELO FILHO, J.F.; SANTOS, W.C.; CAMPOS, R.C. Soil density evaluated by spectral reflectance as an evidence of compaction effects. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 31, p. 403-422, 2010.

DUNN, B.W.; BEECHER, H.G.; BATTEN, G.D; CIAVARELLA, S. The potential 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. **Sistema brasileiro de classificação de solos.** Rio de Janeiro, 2006. 306 p.

FIORIO, P.R.; DEMATTÊ, J.A.M. Orbital and laboratory Spectral data to optimize soil analysis. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 66, p. 250-257, 2009.

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.B. Simultaneous estimation of various soil properties by ultra-violet, visible and near-infrared reflectance spectroscopy. **Australian Journal of Soil Research**, Collingwood, 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 Engineers**, St. Joseph, v. 46, n. 5, p. 1443-1453, 2003.

MARTENS, H., NAES, T. **Multivariate calibration**. Chichester: John Wiley, 1989. 419 p.

PRADA, S.M.; GUEKEZIAN, M.; SUÁREZ-ILHA, M.E.V. Metodologia analítica para a determinação de sulfato em vinhoto. **Química Nova**, São Carlos, v. 21, n. 3, p. 249-252, 1998.

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

SILVA, M.A.S.; GRIEBELER, N.P.; BORGES, L.C. Uso de vinhaça e impactos nas propriedades do solo e lençol freático. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 11, n. 1, p. 108-114, 2007.

RAIJ, B. van; QUAGGIO, J.A. **Métodos de análise do solo para fins de fertilidade**. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas, 1983. 40 p. (IAC. Boletim Técnico, 81).

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

VISCARRA ROSSEL, R.A.; CATTLE, S.R.; ORTEGA, A.; FOUAD, Y. In situ measurements of soil colour, mineral composition and clay content by vis-NIR spectroscopy. **Geoderma**, Amsterdam, v. 150, p. 253–266, 2009.

VISCARRA-ROSSEL, R.; RIZZO, R.; DEMATTÊ, J.A.M.; BEHRENS, T. Spatial modeling of a soil fertility index using visible-near-infrared spectra and terrain attributes. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 74, p. 1293-1300, 2010.

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.

WILLIAMS, P.C. Implementation of near-infrared technology. In: WILLIAMS, P.; NORRIS, K. **Near-infrared technology in the agricultural and food industries**. Saint Paul: American Association of Cereal Chemists, 2001. p. 145-169.

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

ZANETTE, S.V.; SAMPAIO, S.C.; SILVESTRE, M.G.; BOAS, M.A.V.; URIBE-OPAZO, M.A.; QUEIROZ, M.M.F. Análise espacial da umidade do solo cultivado com soja sob dois sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 11, n. 3, p. 239-247, 2007.

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 INFLUÊNCIA DA VINHAÇA E UMIDADE NA RESPOSTA ESPECTRAL DO SOLO


## Resumo

Técnicas de sensoriamento remoto estão se difundindo rapidamente por se tratar de uma fonte rápida de informações, não destrutiva e de baixo custo. O objetivo desse trabalho foi avaliar as alterações causadas pela aplicação do resíduo da cana-de-açúcar (vinhaça) na resposta espectral de um Nitossolo Vermelho Eutroférrico. O experimento foi desenvolvido na Fazenda Areão na área experimental do departamento de Engenharia Biossistemas – ESALQ/USP no município de Piracicaba, SP. O arranjo experimental foi em delineamento inteiramente casualizado (DIC), constando de 6 tratamentos e 4 repetições. Para verificar a existência de outliers e possíveis agrupamentos entre as curvas espectrais em relação aos tratamentos aplicados, foi utilizado a análise de componentes principais. Na determinação da umidade do solo para as amostras em condição de campo (ACC), utilizou-se a análise de regressão por mínimos quadrados parciais. As curvas espectrais de terra fina seca em estufa (TFSE) tiveram sempre maior reflectância que as ACC, sendo que a diferenciação espectral entre os horizontes para a primeira está relacionada principalmente ao teor de matéria orgânica, já para a segunda devido a variação de umidade no perfil do solo. Foi possível estimar a umidade do solo para as diferentes profundidades analisadas, sendo os coeficientes de determinação alcançados na validação dos modelos, próximos a 0,7. As curvas espectrais para TFSE nos tratamentos que receberam maiores doses de vinhaça tiveram maiores reflectâncias, no entanto estas variações não foram maiores que 2% quando comparadas a testemunha para toda a faixa do espectro analisada. Este comportamento se inverte quando analisadas as curvas espectrais de ACC. A análise de componentes principais de TFSE, mostraram diferenças entre as curvas espectrais, separando na maioria dos casos os tratamentos que receberam maiores e menores doses de vinhaça, já para as ACC não foi possível verificar nenhum agrupamento com relação aos tratamentos.


Palavras-chave: Espectrorradiometria; Aplicação de vinhaça; Análise de componentes principais


## Abstract

Remote sensing technical are spreading quickly to become a fast source of information, not destructive and low cost. The objective of this work was to evaluate the changes occurred due to sugar cane residue application (vinace) on spectral response of a Hapludox soil. The experiment was developed on the experimental area of the Biosystems Engineering, ESALQ-USP, in Piracicaba, São Paulo state, Brazil. The statistical arrangement was in completely randomized design, with 6 treatments and 4 repetitions. To check the existence and possible groupings between spectral curves in relation to treatments applied, it was used the principal components analysis. On determinations of soil moisture sampled at field conditions, it was used the partial least square regression. The spectral curves of air-dried soils has always higher reflectance than samples in field conditions, being that the spectral differentiation between horizons for the first are related basically to organic matter content, as for the second to variations of soil moisture on soil profile. It was possible to estimate soil moisture for different depths analyzed, with determinations coefficients close to 0.7. The spectral curves for air-dried soils in treatments that received high doses of vinace, had high reflectance, however these variations were not greater

than 2%, when compared to the parcel without vinace application for all spectrum range analyzed. This comportment is reversed when analyzed the spectral curves to samples in field conditions. The principal components analysis of air-dried soil, showed differences between spectral curves, separating in most cases the treatment that received higher and lower vinace doses, already for samples in field conditions it was not possible to check some grouping in relation to the treatments.

Keywords: Spectroradiometry; Vinace application; Principal components analysis

## 5.1 Introdução

Com a contínua expansão das áreas produtoras de cana-de-açúcar no Brasil, cresce também a produção de subprodutos oriundos da industrialização desta matéria prima, gerando grande preocupação quanto ao melhor fim para se dar a estes resíduos sem que haja grandes impactos nos Biossistemas. A vinhaça, um dos principais subprodutos da agroindústria canavieira, tem recebido grande atenção do meio científico, devido a descobertas relativamente recentes quando a sua utilização como biofertilizante (ROSSETO, 1987).

A utilização da vinhaça nos campos de produção tem mostrado resultados muito promissores quanto à melhoria das características, químicas, físicas e biológicas do solo podendo-se destacar também a redução de custos com fertilizantes, junto à reutilização dos nutrientes que seriam exportados para fora das áreas produtoras, sendo uma forte aliada na otimização da cadeia produtiva. Apesar das vantagens destacadas em torno da utilização deste subproduto, sua aplicação nos campos vem ocorrendo nos últimos anos, de forma indiscriminada, causando assim sérios problemas de fertilidade dos solos, queda de produtividade dos canaviais e elevado riscos de contaminação ambiental (CAMBIUM; CORDEIRO, 1986).

Tendo em vista que para o Brasil, não existem ainda leis específicas que regulem a aplicação de vinhaça, tampouco pessoal voltado ao monitoramento de sua aplicação, fica evidente a importância do desenvolvimento de técnicas que possibilitem o monitoramento de grandes áreas, com baixo custo de operação. Uma ferramenta que contempla estes requisitos é o sensoriamento remoto, que pode ser empregado tanto à nível de laboratório quanto a campo (HUETE, 1996).

Grande número de estudos tem utilizado técnicas de sensoriamento remoto em ciências do solo para avaliação de atributos químicos e físicos (VISCARRA ROSSEL et al., 2006),

fertilidade (VISCARRA ROSSEL et al., 2010), densidade (DEMATTÊ et al., 2010), umidade (DEMATTÊ et al., 2006) entre outros. Porém ainda são escassos os estudos voltados a avaliação da aplicação de resíduos industriais na resposta espectral do solo, em especial a vinhaça devido a importância deste subproduto na cadeia produtiva da cana-de-açúcar (DEMATTÊ et al., 2004).

