

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Programa de Pós-Graduação em Manejo e
Conservação do Solo e da Água



Dissertação

**Parâmetros de solo e de planta em diferentes
configurações de espaçamentos entre linhas da
cana-de-açúcar**

Wildon Panziera

Pelotas, 2014

WILDON PANZIERA

**PARÂMETROS DE SOLO E DE PLANTA EM DIFERENTES
CONFIGURAÇÕES DE ESPAÇAMENTOS ENTRE LINHAS DA CANA-
DE-AÇÚCAR**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências.

Orientador: Professora Dra. Cláudia Liane Rodrigues de Lima

Co-orientadores: Professor Dr. Eloy Antonio Pauletto
Pesquisador Dr. Sérgio Delmar dos Anjos e Silva

Pelotas, 2014

Catalogação na fonte
Gabriela Machado Lopes CRB: 10/1842

P199p Panziera, Wildon

Parâmetros de solo e de planta em diferentes configurações de espaçamentos entre linhas da cana-de-açúcar / Wildon Panziera ; Cláudia Liane Rodrigues de Lima, orientadora ; Eloy Antonio Pauletto, Sérgio Delmar dos Anjos e Silva, coorientadores. — Pelotas, 2014.

143 f.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, 2014.

1. *Saccharum spp.* 2. Relação solo-planta. 3. Física do solo. 4. Variabilidade espacial. 5. Abordagem espaço de estados. I. Lima, Cláudia Liane Rodrigues de, orient. II. Pauletto, Eloy Antonio, coorient. III. Silva, Sérgio Delmar dos Anjos e, coorient. IV. Título.

CDD 633.34

WILDON PANZIERA

**PARÂMETROS DE SOLO E DE PLANTA EM DIFERENTES
CONFIGURAÇÕES DE ESPAÇAMENTOS ENTRE LINHAS DA CANA-
DE-AÇÚCAR**

Banca examinadora:

Profa. Dra. Cláudia Liane Rodrigues de Lima (Orientadora)
Depto. Solos - Faculdade de Agronomia "Eliseu Maciel" – UFPel

Prof. PhD. Dalvan José Reinert
Depto. Solos – Centro de Ciências Rurais – UFSM

Pesq. Dr. Clenio Nailto Pillon
Embrapa - CPACT

Dedico:

À Deus

Aos meus pais Helvio e Maria

Aos meus irmãos Welden e Thales

À minha namorada Eliza

Agradecimentos

À Deus, pelas graças recebidas.

À minha família, pois tudo que tenho hoje devo a eles.

À Eliza, companheira exemplar, pelo amor, carinho, dedicação e compreensão.

À Orientadora, Professora Dra Cláudia Liane Rodrigues de Lima, pela orientação e transmissão de seus conhecimentos durante o mestrado.

Ao Co-orientador, Professor Eloy Antonio Pauletto pelos ensinamentos que já vem de longa data e acima de tudo, pela amizade sincera construída durante quatro anos de iniciação científica e mais dois anos de mestrado, pois a sua felicidade e alegria em trabalhar e querer fazer sempre o bem me motiva a seguir em frente.

Ao Co-orientador, Pesquisador Dr. Sérgio Delmar dos Anjos e Silva, pela oportunidade concedida de trabalhar ao seu lado, pelo planejamento e execução do experimento e sem dúvidas, pela amizade sincera construída nesse período, que pelo seu jeito sincero de agir contagia com alegria e otimismo as pessoas a sua volta.

Ao colega e amigo Márcio, que caminha junto na mesma direção a sete anos, pela sua amizade e coleguismo.

Ao Mário, pela amizade, apoio e conhecimentos transmitidos, sempre podendo contar com a sua ajuda nas horas de aperto e também nas horas boas.

Ao João e ao Eduardo pela ajuda nas coletas de campo e nas análises laboratoriais das amostras, pois sem o apoio deles tudo seria mais difícil.

Ao Leandro e ao Professor Luis Carlos Timm, pela contribuição significativa no planejamento do projeto e análise dos dados.

A toda a equipe do setor de Agroenergia da Emabrapa Clima Temperado em especial ao Sr. Vilmar, Sr. Jorge Castro, Willian, Adilson, Lucas, Luciano, Milena, Camila e ao Eder, que nunca mediram esforços para ajudar, obrigado pelo apoio, auxílio, cooperação, conhecimento transmitido, disponibilidade.

Ao pessoal do laboratório de física do solo, em especial ao Paulo, Sergio, Dona Ana, Jordano, Tiago, Gabriel, Leonir pelo auxílio e disponibilidade durante a execução das análises.

Aos colegas de pós-graduação, que nunca mediram esforços para cooperar, buscando sempre alcançar os objetivos.

À EMBRAPA – CPACT pela disposição de recursos para a elaboração do estudo.

Ao PPGMACSA, juntamente com seus professores pela oportunidade do aperfeiçoamento.

À FINEP pelo auxílio financeiro.

À COOPERCANA pela parceria em realizar o estudo, concessão da área, implantação, condução e colheita do experimento e apoio durante as realizações das avaliações.

À CAPES pelo auxílio financeiro.

***“O gaúcho desde piá vai aprendendo
A ser valente, não ter medo, ter coragem.
Em manotaços do tempo e em bochinchos
Retempera e moldura sua imagem.***

***Não podemo se entrega pros home
Mas de jeito nenhum, amigo e companheiro.
Não tá morto quem luta e quem peleia.
Pois lutar é a marca do campeiro.”***

“Não podemo se entrega pros home” – Leopoldo Rassier

RESUMO

PANZIERA, Wildon. **Parâmetros de solo e de planta em diferentes configurações de espaçamentos entre linhas da cana-de-açúcar**. 2014. 143f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas - Brasil.

A cana-de-açúcar é uma fonte energética renovável que desempenha importante papel no Brasil. Estratégias como o uso de espaçamentos combinados têm sido citadas para mitigar a compactação do solo. No entanto, há poucos estudos avaliando esses espaçamentos entre linhas quanto ao comportamento dos atributos físicos do solo e a relação com os atributos de planta. Assim, o objetivo foi relacionar parâmetros de solo e de planta em três configurações de espaçamentos entre linhas da cana-de-açúcar em ciclo de cana planta. O experimento foi implantado em Porto Xavier no RS em Agosto de 2012 onde foram avaliados três tipos de espaçamentos entre linhas da cultura: simples (LS), combinado duplo (LD) e combinado triplo (LT). Foram coletadas amostras de solo na camada de 0,00-0,20 m em Janeiro de 2013, durante o ciclo de cana planta da cultura, ao longo de uma transeção de 50 m na linha da cultura nos três tipos de espaçamentos. Foram determinados os atributos densidade do solo (D_s), porosidade total do solo (P_t), macro (Ma) e microporosidade do solo (M_i), resistência à penetração do solo (RP), umidade à base de volume na capacidade de campo (θ_{CC}), umidade à base de volume no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), capacidade de água disponível (CAD), densidade de partícula (D_p), argila, silte, areia, argila natural (AN) e o teor de carbono orgânico total (COT). Em cada ponto da transeção avaliou-se também os atributos de planta: altura do colmo (HC), diâmetro do colmo (DC), °Brix, número de colmos (NCM) e massa do colmo (MC). Para avaliar a estrutura de correlação espacial foram construídos autocorrelogramas e crosscorrelogramas. A variável MC foi correlacionada espacialmente com a argila, areia, P_t e CAD no espaçamento LD e com a Ma no espaçamento LT e não apresentou correlação cruzada com nenhum atributo no espaçamento LS. O °Brix foi crosscorrelacionado com a CAD no espaçamento LD, não apresentando crosscorrelação com nenhuma variável nos espaçamentos LS e LT. No espaçamento LS, a MC foi relacionada com HC , DC e NCM . Variáveis de solo não influenciaram a MC no espaçamento LS. No espaçamento LD, os atributos da planta não influenciaram a MC , sendo a sua variabilidade explicada pela argila, areia, P_t , CAD , através da análise de espaço de estados e pela Ma e θ_{PMP} através da regressão múltipla. No espaçamento LT a HC e o NCM contribuíram na MC e entre os atributos de solo a Ma se relacionou com a MC por meio da abordagem de espaço de estado. O °BRIX não foi influenciado por nenhum atributo da planta e do solo no espaçamento LS, sendo influenciado no espaçamento LD pela HC , DC , θ_{PMP} e CAD (este último avaliada pela abordagem de espaço de estados). Quanto ao espaçamento LT, os atributos de planta não apresentaram relação com o °BRIX e entre os do solo, somente o COT . A contribuição das variáveis do solo na massa do colmo e no °Brix é mais expressiva nos espaçamentos LD e LT, principalmente as variáveis relacionadas à disponibilidade de água.