De acordo com Ben-Dor et al. (1999), a resposta espectral dos solos é afetada principalmente por alterações na composição química, teor de matéria orgânica, granulometria, mineralogia da fração argila, tendo ainda o incremento dos efeitos de umidade e rugosidade quando são realizadas amostragem a campo e efeitos atmosféricos quando utilizados dados aéreos e orbitais.

Este trabalho teve como objetivo, verificar as alterações na resposta espectral do solo pela aplicação de diferentes doses de vinhaça para amostras em condição de campo (ACC) e amostras de terra fina seca em estufa (TFSE).

## 5.2 Material e métodos

### 5.2.1 Descrição do experimento

O experimento foi realizado na Fazenda Areão da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP), 22º41’55’’ de latitude sul, 47º38’41’’ longitude oeste e altitude de 511m; na área experimental do Departamento de Engenharia Biossistemas, situada no município de Piracicaba-SP. O clima da região é classificado no sistema Koppen como Cwa, denominado subtropical úmido, com pluviosidade anual em torno de 1.257 mm, sendo o período seco o inverno, as médias de temperatura são 22º C no mês mais quente, 18° C no mês mais frio e média anual de 21,4º C. O solo estudado é um Nitossolo Vermelho Eutroférrico (NVef) de acordo com a classificação brasileira de solos da Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias (EMBRAPA) (EMBRAPA, 1999). Foram realizadas coletas de solos antes a instalação do experimento para verificação das condições físicas e de fertilidade do solo, onde não foram encontradas variações espaciais significativas entre os atributos. As características químicas e físicas do solo antes da aplicação dos tratamentos podem ser observadas nas Tabelas 5.1 e 5.2, respectivamente.

Tabela 5.1 - Características químicas prévias do solo da área experimental

| Profundidade | pH | M.O. | P | K | Ca | Mg | H+Al | Al | SB | CTC | V |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $CaCl_2$ | $g.dm^{-3}$ | $mg.dm^{-3}$ | .....$mmol_c.dm^{-3}$..... | | | | | | | % |
| **0-20 cm** | 5,0 | 27 | 8 | 2,5 | 30 | 15 | 39 | 1 | 48 | 86 | 55 |
| **20-40 cm** | 5,2 | 20 | 5 | 1,7 | 28 | 14 | 33 | 0 | 43 | 77 | 57 |
| **40-60 cm** | 5,5 | 13 | 5 | 0,6 | 22 | 14 | 25 | 0 | 37 | 62 | 60 |
| **60-80 cm** | 5.6 | 12 | 5 | 0.5 | 19 | 12 | 24 | 0 | 31.5 | 55.5 | 62 |

Tabela 5.2 - Características físico-hídricas prévias do solo da área experimental

| Características | Unidade | Valor |
|---|---|---|
| Areia | $g.kg^{-1}$ | 210 |
| Silte | $g.kg^{-1}$ | 309 |
| Argila | $g.kg^{-1}$ | 481 |
| Densidade | $g.cm^{-3}$ | 1,2 |
| Capacidade de Campo | $cm^3 . cm^{-3}$ | 0,28 |
| Ponto de murcha permanente | $cm^3 . cm^{-3}$ | 0,20 |

A sulcagem para instalação do sistema de irrigação e plantio da cana foi realizada por um sulcador de duas linhas. Posteriormente o sistema de irrigação por gotejamento subsuperficial foi instalado, sendo os tubos gotejadores alocados em uma profundidade de 30 cm. O plantio foi realizado com a variedade SP 891115, visando obter de 12 a 16 gemas por metro linear. Para uma melhor utilização do sistema de irrigação selecionado, o esquema de plantio foi em fileiras duplas, sendo a configuração: 0,4 m entre linha de plantas e 1,4 m entre fileiras duplas, neste sentido, as linhas de gotejo foram instaladas no centro das fileiras duplas ficando equidistantes a 1,8 m.

Á área experimental foi dividida em 24 parcelas, com 5 linhas duplas de 8 m de comprimento cada uma. Dessa forma cada parcela possuía aproximadamente 88 $m^2$ sendo a área total do experimento de 2.112 $m^2$. Para área útil, onde foram realizadas as coletas de solos, considerou-se as três linhas duplas centrais, descartando um metro nas extremidades de cada parcela, logo cada parcela possuía 24 $m^2$ de área útil.

Apesar da grande variação da composição química da vinhaça, foi considerado o resultado médio das análises de várias amostragens e os valores obtidos estão apresentados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Resultado médio das análises químicas para macro e micronutrientes da vinhaça aplicada

| N | P | K | Ca | Mg | S | C | Na | Cu | Fe | Zn | Mn |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| .....g/L..... | | | | | | .....mg/L..... | | | | | |
| 0.35 | 0.06 | 1.91 | 0.97 | 0.20 | 0.47 | 5.20 | 122.00 | 0.40 | 17.00 | 0.70 | 6.00 |

### 5.2.2 Delineamento experimental e aplicação dos tratamentos

O arranjo experimental do experimento foi em delineamento inteiramente casualizado (DIC), com seis tratamentos e quatro repetições, que constaram de: Tratamento 1. Sem aplicação de vinhaça, com adubação segundo as recomendações para a cultura realizada no momento do plantio; Tratamento 2. Fertirrigado com fertilizantes químicos, de acordo com a marcha de absorção de nutrientes da cultura; Tratamento 3. Fertirrigado com meia dose de vinhaça recomendada para este solo de acordo com as normas técnicas da CETESB; Tratamento 4. Fertirrigado com a dose de vinhaça recomendada pela CETESB; Tratamento 5. Fertirrigado com duas vezes a dose de vinhaça recomendada pela CETESB e Tratamento 6. Fertirrigado com três vezes a dose de vinhaça recomendada pela CETESB.

Com base nas características químicas do solo (Tabela 5.1), e os resultados das análises químicas da vinhaça a ser aplicada (Tabela 5.3), as doses de vinhaça foram calculadas por meio da eq. (4.1) (CETESB, 2005).

$$m^3 \text{ vinhaça } ha^{-1} = \frac{[(0{,}05 \text{ x CTC} - \text{ks}) \text{ x } 3744 + 185]}{\text{Kvi}} \qquad (5.1)$$

Onde:

CTC = Capacidade de Troca Catiônica, expressa em cmolc/dm$^3$, a pH 7,0;

Ks = concentração de potássio no solo, expresso em cmolc/dm$^3$ , a profundidade de 0,80 metros;

3744 = constante para transformar os resultados da análise de fertilidade, expressos em cmolc/dm$^3$ ou meq /100cm$^3$, para kg de potássio em um volume de um hectare a 0,80 metros de profundidade;

185 = kg de $K_2O$ médio extraído pela cultura por ha, por corte;

Kvi = concentração de potássio na vinhaça, expressa em kg de $K_2O$ /m$^3$.

As quantidades reais aplicadas no solo foram de 150, 300, 600, e 900 $m^3$ de vinhaça por $ha^{-1}$ para os tratamentos 3, 4, 5 e 6 respectivamente, sendo estas doses, bem como as doses da fertirrigação convencional (Tratamento 2) parceladas em 4 vezes, aplicadas a cada dois meses, com início no dia 20/06/2010, visando a melhor utilização dos nutrientes pela cultura e redução de riscos de contaminação ambiental.

### 5.2.3 Coleta e monitoramento da umidade do solo

Foram realizadas amostragens deformadas de solo, utilizando o trado holandês, sendo uma amostragem simples por parcela do experimento, com seis períodos de coleta, a primeira delas antes da aplicação dos tratamentos, da segunda a quinta 24 horas após a aplicação da fertirrigação convencional e doses de vinhaça, e a sexta, dois meses após o término das aplicações, para verificação residual da vinhaça no solo sendo as datas das coletas os dias 21/06/2010, 19/08/2010, 20/10/2010, 15/12/2010, 20/02/2011 e 18/04/2011. Foram realizadas amostragem de 20 em 20 cm até a profundidade de 80 cm.

A umidade do solo para cada tratamento foi monitorada por tensiômetros instalados nas mesmas profundidades de coleta do solo sendo as leituras de umidade para comparação com as curvas espectrais realizadas o mais próximo possível dos horários de amostragem do solo.

### 5.2.4 Aquisição dos dados espectrais

Foram obtidos dados espectrais de dois tipos de amostras: 1. Amostras em Condição de Campo (ACC), 2. Terra Fina Seca em Estufa (TFSE), sendo a primeira sem nenhum tipo de tratamento, mantendo-se a condição de campo no momento da coleta, já na segunda, o solo foi seco em estufa a 45° C por 24 horas, moído e peneirado em malha de 2mm (HENDERSON et al., 1992), acondicionadas em placas de petri com diâmetro de 9 cm, formando uma camada com espessura de 1,5 cm. Os dados espectrais tanto para AODC como as de TFSE foram obtidos em laboratório com o espectrômetro FieldSpec Pro (Analytical Spectral Devices, Boulder, Colo). Trata-se de um espectrorradiômetro com fibra ótica possuindo resolução espectral de 1 nm na faixa espectral de 350 a 1100 nm, e 2 nm de 1100 a 2500 nm.

O sensor foi colocado a 27 cm de altura das amostras de solo. A fonte de iluminação utilizada foi uma lâmpada halógena de 650 W, com feixe não colimado para o plano visado, posicionada a 35 cm do recipiente amostral, com um ângulo zenital de 30 °. Como padrão de referência, foi utilizado uma placa branca de sulfato de bário considerada como padrão de 100% de reflectância. Dessa forma, a razão entre o fluxo radiante espectral refletido pela superfície de uma amostra de solo e o fluxo radiante espectral refletido por um padrão de referência, iluminados e visados sob as mesmas condições geométricas, gera o "fator de reflectância bidirecional espectral".

A partir do fator de reflectância bidirecional dos solos, são então obtidas as curvas espectrais dos solos. Para cada amostra analisada, foram efetuadas três leituras, sendo que o valor utilizado foi aquele obtido da média destas. No presente trabalho foram utilizados os comprimentos de onda de 400 a 2440 nm, uma vez que as demais bandas apresentaram elevado grau de ruído, prejudicando a interpretação das curvas.

### 5.2.5 Tratamento do conjunto de dados e análise estatística

Inicialmente foram o banco de dados contava de 120 amostras de TFSE e 120 amostras de ACC, uma vez que a primeira coleta não foi utilizada para descriminação de doses de vinhaça por ter sido realizada antes das aplicações e não possuírem leituras de umidade para esta data.

Para o tratamento dos dados e realização das análises estatísticas foi utilizado o software ParLes versão 3.1 (VISCARRA ROSSEL, 2008). Os dados foram pré-processados por metodologias consagradas em espectroscopia, visando corrigir possíveis erros e melhorar a estabilidade das análises. Primeiramente realizou-se a normalização do espectro com o processo de centralização em relação à média de reflectância das curvas. Posteriormente, para correção de possíveis erros devidos a não linearidade, os dados foram transformados em função da eq. (5.2).

$$\mathrm{Log}\,\frac{1}{\mathrm{R}} \tag{5.2}$$

Em que:

R= reflectância

As novas curvas obtidas podem ser denominadas como absorbância aparente das amostras. As variações devido ao espalhamento da luz foram corrigidas utilizando a formula de variação normal padrão (SNV), para todos os atributos analisados.

Para avaliação do efeito da vinhaça sobre as curvas espectrais do solo, foram realizadas análises de componentes principais (ACP). O software ParLes realiza a análise de componentes principais com base em algoritmos iterativos NIPALS, descrito em Martens e Naes (1989). Com tais análises em mãos foi observar se existiram agrupamentos entre os diferentes tratamentos e corrigir possíveis outliers (WORKMAN, 1992).

Os modelos para predição da umidade do solo, foram gerados por meio da análise de regressão por mínimos quadrados parciais (PLS). Esta metodologia é comumente utilizada em espectroscopia, por eliminar de forma mais eficiente erros devido a colinearidade entre variáveis, trabalhando com todos os comprimentos de onda, evitando desta maneira a perda de informações importantes. O método de regressão PLS é uma potente ferramenta de estimação do modelo de regressão linear, baseada na decomposição das matrizes de variáveis resposta e de covariáveis.

O algoritmo PLSR seleciona fatores ortogonais sucessivos com o objetivo de se obter maiores covariâncias entre os dados preditores (X, neste caso as curvas espectrais) e as variáveis resposta (y, resultados das análises de laboratório). O ajuste dos modelos PLSR, procura encontrar o menor número de fatores que expliquem a maior parte da variação tanto das variáveis preditoras quanto as de resposta. Resumidamente, a idéia do método PLS é extrair componentes que consigam capturar as variâncias das covariáveis e também obter correlações com as variáveis dependentes simultaneamente (MARTENS; NAES, 1989).

Geralmente, as matrizes de fatores resultantes, têm muito menor dimensão que as matrizes X e y originais. Após gerados os modelos, a partir de novos espectros (X), a propriedade do solo (y) pode ser estimada com uma combinação (bi)linear dos fatores de X (MARTENS; NAES, 1989).

Os modelos gerados são séries de coeficientes “b”, que apresentam uma informação interpretável da influência de cada comprimento de onda na estimativa da propriedade em questão; seu cálculo é descrito passo a passo pelas eq. (5.3, 5.4, 5.5, 5.6, 5.7 e 5.8) (WOLD et al., 2001).

$$w = c \times X_0 \times y_0 \tag{5.3}$$

Em que:

W = 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. (5.4).

$$c = (y_0^T \times X_0 \times X_0^T x y_0)^{-0.5} \tag{5.4}$$

Os *scores* e *loadings* são calculados conforme eq. (5.5).

$$\hat{t}_1 = X_0 \times \widehat{w}_1 \tag{5.5}$$

Onde:

t = matriz de uma coluna (*scores* da reflectância).

$$p_1 = \frac{X_0^T \times t_1}{t_1^T \times t_1} \tag{5.6}$$

Em que:

p1 = matriz de uma coluna (*loadings* de reflectância).

$$q_1 = \frac{y_0^T \times t_1}{t_1^T \times t_1} \tag{5.7}$$

Sendo:

q1 = matriz de uma coluna e uma fila (*loadings* do atributo).

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

$$b = w \times (p^T \times w)^{-1} \times q \tag{5.8}$$

Foi utilizado o método de validação cruzada denominado “leave-one-out”, sendo selecionados os modelos que apresentaram o menor número de fatores (N.F), com maiores coeficientes de determinação ($R^2$), menores valores de raiz quadrada do erro médio (RMSE) definida pela eq. (5.9) e maiores valores de desvio padrão do erro (RPD) definido pela eq. (5.10) (WILLIANS, 2001).

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n-m} \frac{(yi' - yi)}{n - m}} \tag{5.9}$$

Onde:

n = Número de amostras;

m = numero de amostras usadas para predição;

yi’-yi = Valores preditos e observados respectivamente.

$$\mathrm{RPD} = \frac{\mathrm{sd}}{\mathrm{SEP}} \tag{5.10}$$

Sendo:

sd = taxa de desvio padrão dos dados analisados;

SEP = erro padrão da predição

Estes parâmetros são comumente utilizados para avaliação de técnicas de espectroscopia, na determinação da melhor correlação entre as variáveis independentes e respostas espectrais.

Os modelos gerados para determinação da umidade do solo foram posteriormente testados verificando sua capacidade de estimar o atributo para novas amostras, para isto foram selecionadas previamente 25% das amostras que não foram utilizadas na calibração do modelo sendo então comparados os dados preditos pelo modelo com os dados observados a campo através de tensiometria. Este processo, segundo Dardenne at al. (2000) fornece uma idéia mais otimista da real exatidão dos modelos criados.

A avaliação do desempenho dos modelos foi realizado com base no trabalho de Araújo (2008), que utilizou os parâmetros propostos por Sayes et al. (2005), onde indicaram quatro faixas de satisfação para os valores de $R^2$, sendo elas: 1. 0,50 e 0,65, com capacidade de

descriminação entre altas e baixas concentrações do atributo; 2. 0,66 a 081, modelos de predição aceitáveis; 3. 0,82 a 0,90, modelos de predição bons; 4. Acima de 0.90 excelentes. Com relação aos valores de RPD Dunn et al. (2002) e Chang et al. (2001) sugerem que valores menores que 1,5 sejam insuficientes para a maioria das aplicações, valores entre 1,5 a 2,0 são considerados úteis e acima de 2,0 excelentes.

## 5.3 Resultados e discussão

### 5.3.1 Caracterização espectral do solo em estudo

Na Figura 5.1, pode ser observada a resposta espectral para o Nitossolo Vermelho Eutroférrico, tanto para amostras de TFSE como para ACC. As feições de absorções não sofreram grandes alterações entre os dois tipos de amostra, assim como a tendência horizontal e a baixa reflectância da curva espectral, típica desta classe de solo (EPIPHANIO et al., 1992).