Palavras-chave: *Saccharum spp.* Relação solo-planta. Física do solo. Variabilidade espacial. Abordagem espaço de estados.

ABSTRACT

PANZIERA, Wildon. **Soil and plant parameters in different row spacing configurations of sugarcane**. 2014. 143f. Dissertation (Master degree) – Post-Graduate Program of Soil and Water Conservation and Management. Federal University of Pelotas, Pelotas - Brazil.

The sugarcane is a renewable energy source that plays an important role in Brazil. Strategies such as the use of combined row spacing have been cited to mitigate soil compaction. However, there are few studies evaluating these row spacing of the behavior of soil physical properties and the relationship with the attributes of the plant. The objective of this study was to evaluate the soil-plant relationships in three row spacing configurations of sugarcane in first growth cycle. The experiment was established in Porto Xavier - RS in August 2012 where three types of row spacing were evaluated: one row spacing (LS), dual combined (LD) and triple combined (LT). Soil samples were collected from the 0-0.20 m layer in January 2013 during the first growth cycle of sugarcane along a 50 m transect located on the line of culture at the three row spacing types. The following attributes were determined Bulk density (BD), total soil porosity (TP), soil macro (Ma) and microporosity (Mi), soil penetration resistance (PR), volume based humidity at field capacity (θ_{cc}) and at permanent wilting point (θ_{PWP}), available water capacity (AWD), particle density (PD), soil particle size (clay, silt, sand), dispersed clay (DC) and the total organic carbon content (TOC). At each point of the transect, plant attributes were also evaluated: stalk height (H), stalk diameter (DC), °Brix, the number of stalk (NCM) and stalk mass (MC). To evaluate the structure of spatial correlation, autocorrelogramas and crosscorrelogramas were built. The MC variable was spatially correlated with clay, sand, TP and AWD in LD row spacing and with Ma in LT row spacing, while not cross-correlating with any attribute in the LS row spacing. The °Brix showed crosscorrelation with AWD in LD row spacing, but not with any variable in LS and LT row spacing. In row spacing LS, the MC was related to HC, DC and NCM. Soil variables did not influence the MC in LS row spacing. In LD row spacing, the plant attributes did not affect MC, with its variability explained by clay, sand, TP, and AWD through state space analysis, and by Ma and θ_{PWP} through multiple regression analysis. In LT row spacing, HC and NCM contributed to the MC and among soil attributes, Ma was related to the MC through the state-space approach. °BRIX was not influenced by any plant or soil attribute in LS row spacing, being influenced in the LD row spacing by HC, DC, θ_{PWP} and AWD (the latter evaluated by state space approach). In the LT row spacing, plant attributes were not associated with ° BRIX and among the soil attributes, only by the TOC. The contribution of soil variables in the mass of stalk and °Brix is more expressive in the row spacing LD and LT, mainly variables related to water availability.

Keywords: *Saccharum spp.*, soil-plant relationship, soil physics, spatial variability, state space approach.

Lista de Figuras

Figura 1 – Esquematização dos ciclos de cultivo da cana-de-açúcar (Adaptado de Syngenta®, 2013).....	23
Figura 2 – Espaçamento duplo entre linhas em cultivo mínimo de cana-de-açúcar, exemplificado por Naseri et al. (2007).	27
Figura 3 – Localização da área experimental pertencente a Coopercana, em Porto Xavier, RS.	39
Figura 4 – Precipitação média mensal na região de Porto Xavier, RS.	40
Figura 5 - Normal de temperatura mínima, máxima e média na região de Porto Xavier, RS.	41
Figura 6 – Etapas da implantação do experimento: abertura dos sulcos utilizando um sulcador de disco (a); adubador-cobridor utilizado na cobertura das mudas e distribuição do adubo(b); distribuição das mudas no sulco (c) e cobertura das mudas (d).....	42
Figura 7 – Espaçamentos entre linhas de cultivo da cana-de-açúcar adotados no presente estudo.	43
Figura 8 – Transeções utilizadas na coleta de amostras de solo.	45
Figura 9 – Localização dos pontos de amostragem de: amostras de estrutura preservada (a) e amostras de estrutura não preservada (b).	46
Figura 10 - Fluxograma dos procedimentos realizados em amostras de estrutura preservada para avaliação dos atributos físicos do solo.	46
Figura 11 – Distância (H) considerada para avaliação da altura do colmo (a) e a determinação com a régua da altura do colmo (b) da cana de açúcar em diferentes pontos de amostragem ao longo da transeção.	48
Figura 12 – Determinação do diâmetro do colmo (a), extração do caldo (b) e determinação do °Brix com refratômetro digital portátil (c).	49
Figura 13 – Colmos cortados e dispostos sobre o ponto de amostragem para avaliação do número e da massa de colmos (a), procedimento de contagem dos colmos (b) e de pesagem dos colmos (c).....	50
Figura 14 – Autocorrelogramas amostrais do °Brix da cana (°Brix - A), diâmetro do colmo (DC - B), altura do colmo (HC - C), número de colmos por metro (NCM - D) e massa do colmo (MC - E) obtido nos três espaçamentos (Linha simples - LS; Linha Dupla - LD; Linha tripla - LT).....	69
Figura 15 – Autocorrelogramas amostrais da argila (A), areia (B), silte (C), argila naturalmente dispersa (AN - D) e densidade de partículas (Dp - E) obtido nos três espaçamentos (Linha simples - LS; Linha Dupla - LD; Linha tripla - LT).	70
Figura 16 - Autocorrelogramas amostrais da porosidade total do solo (Pt - A), macroporosidade do solo (Ma - B), microporosidade do solo (Mi - C), umidade à base de volume na capacidade de campo (θ_{CC} - D), umidade à base de volume no ponto de murcha permanente (θ_{PMP} - E) nos três espaçamentos (Linha simples - LS; Linha Dupla - LD; Linha tripla - LT).	72
Figura 17 – Autocorrelogramas amostrais da densidade do solo (Ds - A), resistência à penetração (RP - B), capacidade de água disponível (CAD - C) e	