As ACC tiveram sua reflectância sempre menores que as de TFSE, isso se deve basicamente aos efeitos da umidade decorrente da forte absorção exercida pela molécula da água sobre a energia eletromagnética (DALMOLIN et al., 2005) e rugosidade de superfície, que aumenta o espalhamento da luz refletida (ACCIOLY; HUETE, 2000).

É possível visualizar os picos de absorção devido à presença de óxidos de ferro nos comprimentos de onda entre 750 e 1000 nm (HUNT, 1980), o pico de absorção em 1400 nm e 1900 nm, relacionado aos processos vibracionais do grupo OH podendo estes ser relacionados à presença de argilominerais 2:1 que contém água em seu arranjo cristalino (BEN-DOR et al., 2008). Observa-se também o pico de absorção duplo característico da presença da caulinita próximo ao comprimento de onda de 2200 nm e absorção promovida pela presença de gibssita em 2300 nm (HUNT et al., 1971; FREDERICKSON, 1954).

Para as amostras de TFSE a intensidade de reflectância da camada de 0 a 20 cm, foi menor que a camada de 60 a 80 cm, isto ocorre principalmente devido à presença de maiores teores de matéria orgânica na camada superficial que para estas curvas espectrais foram em média de 2,5% de 0 a 20 cm, enquanto que para a camada de 60 a 80 cm, os valores foram de 1,2%. A matéria orgânica reduz a intensidade de reflectância para todas as faixas do espectro analisadas, sendo esta mais intensa em menores comprimentos de onda (GALVÃO;

VITORELLO, 1998), isto explica o fato que para comprimentos de onda maiores que 1850 nm, não são observadas grandes diferenças de intensidade de reflectância para as curvas espectrais dos solos de TFSE (Figura 5.1).

As amostras ACC, não mostram o mesmo comportamento, sendo que a camada de 0 a 20 cm refletiu sempre mais que a camada de 60 a 80 cm, pode-se relacionar este fenômeno a maior variação de umidade da camada superior, uma vez que em condições normais, o subsolo possui maiores teores de água, por não ter grande influenciado de fatores atmosféricos (ZANETTE et al., 2007). A umidade média para as amostras que geraram as curvas espectrais de ACC foi de 0,29 $cm^3 . cm^{-3}$ na camada superficial, enquanto que no subsolo estes valores foram em média de 0,38 $cm^3 . cm^{-3}$.

Outras características interessantes para este tipo de amostra foi à redução nas feições de absorção de óxidos de ferro, e o aumento das feições ligadas a molécula de água em 1900 nm, tendo ainda as feições acima de 2250 nm, desaparecido, devido ao efeito de ruídos aleatórios (GONG; ZANG, 1998).

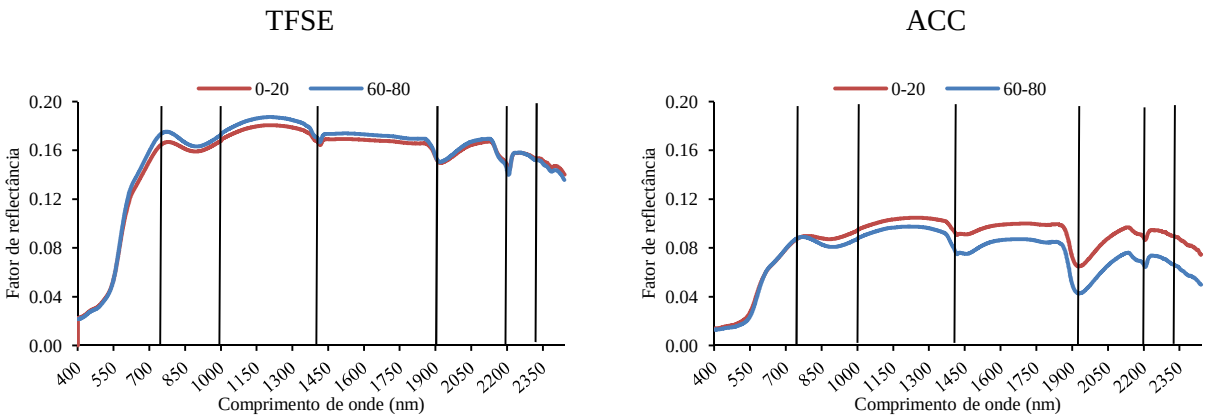


Figura 5.1- Curva espectral média para o NVef sem aplicação de vinhaça, nas profundidades de 0 a 20 e 60 a 80 cm

### 5.3.2 Determinação da umidade do solo por sensoriamento remoto

Os modelos gerados para determinação da umidade do solo (Tabela 5.4), necessitaram em geral de baixo número de fatores PLS, variando de 5 a 7, este tipo de modelo é melhor aceito, por indicar que comprimentos de onda específicos estão sendo governados pela variação do atributo analisado (ZORNOSA et al., 2008). Neste caso específico as bandas que mais influenciaram na determinação da umidade do solo foram na região do visível e principalmente os comprimentos de onda próximos a 1900 nm.

A raiz quadrada do erro médio (RMSE), variou de 0.010 a 0.013 $m^3$ de água; estes erros são pequenos, mas não representam a eficiência do modelo uma vez que as variações de umidade entre os tratamentos foram baixas. Mesmo assim os modelos gerados obtiveram valores de $R^2$ razoáveis, variando de 0.66 para a profundidade de 60 a 80 cm e 0.71 para a profundidade de 20 a 40 cm, o RPD alcançou valores entre 1,74 e 1,88 para as mesmas profundidades citadas anteriormente respectivamente. De acordo com os parâmetros encontrados na literatura para avaliação deste tipo de modelo, estes podem ser considerados como aceitáveis e úteis (SAYES et al., 2005; CHANG et al., 2001).

Tabela 5.4 – Parâmetro dos modelos gerados para determinação da umidade, utilizando a análise de regressão por mínimos quadrados parciais

| Profundidade | N.F | RMSE | RPD | $R^2$ |
|---|---|---|---|---|
| **0 a 20 cm** | 6 | 0.013 | 1.82 | 0.69 |
| **20 a 40 cm** | 7 | 0.011 | 1.88 | 0.71 |
| **40 a 60 cm** | 5 | 0.010 | 1.79 | 0.67 |
| **60 a 80 cm** | 5 | 0.011 | 1.74 | 0.66 |

**N.F**: número de fatores PLS; **RMSE**: raiz quadrada do erro médio; **RPD**: desvio padrão do erro; **$R^2$**: coeficiente de determinação

Os coeficientes que compõem os modelos gerados para predição da umidade, podem ser visualizados na Figura 5.2. Por meio destas análises é possível relacionar quais comprimentos de onda tem maior influência na estimativa das propriedades de interesse (MARTENS; NAES, 1989). No presente trabalho, independente da profundidade os modelos demonstraram basicamente três faixas do espectro com maior influência sobre a predição da umidade do solo, sendo estas a região do visível (400 a 600 nm), a faixa que vai de 1.800 a aproximadamente 2.000 nm e outra que vai de 2.200 a 2.250 nm.

A influência da região do visível pode ser relacionada às alterações de cor do solo, logo que a variação no teor de umidade tem influência sobre esta propriedade (COELHO; ALDI, 1964). Alguns autores como Bullock et al. (2004), encontraram resultados parecidos ao deste trabalho, sugerindo que a região de 1.900 nm tem maior relação com a umidade do solo, no entanto a utilização da regressão por mínimos quadrados parciais permitiu a obtenção de melhores resultados.utilizando a faixa que vai 1.000 a 2.500 nm.