carbono orgânico total (COT – D) nos três espaçamentos (Linha simples – LS; Linha Dupla – LD; Linha tripla - LT).....	74
Figura 18 – Crosscorrelogramas amostrais entre massa do colmo e °Brix (A), porosidade total (B), ponto de murcha permanente (C), capacidade de água disponível (D) e densidade do solo (E) no espaçamento simples. .	77
Figura 19 – Crosscorrelogramas amostrais entre massa do colmo e argila (A), areia (B), argila naturalmente dispersa (C), carbono orgânico total (D) no espaçamento simples.	78
Figura 20 – Crosscorrelogramas amostrais entre massa do colmo e argila (A), areia (B), silte (C) e argila naturalmente dispersa (D) no espaçamento combinado duplo.	80
Figura 21 – Crosscorrelogramas amostrais entre massa do colmo e densidade do solo (A), porosidade total (B), umidade do solo no ponto de murcha permanente (C) e capacidade de água disponível (D) no espaçamento combinado duplo.	81
Figura 22 – Crosscorrelogramas amostrais entre massa do colmo e °Brix (A), número de colmos por metro (B) e carbono orgânico total (C) no espaçamento combinado duplo.....	82
Figura 23 – Crosscorrelogramas amostrais entre massa do colmo e °Brix (A), densidade do solo (B), resistência à penetração (C) capacidade de água disponível (D) no espaçamento combinado triplo.....	83
Figura 24 – Crosscorrelogramas amostrais entre massa do colmo e porosidade total (A), macroporosidade (B), microporosidade (C) e umidade no ponto de murcha permanente (D) no espaçamento combinado triplo.	84
Figura 25 – Crosscorrelogramas amostrais entre massa do colmo e argila (A), areia (B), silte (C) densidade de partículas (D) no espaçamento combinado triplo.....	85
Figura 26 – Crosscorrelogramas amostrais entre °Brix e argila (A), areia (B), argila naturalmente dispersa (C) e carbono orgânico total (D) no espaçamento simples.	86
Figura 27 – Crosscorrelogramas amostrais entre °Brix e massa do colmo (A), porosidade total (B), umidade no ponto de murcha permanente (C), capacidade de água disponível (D) e densidade do solo no espaçamento simples.	87
Figura 28 – Crosscorrelogramas amostrais entre °Brix e massa do colmo (A) e entre °Brix e número de colmos por metro (B) no espaçamento combinado duplo.....	88
Figura 29 – Crosscorrelogramas amostrais entre °Brix e argila (A), areia (B), silte (C), argila naturalmente dispersa (D) e carbono orgânico total (E) no espaçamento combinado duplo.....	89
Figura 30 – Crosscorrelogramas amostrais entre °Brix e densidade do solo (A), porosidade total (B), umidade no ponto de murcha permanente (C) e capacidade de água disponível (D) no espaçamento combinado duplo. .	90
Figura 31 – Crosscorrelogramas amostrais entre °Brix e massa do colmo (A), entre °Brix e densidade do solo (B) e entre °Brix e resistência à penetração (C) no espaçamento combinado triplo.	91

Figura 32 – Crosscorrelogramas amostrais entre °Brix e porosidade total (A), entre °Brix e a macroporosidade (B), entre °Brix e microporosidade (C), entre °Brix e umidade no ponto de murcha permanente (D) e entre °Brix e capacidade de água disponível (E) no espaçamento combinado triplo. ...	92
Figura 33 – Crosscorrelogramas amostrais entre °Brix e argila (A), entre °Brix e areia (B), entre °Brix e silte (C) e entre massa do colmo e silte (D) no espaçamento combinado triplo.	93
Figura 34 - Análise de espaço de estados aplicada a variável massa do colmo na posição i em função da quantidade de argila, porosidade total e capacidade de água disponível na posição i-1, no espaçamento LD.	95
Figura 35 - Regressão linear entre os valores transformados observados e estimados de massa do colmo (MC) para o primeiro modelo de estimativa de MC no espaçamento LD.	95
Figura 36 - Análise de espaço de estados aplicada a variável massa do colmo na posição i em função da quantidade de areia, porosidade total e capacidade de água disponível na posição i-1, no espaçamento LD.	97
Figura 37 - Regressão linear entre os valores transformados observados e estimados de massa do colmo (MC) para o segundo modelo de estimativa de MC no espaçamento LD.	98
Figura 38 - Análise de espaço de estados aplicada a variável massa do colmo na posição i em função da macroporosidade na posição i-1, no espaçamento LT.	100
Figura 39 - Regressão linear entre os valores transformados observados e estimados de massa do colmo (MC) no espaçamento LT.	100
Figura 40 - Análise de espaço de estados aplicada a variável °Brix na posição i em função da capacidade de água disponível na posição i-1, no espaçamento LD.	112
Figura 41 - Regressão linear entre os valores transformados observados e estimados de °Brix no espaçamento LD.	112

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Umidade do solo à base de massa no momento da colheita do experimento.....	44
Tabela 2 – Medidas de posição (média aritmética e mediana) de dispersão [valores mínimo e máximo, desvio padrão (s) e coeficiente de variação (CV)], que indicam o formato da distribuição [os coeficientes de assimetria (Ass.) e curtose (Cur.)] e o teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov das variáveis analisadas (N=50) no espaçamento entre linhas simples (LS) da cultura.....	55
Tabela 3 – Medidas de posição (média aritmética e mediana) de dispersão [valores mínimo e máximo, desvio padrão (s) e coeficiente de variação (CV)], que indicam o formato da distribuição [os coeficientes de assimetria (Ass.) e curtose (Cur.)] e o teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov das variáveis analisadas (N=50) no espaçamento entre linhas combinado duplo (LD).....	55
Tabela 4 – Medidas de posição (média aritmética e mediana) de dispersão [valores mínimo e máximo, desvio padrão (s) e coeficiente de variação (CV)], que indicam o formato da distribuição [os coeficientes de assimetria (Ass.) e curtose (Cur.)] e o teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov das variáveis analisadas (N=50) no espaçamento entre linhas combinado triplo (LT).	57
Tabela 5 – Resumo da análise de autocorrelação das variáveis de solo e de planta nos três espaçamentos (LS, LD e LT).	75
Tabela 6 – Equação da estimativa da massa do colmo (MC) pelos atributos da planta no espaçamento LS e suas medidas de qualidade de ajuste e valor de probabilidade.	101
Tabela 7 – Coeficientes da regressão da estimativa da massa do colmo (MC) pelos atributos da planta no espaçamento LS e o valor de probabilidade.	101
Tabela 8 – Equação da estimativa da massa do colmo (MC) pelos atributos da planta no espaçamento LS com os valores padronizados e suas medidas de qualidade de ajuste e valor de probabilidade.	102
Tabela 9 – Equação da estimativa da massa do colmo (MC) pelos atributos do solo no espaçamento LS e suas medidas de qualidade de ajuste e valor de probabilidade.	103
Tabela 10 – Coeficientes da regressão da massa do colmo (MC) com atributos do solo no espaçamento LS e o valor de probabilidade.	104
Tabela 11 – Equação da estimativa da massa do colmo (MC) pelos atributos da planta no espaçamento LD e suas medidas de qualidade de ajuste e valor de probabilidade.	104
Tabela 12 – Coeficientes da regressão da massa do colmo (MC) com atributos da planta no espaçamento LD e o valor de probabilidade.	104
Tabela 13 – Equação da análise de regressão múltipla entre a massa do colmo (MC) e os atributos do solo no espaçamento LD e suas medidas de qualidade de ajuste e valor de probabilidade.	105
Tabela 14 – Coeficientes da regressão múltipla entre massa do colmo (MC) e atributos do solo no espaçamento LD e o valor de probabilidade.	105

Tabela 15 – Equação da regressão múltipla com os valores padronizados entre massa do colmo (MC) e atributos do solo no espaçamento LD e suas medidas de qualidade de ajuste e valor de probabilidade.....	107
Tabela 16 – Coeficientes da regressão múltipla com os valores padronizados entre massa do colmo (MC) e atributos do solo no espaçamento LD e o valor de probabilidade.....	107
Tabela 17 – Equação da estimativa da massa do colmo (MC) pelos atributos da planta no espaçamento LT e suas medidas de qualidade de ajuste e valor de probabilidade.....	108
Tabela 18 – Coeficientes da regressão da massa do colmo (MC) com atributos da planta no espaçamento LT e o valor de probabilidade.....	108
Tabela 19 – Equação da regressão múltipla com os valores padronizados entre massa do colmo (MC) e atributos da planta no espaçamento LT e suas medidas de qualidade de ajuste e valor de probabilidade.....	108
Tabela 20 – Coeficientes da regressão múltipla com os valores padronizados entre massa do colmo (MC) e atributos da planta no espaçamento LT e o valor de probabilidade.....	109
Tabela 21 – Equação da análise de regressão múltipla entre a massa do colmo (MC) e os atributos do solo no espaçamento LT e suas medidas de qualidade de ajuste e valor de probabilidade.....	110
Tabela 22 – Coeficientes da regressão múltipla entre massa do colmo (MC) e atributos do solo no espaçamento LT e o valor de probabilidade.....	110
Tabela 23 – Equação da regressão múltipla entre °Brix e atributos da planta no espaçamento LS e suas medidas de qualidade de ajuste e valor de probabilidade.....	113
Tabela 24 – Coeficientes da regressão múltipla entre °Brix e atributos da planta no espaçamento LS e o valor de probabilidade.....	114
Tabela 25 – Equação da regressão múltipla entre °Brix e atributos do solo no espaçamento LS e suas medidas de qualidade de ajuste e valor de probabilidade.....	114
Tabela 26 – Coeficientes da regressão múltipla entre °Brix e atributos do solo no espaçamento LS e o valor de probabilidade.....	115
Tabela 27 – Equação da regressão múltipla entre °Brix e atributos da planta no espaçamento LD e suas medidas de qualidade de ajuste e valor de probabilidade.....	115
Tabela 28 – Coeficientes da regressão múltipla entre °Brix e atributos da planta no espaçamento LD e o valor de probabilidade.....	116
Tabela 29 – Equação da regressão múltipla com os valores padronizados entre °Brix e atributos da planta no espaçamento LD e suas medidas de qualidade de ajuste e valor de probabilidade.....	116
Tabela 30 – Coeficientes da regressão múltipla com os valores padronizados entre °Brix e atributos da planta no espaçamento LD e o valor de probabilidade.....	117
Tabela 31 – Equação da regressão múltipla entre °Brix e atributos do solo no espaçamento LD e suas medidas de qualidade de ajuste e valor de probabilidade.....	117

Tabela 32 – Coeficientes da regressão múltipla entre °Brix e atributos do solo no espaçamento LD e o valor de probabilidade.	118
Tabela 33 – Equação da regressão entre °Brix e θ_{PMP} no espaçamento LD e suas medidas de qualidade de ajuste e valor de probabilidade.....	119
Tabela 34 – Equação da regressão múltipla entre °Brix e atributos da planta no espaçamento LT e suas medidas de qualidade de ajuste e valor de probabilidade.....	119
Tabela 35 – Coeficientes da regressão múltipla entre °Brix e atributos da planta no espaçamento LT e o valor de probabilidade.....	119
Tabela 36 – Equação da regressão múltipla entre °Brix e atributos do solo no espaçamento LT e suas medidas de qualidade de ajuste e valor de probabilidade.....	120
Tabela 37 – Coeficientes da regressão múltipla entre °Brix e atributos do solo no espaçamento LT e o valor de probabilidade.....	121
Tabela 38 – Equação da regressão entre °Brix e COT no espaçamento LT e suas medidas de qualidade de ajuste e valor de probabilidade.....	121

Sumário

1. Introdução	17
2. Objetivos gerais	20
2.1 Objetivos específicos	20
3. Revisão Bibliográfica	21
3.1 A cana-de-açúcar no Brasil e no Rio Grande do Sul	21
3.2 Sistema de produção da cana-de-açúcar	23
3.3 Espaçamento entre linhas de cultivo da cana-de-açúcar	26
3.4 Atributos físicos em solos cultivados com cana-de-açúcar	28
3.5 Variabilidade espacial dos atributos do solo e de planta	31
3.5.1 Importância	31
3.5.2 Teoria das variáveis regionalizadas	32
3.5.3 Séries temporais e espaciais	33
3.5.4 Função de autocorrelação	34
3.5.5 Função de crosscorrelação	36
3.5.6 Abordagem em espaço de estados	36
4. Material e Métodos	39
4.1 Localização e caracterização da área experimental	39
4.2 Implantação do experimento	41
4.3 Colheita	44
4.4 Avaliação de atributos físicos do solo	44
4.5 Avaliações de atributos da planta	48
4.6 Análise dos dados	50
5. Resultados e Discussão	54
5.1 Estatística descritiva	54
5.2 Análise de autocorrelação amostral	67
5.3 Análise de crosscorrelação amostral	76
5.3.1 Análise de crosscorrelação amostral entre massa do colmo (MC) e variáveis com autocorrelação espacial nos três espaçamentos	76
5.3.2 Análise de crosscorrelação amostral entre °Brix e variáveis com dependência espacial nos três espaçamentos	86
5.4 Relação entre massa do colmo e variáveis de planta e de solo nos três tipos de espaçamentos entre linhas da cultura da cana-de-açúcar	94
5.4.1 Abordagem de espaço de estados	94
5.4.2 Análise de regressão linear múltipla	101

5.5 Relação entre °Brix e variáveis de planta e de solo nos três tipos de espaçamentos entre linhas da cultura da cana-de-açúcar	111
5.5.1 Abordagem de espaço de estados	111
5.5.2 Análise de regressão linear múltipla.....	113
6. Conclusões	122
7. Referências Bibliográficas	123
8. Apêndices	137

1. Introdução

Os impactos à natureza causados pelo homem e as mudanças climáticas, até então de origem desconhecida, mas com diversas associações a efeitos antrópicos pressionam a uma discussão na mudança da matriz energética mundial.

O etanol tornou-se uma alternativa energética extremamente sustentável, criando ao Brasil uma oportunidade estratégica, pois o setor sucroalcooleiro brasileiro é referência mundial em produção de etanol, liderando o ranking internacional. Na safra 2012, conforme apresentado pelo IBGE (2013), o País produziu 670,8 milhões de toneladas desta cultura, sendo 50,5% desta produção destinada à fabricação de etanol, o que corresponde a um volume de aproximadamente 27 milhões de m³ (anidro mais hidratado).

A produção de cana-de-açúcar no País concentra-se principalmente nas regiões Sudeste e Nordeste (UNICA, 2013). No entanto, devido ao cenário favorável, vários estados da federação estão aumentando a produção de cana-de-açúcar com o incremento da área, melhorias no sistema de produção e instalação de novas usinas, formando novas frentes de expansão da cultura no País. Um exemplo são os Estados do Centro-Oeste (Goiás e Mato Grosso do Sul), que de 2009 até 2013 aumentaram em aproximadamente 100% a produção (UNICA, 2013). A região Sul do País é outra frente de expansão dessa cultura. A participação do Rio Grande do Sul na produção nacional de cana-de-açúcar é, ainda incipiente, mas promissora. A área colhida com cana no Estado em 2011 foi de, aproximadamente 33 mil hectares representando menos de 1% da área nacional (UNICA, 2013). Destes, apenas 2 mil hectares são destinados à produção de etanol (SILVA et al., 2008).