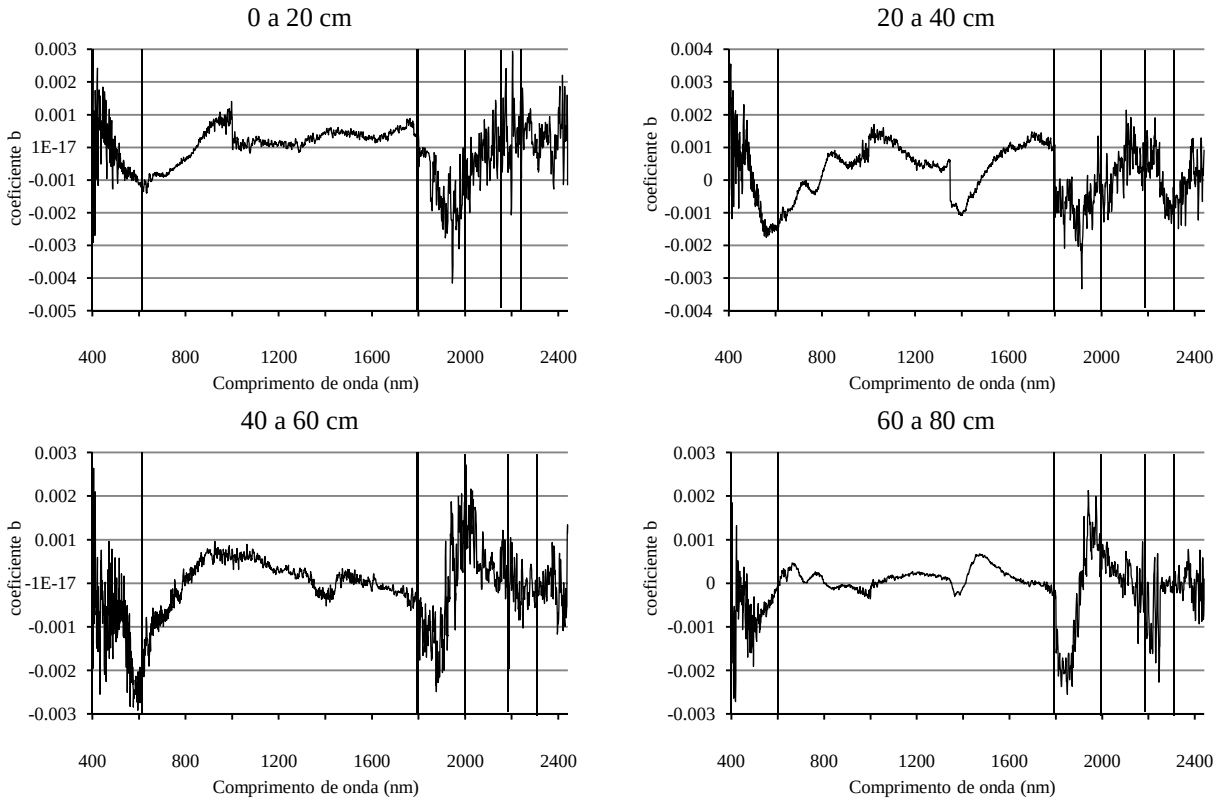


Figura 5.2 – Coeficientes “b” dos modelos PLSR gerados para predição da umidade em função do comprimento de onda

Na etapa de validação dos modelos (Figura 5.3), o desempenho destes foram muito próximos aos valores previamente observados na fase de calibração, com $R^2$ variando de 0.66 a 0.76 e RPD de 1.71 a 2.09. Estes valores são próximos aos encontrados por Ben-Dor e Banin (1995) utilizando análise de regressão múltipla para comprimentos de onda entre 1000 e 2500 nm com $R^2$ de 0,62; no entanto são inferiores a de estudos mais recentes, como pode ser citado o trabalho de Chang et al. (2001) com o emprego da análise de regressão por componentes principais para os mesmos comprimentos de onda utilizados neste trabalho alcançando $R^2$ 0,84.

0 a 20 cm 20 a 40 cm

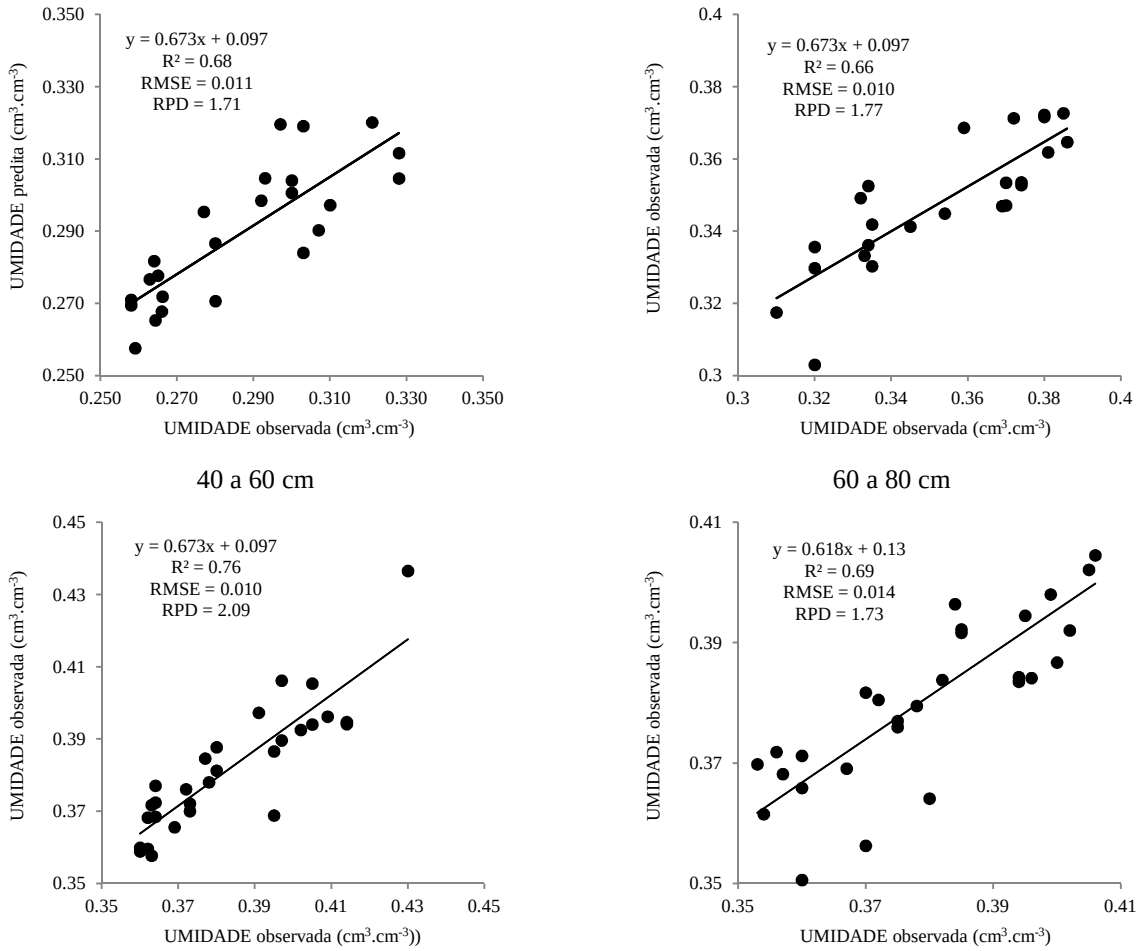


Figura 5.3 – Validação dos modelos para determinação da umidade do solo nas diferentes profundidades

É evidente o potencial da utilização do sensoriamento remoto na determinação de umidade para o solo em estudo, uma vez que neste trabalho a calibração foi realizada com base em dados de umidade obtidos a campo por tensiômetros, podendo os erros para o modelo estar ligados neste caso principalmente ao fato do local de leitura de umidade não ser o mesmo da coleta de solo, portanto novos estudos podem contribuir a melhoria destes modelos.

### 5.3.3 Influência das doses de vinhaça na resposta espectral do solo

As curvas espectrais do solo para amostras de TFSE (Figura 5.4) mostram uma tendência de aumento na reflectância para os tratamentos com maiores doses de vinhaça, sendo que o tratamento fertirrigado teve comportamento espectral muito similar ao da testemunha. No entanto estas diferenças de intensidade são muito pequenas não sendo maiores que 2% para qualquer

região do espectro, quando comparadas as curvas com maior e menor reflectância; sendo que as feições de absorção não sofreram interferência quando comparadas as curvas em uma mesma profundidade. Este comportamento foi observado neste caso, até a camada de 40 cm, uma vez que as curvas para camadas mais profundas não tiveram suas variações ligadas a aplicação de vinhaça.