Atualmente, a única usina de produção de etanol em atividade no Estado, localizada no município de Porto Xavier, atende menos de 2% da demanda deste combustível pelo Rio Grande do Sul (ALMEIDA; SILVA, 2011). Apesar desta pequena área plantada e baixa produção de etanol, o Estado tem potencial para expandir a área de cultivo de cana-de-açúcar em até 1,52 milhões de hectares,

conforme o zoneamento agroecológico da cana-de-açúcar para o Rio Grande do Sul (EMBRAPA, 2009).

No ciclo de produção, podem-se identificar as fases de plantio, tratos culturais e colheita. Nessas fases, há o transporte de fertilizantes, agrotóxicos, mudas para o plantio e colmos para moagem, em ordem crescente de intensidade de tráfego devido à quantidade de massa movimentada. A colheita é a fase mais crítica, devido à intensidade de tráfego de máquinas. Cada entrelinha é trafegada no mínimo quatro vezes, duas pela colhedora e duas pelo transbordo. Considerando que a colhedora tem uma massa de aproximadamente 20 toneladas e o transbordo totalmente carregado tem uma massa de aproximadamente 30 toneladas e o tráfego na colheita é muitas vezes realizado em condições de umidade desfavorável, há um grande potencial para a compactação do solo, principalmente no Rio Grande do Sul que apresenta características climáticas peculiares, com invernos chuvosos. A cana-de-açúcar por ser uma cultura semi-perene, acaba por acumular no solo as pressões recebidas durante, no mínimo, os cinco ciclos de cultivo que permanece sem ser renovada, acumulando efeitos negativos no solo, o que acarreta em danos as plantas.

Vários autores têm citado a compactação do solo como o principal fator limitante da produtividade da cana-de-açúcar (VERMA, 1995; TULLBERG, 1997; TULLBERG et al., 2001; BRAUNACK; MCGARRY, 2006; BRAUNACK et al., 2006; BAQUERO et al., 2012). Para reduzir a compactação, algumas medidas já estão sendo utilizadas pelos produtores, como o uso de pneus mais largos. Outras técnicas mais recentes, como o uso do piloto automático e o aumento da bitola do maquinário, realizando um tráfego controlado sobre a área têm sido utilizadas (ROQUE et al., 2010; SOUZA et al. 2012). Sob o atual sistema de cultivo há uma incompatibilidade entre o espaçamento da cultura (1,5 m) e a bitola dos equipamentos de colheita (1,83 m). Assim, o tráfego ocorre muito próximo à linha e, ocasionalmente, diretamente sobre a linha. Tullberg (1997), Tullberg et al. (2001), Braunack e McGarry (2006), Braunack et al. (2006) e Naseri et al. (2007) citam que a adequação do espaçamento entrelinhas da cultura com a bitola do maquinário através da utilização de espaçamentos combinados proporcionam melhores condições para o desenvolvimento da cultura.

Para caracterizar a qualidade estrutural do solo, pode se utilizar indicadores físicos relacionados à estrutura do solo, como: a densidade (LLANILLO et al., 2006),

a porosidade (BEUTLER et al., 2001; OLIVEIRA et al., 2001) e a resistência à penetração das raízes (HAMMAD; DAWELBEIT, 2001; TAVARES FILHO; RIBON, 2008). O uso de parâmetros de planta também pode inferir sobre a qualidade do solo, indicando se há alguma restrição para o desenvolvimento da planta, devido as suas relações com os atributos do solo (SANTI, 2007). Alguns componentes de produção da cana-de-açúcar são mais comumente utilizados para essa inferência como a massa, o diâmetro e a altura do colmo, bem como o número de colmos e a riqueza de açúcares da planta (°Brix).

As variáveis do solo e da planta que compõem o sistema solo-água-planta-atmosfera, na maioria das situações se relacionam de forma dinâmica, pois variam temporalmente e no espaço. Dessa forma, ferramentas estatísticas que procuram levar em consideração a dinamicidade do sistema, bem como o comportamento local das variáveis em estudo têm sido aplicadas nas últimas décadas (REICHARDT; TIMM, 2012). Estudos de solos foram os primeiros a evidenciar a influência da distância amostral em contraposição à crença de independência amostral. Essa variabilidade espacial das propriedades do solo tem sido objeto de estudo desde que os pesquisadores passaram a observar a pouca eficácia das ferramentas estatísticas clássicas possibilitando o uso da variabilidade espacial, de técnicas geoestatísticas e análise de séries temporais e espaciais.

O presente estudo testou a hipótese de que diferentes configurações de espaçamentos entre linhas da cana-de-açúcar alteram as relações entre os atributos do solo com os de planta.

2. Objetivos gerais

Relacionar parâmetros de solo e de planta em três configurações de espaçamentos entre linhas da cana-de-açúcar em ciclo de cana planta.

2.1 Objetivos específicos

Como objetivos específicos no estudo de três configurações de espaçamentos entre linhas da cana-de-açúcar em ciclo de cana planta têm-se:

- a) Avaliar os atributos de planta (massa, diâmetro e altura do colmo, número de colmos e °Brix) e os físicos do solo (densidade, resistência à penetração, porosidade total, macro e microporosidade do solo, umidade à base de volume na capacidade de campo e no ponto de murcha permanente, capacidade de água disponível, teores de argila, silte, areia, argila naturalmente dispersa, densidade de partículas e carbono orgânico total);
- b) Identificar e caracterizar a estrutura de variabilidade espacial de atributos da planta e dos atributos físicos do solo e;
- c) Estudar a relação entre os atributos físicos do solo com os de planta levando em consideração a variabilidade espacial.

3. Revisão Bibliográfica

3.1 A cana-de-açúcar no Brasil e no Rio Grande do Sul

A cana-de-açúcar é uma planta alógama, semi-perene, pertence à família Poaceae (Gramineae), tribo Andropogoneae e gênero *Saccharum* L. Nesse gênero existem varias espécies, sendo a *Saccharum officinarum* L. a conhecida como uma cana nobre, que constitui a base dos programas de melhoramento genético (MATSUOKA et al., 2005). Atualmente as cultivares plantadas são híbridos interespecíficos, constituindo o complexo *Saccharum* spp.

Devido ao potencial produtivo e adaptação ao clima do Brasil, a cana-de-açúcar vem exercendo grande importância econômica. Nos últimos trinta anos, com o programa Pro-álcool, a cana-de-açúcar passou a ser estratégica, não só como geradora de divisas pela exportação de açúcar, mas como fonte de energia renovável. O etanol combustível e a co-geração de energia elétrica do bagaço são, atualmente, pilares fundamentais na matriz energética do País (UNICA, 2009). Por ser uma planta de metabolismo do tipo C4, apresenta alta eficiência em converter energia luminosa em energia química, o que viabiliza, economicamente o seu uso para fins energéticos nas condições edafoclimáticas do Brasil.

De acordo com dados da FAO (2008), a área colhida com cana-de-açúcar no Brasil foi de 6,153 milhões de hectares em 2006, o que representa 30% do total da área colhida no mundo, que é em torno de 20 milhões de hectares. No Brasil, a cana-de-açúcar é a terceira cultura temporária em termos de ocupação, sendo superada somente pela soja e milho.

O Rio Grande do Sul ocupou a 21^a posição no rancking de produção de etanol hidratado na safra 2008/09, sendo ainda incipiente sua participação no setor sucroalcoleiro (UNICA, 2009). O consumo anual do Estado correspondeu a 964 milhões de litros em 2009 (ANP, 2010), que não é atendido com a sua pequena produção. Outro empreendimento de maior porte é o da Granja e Destilaria São Pedro (Grandespe) instalado em 1977, em Salto do Jacuí,

Norte do Estado, porém não produz etanol, somente aguardente. Segundo Grandespe (2011), no ano de 1983, a empresa inaugurou um moderno empreendimento destinado primeiramente à produção de etanol. Contudo, por entraves burocráticos e políticos, a região não foi considerada apta ao cultivo de cana-de-açúcar e produção de etanol, sendo excluída do programa Pro-álcool. Desta forma, a empresa optou pela produção de aguardente. Desde então, a industrialização sucroalcooleira no Estado não tem evoluído.

As características peculiares do clima no Rio Grande do Sul são apontadas como fator que interfere negativamente a expansão da cultura, devido ao maior risco de ocorrência de geadas, pois o maior rendimento das espécies comerciais ocorre nas regiões tipicamente tropicais (ALMEIDA et al., 2008a). Pesquisas realizadas recentemente apontam a viabilidade de diversas cultivares com adequados índices de qualidade para industrialização de etanol ou açúcar (SILVA et al., 2008; SILVA et al., 2010), propiciando condições favoráveis a expansão da cultura no Estado. Segundo Almeida et al. (2008a), o fotoperíodo e a radiação solar são maiores no Rio Grande do Sul, durante o período de primavera/verão, comparados a outras regiões no Brasil que possuem latitudes mais baixas. Nesse aspecto, a cana-de-açúcar aproveita essa vantagem no período de máximo desenvolvimento vegetativo, quando plantada entre Maio e Junho. Este comportamento tem permitido altas taxas de crescimento e elevados índices de produtividade no Rio Grande do Sul (RS) (VERISSIMO et al., 2012).

Neste sentido, com a re-espacialização do setor sucroalcooleiro, o RS tornou-se um dos Estados estratégicos para a expansão do cultivo da cana-de-açúcar no Brasil, pois apresenta, aproximadamente, 1,52 milhões de hectares aptos para a produção de cana-de-açúcar, conforme zoneamento agroecológico publicado pela Embrapa (EMBRAPA, 2009). Considerando que o RS possui materiais genéticos de elevada produtividade para suas condições edafoclimáticas, o cultivo de cana-de-açúcar é uma alternativa rentável para diversificação da produção agrícola no Estado. Além de ser matéria prima para diversos produtos, em especial o etanol, a energia elétrica, o açúcar e os biopolímeros, esta cultura apresenta boa resiliência em anos de estiagem, em comparação com outras, garantindo rentabilidade ao produtor, mesmo em condições adversas, como foi o caso da safra 2011/12 neste Estado, em que houve perdas de mais de 50% e próximas a 100% em algumas

regiões nas culturas da soja e do milho (ELY, 2012) sendo que na cana-de-açúcar as perdas não ultrapassaram 50%.

3.2 Sistema de produção da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar é uma cultura semiperene, pois antes de ser replantada são realizados em média quatro cortes, ou seja, cinco ciclos de cultivo em cinco anos. Neste período, existem dois ciclos da cana-de-açúcar: o que se inicia com o plantio da muda e se encerra com o primeiro corte chamado de cana-planta; e os demais denominados soqueira ou cana-soca, que começam a partir do rebrote e vão até a colheita, sendo repetidos no mínimo quatro vezes perfazendo um ciclo de cana-planta e, em média quatro ciclos de cana-soca, totalizando cinco anos de cultivo sem ter o replantio do canavial (Fig. 1).

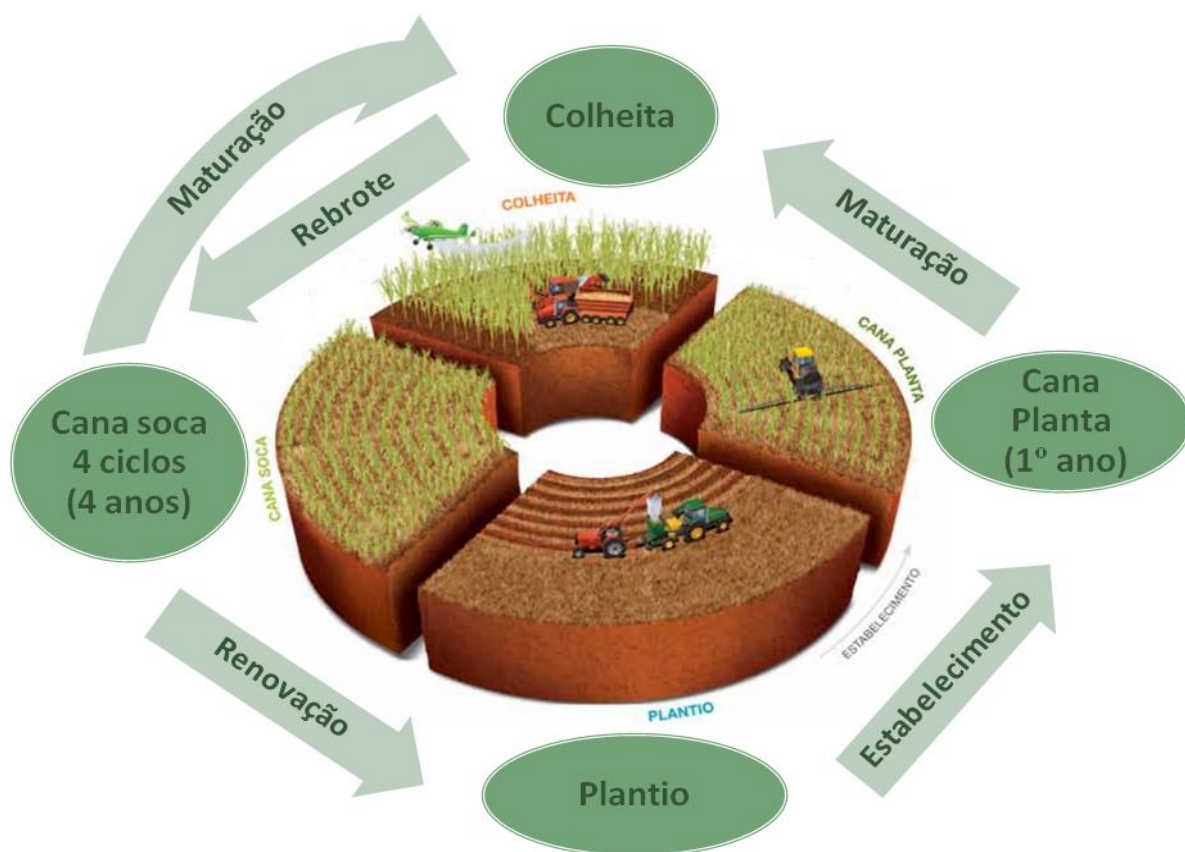


Figura 1 – Esquematização dos ciclos de cultivo da cana-de-açúcar (Adaptado de Syngenta®, 2013).

No sistema produtivo da cana-de-açúcar defini-se três fases distintas: a implantação do canavial, os tratos culturais e a colheita. Com relação à primeira fase, Beauclair e Scarpari (2006) citam que é aquela que mais envolve o

conhecimento das relações solo-planta-atmosfera e pode, ainda, ser dividida em preparo do solo e plantio. O sistema de preparo do solo mais utilizado é o convencional, que envolve operações de subsolagem e aração, combinadas com gradagens para a eliminação das soqueiras e incorporação de corretivos do solo. Após esse preparo é realizado o sulcamento e a adubação do solo para receber as mudas da cultura. O preparo convencional revolve as camadas superficiais do solo, incorpora corretivos e fertilizantes, aumenta a porosidade na camada revolvida e, com isso, eleva a permeabilidade ao ar.