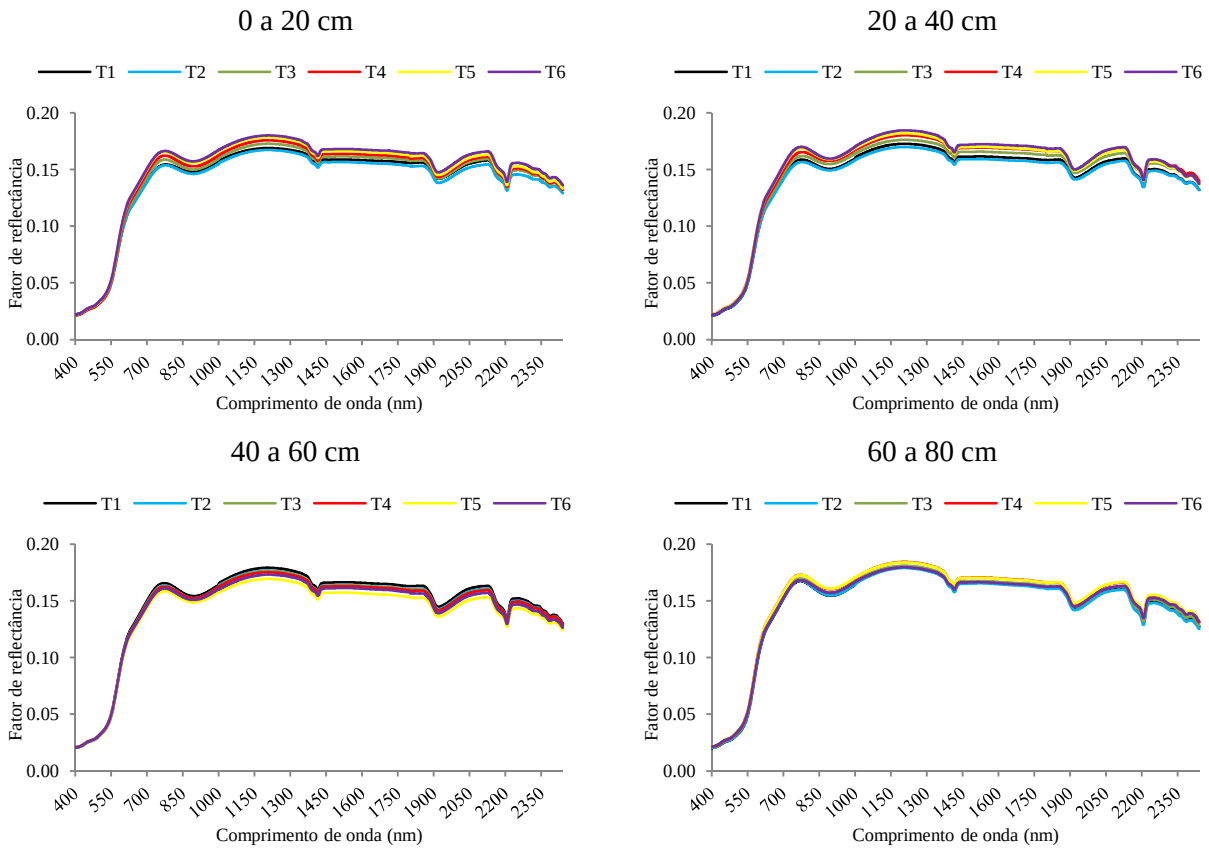


Figura 5.4 – Curvas espectrais médias de TFSE para os diferentes tratamentos: T1 = sem vinhaça; T2 = Fertirrigado com químicos; T3 = Vinhaça (0,5x dose CETESB); T4 = Vinhaça (1x dose CETESB); T5 = Vinhaça (2x dose CETESB); T6 = vinhaça (3x dose CETESB)

Demattê et al. (2004) estudaram os efeitos da aplicação da vinhaça sobre a curvas espectral de dois diferentes tipos de solo do estado de São Paulo, em condições controladas de laboratório, verificaram o mesmo comportamento em relação ao aumento da reflectância dos solos com o incremento das doses de vinhaça. Em outro estudo de Demattê et al. (2005) utilizando outro subproduto da industria canavieira (torta de filtro) observaram diferentes comportamentos para tipos específicos de solo, causando a redução da reflectância em solos mais claros, aumento da reflectância para solos intermediários, não ocorrendo variações em solos

escuros, enfatizando assim a importância de estudos particulares para cada solo, com relação a influência da aplicação de subprodutos industriais na resposta espectral destes.

Em relação às curvas espectrais para ACC (Figura 5.5), o comportamento se inverte em relação aquele observado anteriormente, sendo que os solos que não receberam vinhaça apresentaram maiores reflectâncias. Este fato pode estar ligado a condições específicas criadas pela interação entre a vinhaça e a umidade do solo. Isto sugere que abordagens de campo para detecção da vinhaça no solo por espectrometria, não podem se basear em dados prévios obtidos em condições controladas de laboratório, pois os resultados obtidos para ACC diferem dos anteriormente discutidos neste trabalho para TFSE e também das observações de Demattê et al. (2004).

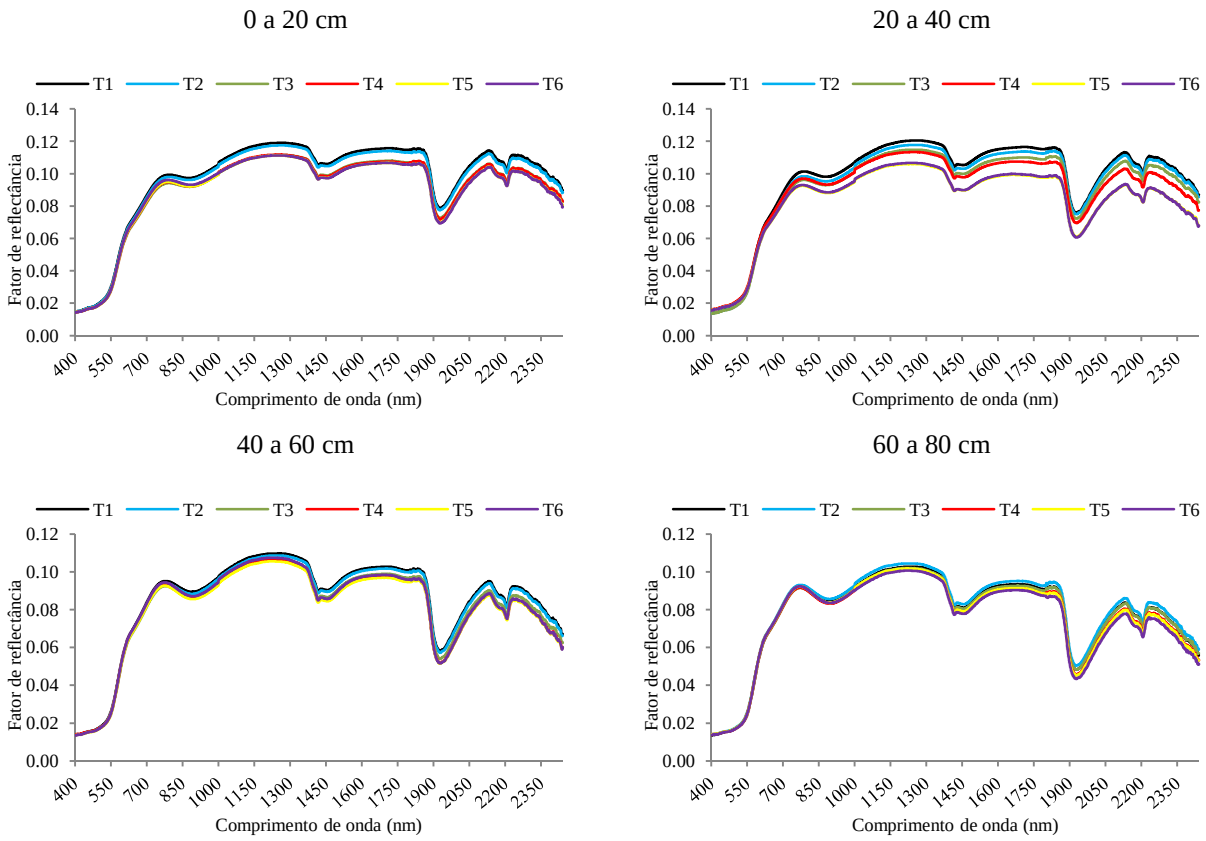


Figura 5.5 – Curvas espectrais médias de ACC para os diferentes tratamentos: T1 = sem vinhaça; T2 = Fertirrigado com químicos; T3 = Vinhaça (0,5x dose CETESB); T4 = Vinhaça (1x dose CETESB); T5 = Vinhaça (2x dose CETESB); T6 = vinhaça (3x dose CETESB)

Em todos os casos para a análise de componentes principais (ACP) os componentes 1 e 2 representaram mais que 90% das variações das curvas espectrais, isto se deve principalmente ao de fato de que não ocorreram mudanças significativas nas feições de absorção das curvas e as

variações de intensidade, como visto anteriormente foram baixas. Nestas situações, de acordo com Hair et al. (2006), justifica-se a utilização apenas de CP1 e CP2 para representação da variabilidade dos dados em questão, uma vez que os demais componentes representaram uma fração pequena da variação das curvas espectrais, não favorecendo a diferenciação dos tratamentos.

Os resultados das ACP para TFSE vêm a reforçar o fato de que houveram de maneira geral alterações entre as curvas espectrais dos diferentes tratamentos, no entanto para todos os casos houve confusões entre os tratamentos. Apesar disto ocorreu a tendência de agrupamentos entre os tratamentos com maiores doses de vinhaça (T4, T5 e T6), sendo que o tratamento com a metade da dose recomendada (T3) se agrupou com a testemunha (T1) e na maioria dos casos o tratamento com fertirrigação química (T2) se separou dos demais. Este fato só é valido para as profundidades de 0 a 20 e 20 a 40 cm, uma vez que (Figura 5.6).

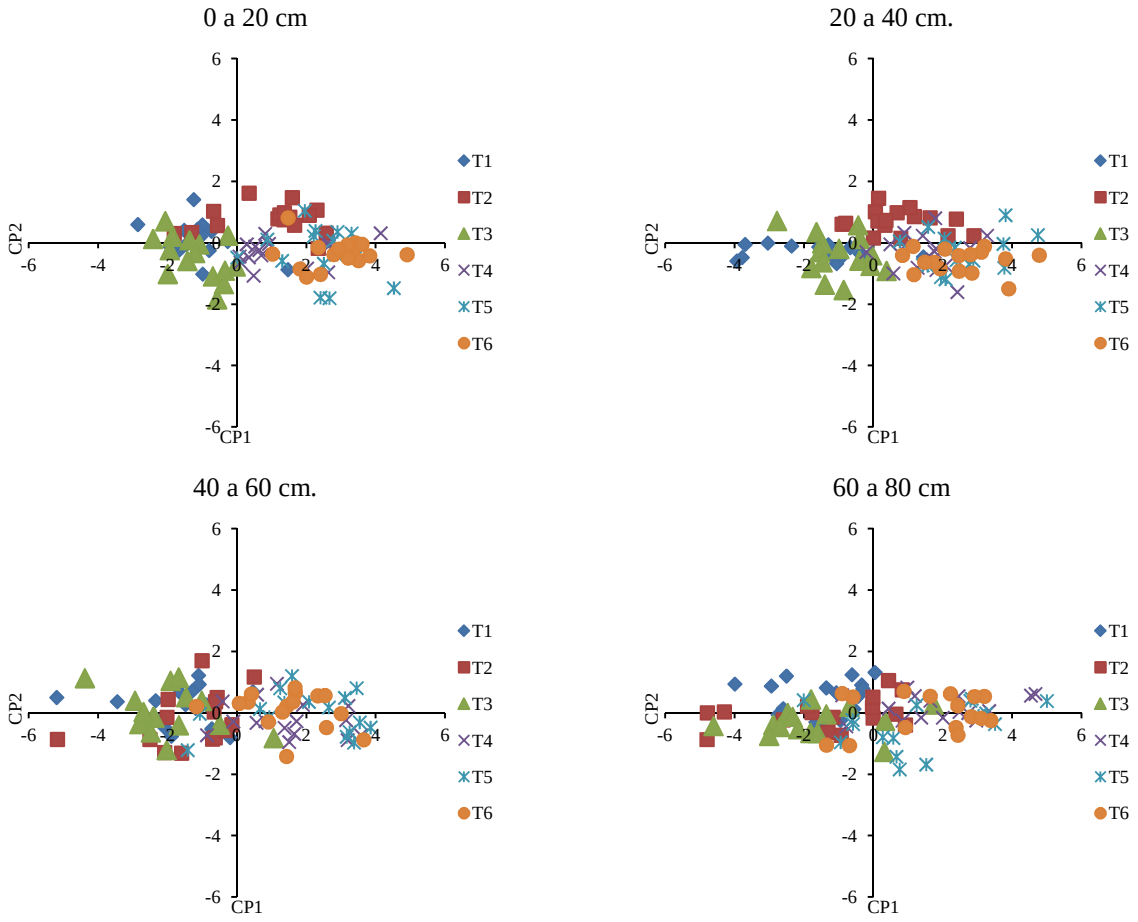


Figura 5.6 – Análise de componentes principais para TFSE, dos diferentes tratamentos: T1 = sem vinhaça; T2 = Fertirrigado com químicos; T3 = Vinhaça (0,5x dose CETESB); T4 = Vinhaça (1x dose CETESB); T5 = Vinhaça (2x dose CETESB); T6 = (3x dose CETESB)

Para as ACC, não foram observados agrupamentos entre os tratamentos para nenhuma das profundidades do perfil do solo, portanto a abordagem de componentes principais não obteve resultados aceitáveis para estas condições experimentais (Figura 5.7). Embora a curva espectral do solo seja influenciada pela ação cumulativa de todas as suas propriedades (FIORIO et al., 2003), propriedades que tenham resposta primária, tais como, granulometria, mineralogia da fração argila, matéria orgânica e umidade podem minimizar ou mascarar as ação dos demais constituintes (MADEIRA NETO, 1996).

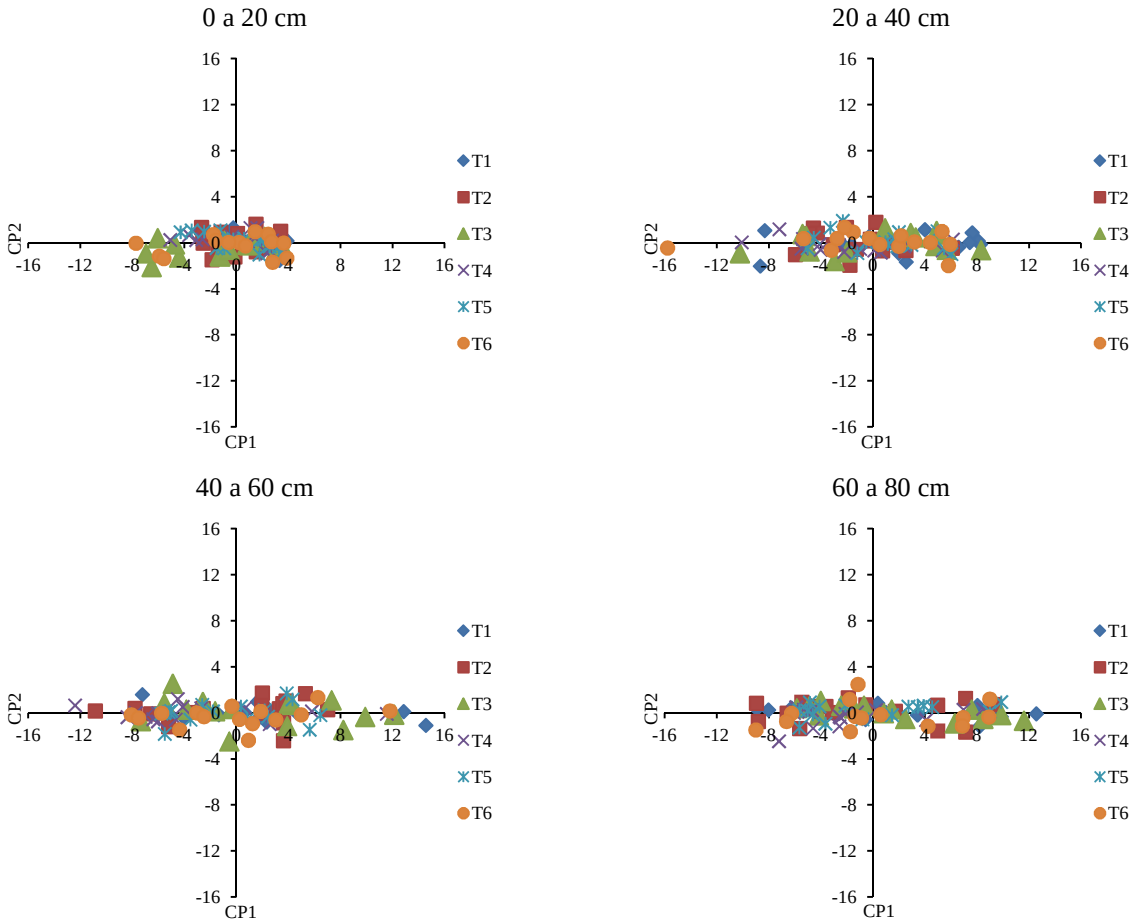


Figura 5.7 – Análise de componentes principais para ACC, dos diferentes tratamentos: T1 = sem vinhaça; T2 = Fertirrigado com químicos; T3 = Vinhaça (0,5x dose CETESB); T4 = Vinhaça (1x dose CETESB); T5 = Vinhaça (2x dose CETESB); T6 = (3x dose CETESB)

A utilização de técnicas de sensoriamento remoto para avaliação e predição de propriedades do solo, mostra grande potencial para as ambições futuras do setor agrícola brasileiro, no entanto baseando-se nos avanços de pesquisas, principalmente nos últimos anos com a implementação de técnicas e sensores avançados, aliadas a complexidade de interpretação e análise dos fatores múltiplos de uma curva espectral, como foi observado nas discussões do presente trabalho, a espectroscopia voltada ao estudo de solos ainda é uma ciência em formação, com muitos caminhos a serem explorados e entendidos pela ciência.