O plantio da cana-de-açúcar é a segunda etapa referente à fase de implantação do canavial, que ocorre após o preparo do solo. No plantio há grande alocação de tempo e mão-de-obra, pois a cana-de-açúcar é uma planta propagada de forma vegetativa, ou seja, são colocados os colmos nos sulcos e as gemas presentes em cada nó vão originar uma nova planta. Após os colmos serem colocados nos sulcos estes são fragmentados de modo que permaneçam toletes de três gemas a uma densidade de 15 a 18 gemas por metro linear, para que haja uma boa densidade de perfilhos por unidade de área (CLEMENTS, 1940). Devido a essa forma de propagação, há dificuldades para mecanização do plantio da cultura, sendo a maioria dos plantios realizados de forma semi-mecanizada, com as etapas de distribuição e fragmentação dos colmos nos sulcos realizadas manualmente e a operação de cobertura dos sulcos mecanicamente. Porém, existe um avanço bem significativo do plantio mecanizado da cana-de-açúcar, necessitando grandes avanços para melhorar sua eficiência.

Posterior à fase de implantação, os tratos culturais envolvem a aplicação de defensivos, principalmente herbicidas e inseticidas, e as operações de escarificação e adubação. Devido ao tráfego intenso de colhedoras e veículos de transporte que são agentes compactadores há a necessidade de realizar escarificações após cada safra. Desse modo, um ciclo vicioso de compactação e descompactação se repete ao longo do tempo, sendo que ambas as operações, demandam equipamentos, combustíveis, mão de obra e investimentos.

A fase da colheita pode ser realizada de forma manual ou mecanizada. No Brasil, a colheita da cana-de-açúcar está em evolução do sistema tradicional de colheita manual de cana inteira com queima previa do canavial para a colheita mecanizada de cana picada sem queima do canavial (CGEE, 2009). Esta transição ocorre por diversos fatores, destacando-se as vantagens econômicas, ambientais,

de mão-de-obra e pelo protocolo agro-ambiental estabelecido por lei federal para redução e fim das queimadas nos canaviais em áreas mecanizáveis até 2014 e, não mecanizáveis, até 2017 (SEVERO; CARDOSO, 2009). A ausência da queima na colheita do tipo mecanizada promove o acúmulo do material orgânico podendo melhorar a qualidade física e química do solo (CANELLAS et al., 2003; SOUZA et al., 2005).

Na fase de colheita mecanizada ocorre tráfego intenso de máquinas, principalmente da colhedora e do transbordo, que podem ocasionar a compactação e, por consequência, a degradação da qualidade do solo. Por ser semi-perene há um acúmulo de pressões e aumento da compactação do solo durante as safras, que acabam por reduzir a produtividade e a vida útil do canavial diminuindo a rentabilidade. Conforme Blair et al. (1998), a colheita mecanizada pode provocar compactação devido à maior intensidade de tráfego com máquinas de maior massa por eixo, que altera negativamente a qualidade física do solo para o crescimento e desenvolvimento radicular da cultura. A operação de mecanização foi desenvolvida com a finalidade de eliminar a queima da cultura e manter os solos cobertos com restos culturais. Nesse sistema, busca-se a redução da erosão e o aumento do teor de matéria orgânica. Porém, o tráfego de máquinas gera maiores valores de densidade e redução da porosidade total do solo, o qual poderá restringir o desenvolvimento radicular da cultura (BLAIR et al., 1998; BLAIR, 2000; VASCONCELOS, 2002).

No RS encontram-se as áreas mais ao Sul do Brasil onde se cultiva cana-de-açúcar. Neste Estado predomina o clima subtropical úmido, sem estação seca definida, com verões quentes (Cfa) (KUINCHTNER; BURIOL, 2001). O crescimento inicial da cana-de-açúcar, para os ciclos de cana planta e soqueiras, ocorre no início da primavera, quando há aumento das temperaturas mínimas. A colheita costuma ser anual, com preferência para o período de abril a outubro. Diferente de outras regiões tradicionais produtoras como o Sudeste, a maturação ocorre devido à redução da temperatura e não devido à redução da precipitação como é o caso de São Paulo. Como o RS apresenta regularidades na precipitação ao longo do ano, o frio atua como agente maturador, sendo um aliado e não um vilão como muitos pensam. Esta redução da temperatura proporciona alto acúmulo de sacarose nos colmos, em detrimento do crescimento (VERISSIMO, 2011). Devido a essas características do RS, há algumas peculiaridades também quanto à colheita

mecanizada. Como há uma regularidade da precipitação ao longo do ano e o Estado encontra-se nas maiores latitudes do Brasil, esta operação ocorre no período outono-inverno onde há a precipitação associada a uma baixa evapotranspiração potencial devido as condições de menores temperaturas, diferente do que ocorre na região Sudeste do Brasil, em que a safra canavieira estende-se de Abril a Outubro (HORII, 2004), período que se caracteriza como sendo de baixa intensidade pluvial. Esta peculiaridade no Estado pode favorecer o processo de compactação, pois a operação de colheita vai coincidir com o período em que o solo se encontra com maior umidade, aumentando a suscetibilidade à compactação. Conforme Pankhurst et al. (2003), a compactação dos solos em agrossistemas canavieiros tem sido atribuída principalmente à colheita mecanizada em elevados conteúdos de água no solo.

3.3 Espaçamento entre linhas de cultivo da cana-de-açúcar

De acordo com Câmara (1993), proporcionar as condições necessárias ao desenvolvimento inicial da cana-de-açúcar, bem como o crescimento radicular e a brotação, contribui positivamente na produtividade e na longevidade do canavial. Estudos com diferentes espaçamentos entre linhas têm sido realizados. No Brasil, a colheita mecanizada da cana-de-açúcar é realizada em linhas simples (1,4 a 1,5m entre linhas), com a colhedora acompanhada do veículo de transbordo na linha adjacente. Com a transição da colheita manual para a colheita mecanizada gerou uma incompatibilidade da bitola da colhedora, do trator e do transbordo com o atual espaçamento entre linhas. O processo atual de produção de cana-de-açúcar está baseado em unidades onde se realizam o plantio e o cultivo em uma ou duas linhas, com tratores que têm no máximo 2,0 m de bitola (ROQUE et al., 2010). Esta incompatibilidade da bitola dos equipamentos com o espaçamento entre linhas ocasiona o tráfego muito próximo às linhas de cultivo e até sobre as linhas, gerando danos as soqueiras e perda de rendimento (BRAUNACK; PEATEY, 1999). Algumas investigações apontam que a utilização de espaçamentos duplos ou combinados proporciona adequadas condições para o desenvolvimento da cultura. Segundo Magro (2002), os danos nas soqueiras ocorrem de forma generalizada sendo difícil de ser evitado. Para Moraes Neto (2002), os objetivos do espaçamento duplo ou espaçamento combinado são: adaptar as bitolas da colhedora e da carreta de transbordo, diminuir os danos as soqueira, preservar a longevidade do canavial, e

melhorar o desempenho da colheita mecânica. Cervigni (2005) estudou o comportamento de uma variedade de cana-de-açúcar e concluiu que nos espaçamentos duplos mais largos a área foliar e o número de perfilhos/colmos foram maiores que no espaçamento convencional.