## 5.4 Conclusões

1. As amostras de TFSE mostraram maior intensidade de reflectância e feições de absorção mais definidas quando comparadas com as ACC, sendo as variações da primeira governadas principalmente pela M.O, enquanto que na segunda a umidade é o principal fator;
2. Foi possível a geração de modelos aceitáveis para determinação da umidade do solo tento como base valores medidos a campo, por tensiometria, mostrando o potencial da utilização de técnicas de espectroscopia na avaliação da umidade do solo;
3. As curvas espectrais dos tratamentos que receberam maiores doses de vinhaça, apresentaram maior reflectância quando analisadas amostras de TFSE, ocorrendo o inverso para as ACC, sugerindo que nem sempre os resultados obtidos em condições controladas de laboratório podem ser utilizadas como base em observações in loco;
4. A análise de componentes principais mostrou tendência de separação entre tratamentos com altas e baixas doses de vinhaça para amostras de terra fina seca em estufa até a profundidade de 40 cm, sendo que a forma de aplicação da vinhaça praticada não promoveu alterações significativas para camadas mais profundas.

## Referências

ACCIOLY, L.J.O.; HUETE, A.R. Resposta espectral de solos em razão do ângulo de visada, da umidade e da rugosidade superficial. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 12, p. 2473-2484, 2000.

ARAÚJO, S.R. **Sensoriamento remoto laboratorial na detecção de alterações químicas no solo pela aplicação de corretivos**. 2008. 130 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

BEN-DOR, E.; BANIN, A. Near-infrared analysis as a rapid method to simultaneously evaluate several soil properties. **Soil Science Society of America Journal**, Baltimore, v. 59, p. 364-372, 1995.

BEN-DOR, E.; HELLER, D.; CHUDNOVSKY, A. A novel method of classifying soil profiles in the field using optical means. **Soil Science Society of American Journal**, Baltimore, v.72, p. 1113-1123, 2008.

BEN-DOR, E.; IRONS, J.R.; EPEMA, G.F. Soil reflectance. In: RENCEZ, A.N. (Ed.). **Remote sensing for the earth sciences**: manual of remote sensing. New York: John Wiley, 1999. p. 111-188.

BULLOCK, P.R.; LI, X.; LEONARDI, L. Near-infrared spectroscopy for soil water determination in small soil volumes. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 84, p. 333–338, 2004.

CAMBUIM, F.A.; CORDEIRO, D.A. Ação da vinhaça sobre pH, acidez total, acumulação e lixiviação de nutrientes, em solo arenoso. **STAB. Açúcar Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 4, p. 27-33, 1986.

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.

COELHO, A.G.S.; AUDI, R. A côr em relação ao teor de umidade de algumas séries de solos. **Bragantia**, Campinas, v. 23, p. 117-128, 1964.

DALMOLIN, R.S.D.; GONÇALVES, C.N.; DICK, D.P. Relação entre os constituintes do solo e seu comportamento espectral. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, n. 2, p. 481-489, 2005.

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, p. 229-237, 2000.

DEMATTÊ, J.A.M.; GAMA, M.A.P.; COOPER, J.C.A.; NANNI, M.R.; FIORIO, P.R. Effect of fermentation residue on the spectral reflectance properties of soils. **Geoderma**, Amsterdam, v. 120, p. 187-200, 2004.

DEMATTÊ, J.A.M.; NANNI, M.R.; SILVA, A.P.; MELO FILHO, J.F.; SANTOS, W.C.; CAMPOS, R.C. Soil density evaluated by spectral reflectance as an evidence of compaction effects. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 31, p. 403-422, 2010.

DEMATTÊ, J.A.M.; SILVA, M.L.S.; ROCHA, G.C.; CARVALHO, L.A.; FORMAGGIO, A.R.; FIRME, L.P. Variações espectrais em solos submetidos à aplicação de torta de filtro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 3, p. 317-326, 2005.

DEMATTÊ, J.A.M.; SOUSA, A.A.; ALVES, M.; NANNI, M.R.; FIORIO, P.R.; CAMPOS, R.C. Determining soil water status and other soil characteristics by spectral proximal sensing. **Geoderma**, Amsterdam, v. 135, p. 179-195, 2006.

DUNN, B.W.; BEECHER, H.G.; BATTEN, G.D.; CIAVARELLA, S. The potential 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. **Sistema brasileiro de classificação de solos.** Rio de Janeiro, 2006. 306 p.

EPIPHANIO, J.C.N.; FORMAGGIO, A.R.; VALVFRIANO, M.; OLIVEIRA, J.B. **Comportamento espectral de solos do Estado de São Paulo**. São José dos Campos: INPE, 1992. 131 p.

FIORIO, P.R.; DEMATTÊ, J.A.M.; NANNI, M.R.; GENÚ, A.M. Regressões lineares múltiplas utilizando-se dados espectrais obtidos por sensores em laboratório e orbital, na estimativa de atributos do solo. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11., 2003, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: INPE, 2003. p. 85-92.

FREDERISCKSON, L.D. Characterization of hydrated aluminas by infrared spectroscopy: application to study of bauxite ores. **Analytical Chemistry**, Washington, v. 26, p. 1883-1885, 1954.

GALVÃO, L.S.; VITORELLO, I. Role of organic matter in obliterating the effects of iron on spectral reflectance and color of Brazilian tropical soils. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 19, p. 1969-1979, 1998.

GONG, P.; ZHANG, A. Noise effect on linear spectral unmixing. **Geographic Information Sciences**, London, v. 5, p. 52–57 1999.

HAIR, J.F.; ANDERSON, R.E.; TATHAM, R.L.; BLACK, W.C. **Análise multivariada de dados**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2005. 593 p.

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.

HUETE, A.R. Extension of soil spectra to the satellite: atmosphere, geometric, and sensor considerations. **Photo Interpretation**, Paris, v. 34, p. 101-114, 1996.

HUNT, G.R. Electromagnetic radiation: the communication link in remote sensing. In: SIEGEL, B.S.; GILLESPIE, A.R. (Ed.). **Remote sensing in geology.** New York: John Miley, 1980. p. 5-45.

HUNT, G.R.; SALISBURG, J.W.; LENHOFF, C.J. Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: III Oxides and hydroxides. **Modern Geology**, New York, v. 1, p. 195-205, 1971.

MADEIRA NETO, J.S. Spectral reflectance properties of soils. **Photo Interpretation**, Paris, v. 34, p. 34-59, 1996).

MARTENS, H., NAES, T. **Multivariate calibration**. Chichester: John Wiley, 1989. 419 p.

ROSSETTO, A.J. Utilização agronômica dos subprodutos e resíduos da indústria açucareira e alcooleira. In: PARANHOS, S.B. (Ed.). **Cana-de-açúcar:** cultivo e utilização. Campinas: Fundação Cargill, 1987. v. 2, p. 435-504.

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

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

VISCARRA-ROSSEL, R.; RIZZO, R.; DEMATTÊ, J.A.M.; BEHRENS, T. Spatial modeling of a soil fertility index using visible-near-infrared spectra and terrain attributes. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 74, p. 1293-1300, 2010.

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.

WILLIAMS, P.C. Implementation of near-infrared technology. In: WILLIAMS, P.; NORRIS, K. **Near-infrared technology in the agricultural and food industries**. Saint Paul: American Association of Cereal Chemists, 2001. p. 145-169.

WOLD, S.; SJOSTROM, M.; ERIKSSON, L. PLS regression: a basic tool of chemometrics. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, Paris, v. 58, p. 109-130, 2001.

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

ZANETTE, S.V.; SAMPAIO, S.C.; SILVESTRE, M.G.; BOAS, M.A.V.; URIBE-OPAZO, M.A.; QUEIROZ, M.M.F. Análise espacial da umidade do solo cultivado com soja sob dois sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 11, n. 3, p. 239-247, 2007.

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.