Na Austrália muitas indústrias utilizam um sistema de tráfego controlado pelo qual as zonas de crescimento da cultura e zonas de tráfego são separadas fisicamente devido à configuração do espaçamento entre linhas (LAMERS et al., 1986; GERIK et al, 1987; MULLINS et al, 1977.; WILLIFORD, 1985; WESLEY; SMITH, 1991). Normalmente, o sistema envolve a combinação de espaçamento da linha da cultura com a largura da faixa do equipamento, o que garante que todo o tráfego ocorra sempre na mesma posição. Braunak e McGarry (2006) obtiveram menores valores de densidade e resistência mecânica à penetração na configuração do espaçamento em linhas duplas (0,3 X 1,8m) comparado as simples (1,5m).

Neste sentido, as configurações de espaçamentos entre linhas do tipo duplo (0,4 x 1,7m) ou triplo (0,3 x 0,3 x 1,5m) podem favorecer o crescimento radicular, visto que esses espaçamentos possibilitam que haja uma zona de crescimento radicular e uma zona de tráfego de máquinas. Com esta distinção, as zonas de crescimento radicular podem ter melhores condições físicas favorecendo principalmente o crescimento radicular em ciclos de cana soca. Naseri et al. (2007) exemplificaram na Fig. 2, as duas zonas criadas quando se utiliza o espaçamento duplo, com a mesma lógica para o espaçamento triplo.

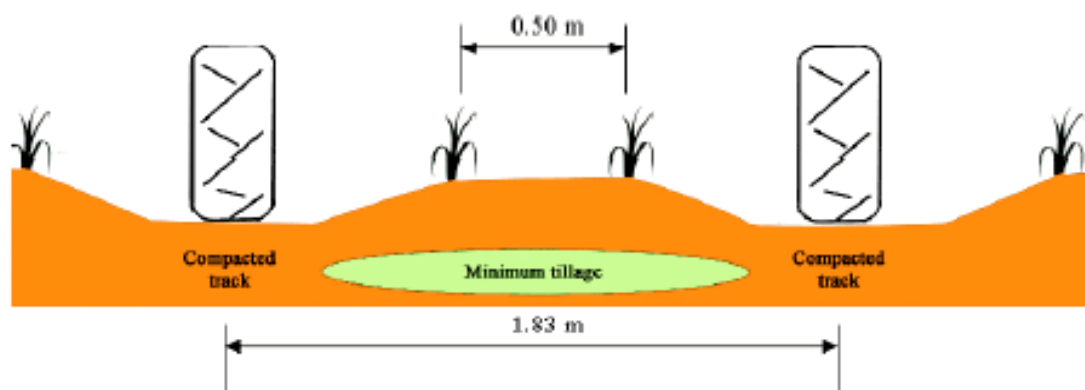


Figura 2 – Espaçamento duplo entre linhas em cultivo mínimo de cana-de-açúcar, exemplificado por Naseri et al. (2007).

Esses espaçamentos entre linhas podem ainda ser justificados, levando em consideração, a distribuição das raízes de cana-de-açúcar. Faroni (2004) estudando

a distribuição do sistema radicular de cana-de-açúcar verificou que a maioria das raízes encontram-se nos 20 centímetros superficiais do solo e próximas a linha de cultivo. Portanto, se o rodado das máquinas for bem posicionado nas entre linhas, como é o que ocorre nos espaçamentos duplos e triplos, há um favorecimento do crescimento radicular, pois a compactação ocorre mais afastada da linha de cultivo. Além disso, com a utilização das configurações de espaçamentos duplos ou triplos, pode-se minimizar as operações de escarificação que ocorrem após cada safra, pois um ciclo vicioso de compactação e descompactação se repete ao longo do tempo, sendo que ambas as operações, tanto de compactação quanto de descompactação, demandam equipamentos, combustíveis, mão de obra e investimentos para serem realizadas.

Com isso, a configuração de um adequado espaçamento entre linhas pode ser uma estratégia para reduzir os efeitos da compactação em solos sob cana-de-açúcar, garantindo a sustentabilidade do canavial.

3.4 Atributos físicos em solos cultivados com cana-de-açúcar

Em ciclo de cana planta as alterações nos atributos físicos do solo são provenientes do processo de implantação do canavial, devido às operações de gradagens, sulcamento e cobertura do sulco. No entanto, as principais alterações dos atributos físicos em solos cultivados com cana-de-açúcar são relatadas em ciclos de cana soca, onde o solo é submetido a sucessivas pressões durante os ciclos de cultivo devido ao tráfego de máquinas e implementos ocorrido principalmente na colheita.

Nos ciclos de cana soca, o tráfego de máquinas agrícolas tem sido verificado como a principal causa de degradação da qualidade física (ROQUE et al., 2010). A etapa mais crítica durante o ciclo de cultivo é a colheita, onde há o tráfego de máquinas sobre o solo pelo menos duas vezes pela colhedora e duas vezes pelo transbordo. Conforme Souza et al. (2006a), o conjunto de procedimentos envolvidos neste processo pode influenciar a produção e a longevidade da cultura. Como a cana-de-açúcar é uma cultura em que a renovação da lavoura ocorre no mínimo a partir do quinto ano de cultivo, há um acúmulo de pressões aplicadas ao solo ao longo do tempo, ocasionando redução da produtividade, aumento de custos e menor vida útil do canavial. Severiano et al. (2009) constataram que um Latossolo cultivado

com cana-de-açúcar mostrou-se suscetível à compactação, necessitando de adequação no tráfego de máquinas. Braunack et al. (2006) avaliando o tráfego de máquinas na cultura da cana-de-açúcar na Austrália verificou que o efeito deste evento sobre os atributos físicos do solo é acumulativo. Filho et al. (2010) estudando atributos físicos em um Latossolo sob diferentes usos, verificaram maior degradação da qualidade física em áreas cultivadas com cana-de-açúcar. .

Conforme Stone et al. (2002), dentre os efeitos da compactação, destacam-se o aumento da densidade e da resistência à penetração e a redução da porosidade e da permeabilidade do solo. Baquero et al. (2012) concluíram também que as práticas de manejo promovem alterações na resistência à penetração, densidade e porosidade do solo, em comparação com a mata nativa, sendo que essas foram impeditivas ao desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar. Souza et al. (2010) encontraram valores elevados para a densidade e resistência à penetração e baixos para a macroporosidade em um Latossolo cultivado com cana-de-açúcar, sendo devido ao excessivo tráfego de máquinas pesadas.

Uma das formas de estimar a qualidade de um solo é por meio de sua estrutura avaliada comumente a partir da densidade, porosidade e resistência do solo à penetração (PACHECO, 2010). Jorge et al. (1991) relatam que, tanto a densidade como a porosidade são parâmetros que controlam as relações ar-água, importantes para o funcionamento dos processos físicos, químicos e biológicos do solo.

A densidade do solo (D_s) pode ser descrita como a massa de solo em um determinado volume, expressada em unidade de massa por unidade de volume. É de grande importância pois permite inferir sobre outros atributos físicos podendo ser utilizada como indicador da compactação (CAMARGO; ALLEONI, 1997). Camargo (1983) e Dias Junior (2000) relatam que a D_s tem sido amplamente utilizada na avaliação da compactação e, ou, adensamento dos solos.

A porosidade total, bem como a macroporosidade e a microporosidade também podem inferir sobre a qualidade do solo. Este primeiro é definido como o volume de poros totais do solo ocupado pelo ar e ou pela água. Já os dois últimos são definidos quanto ao seu tamanho. Os poros com diâmetro maior que 0,05 mm são ditos como macroporos, constituindo a macroporosidade e os poros com diâmetro menor que 0,05 mm correspondem aos microporos (RICHARDS, 1965). Os poros são obtidos pelo arranjo das partículas sólidas, e influenciam na aeração, na

condução, na retenção de água, na resistência à penetração e na ramificação das raízes no solo e, conseqüentemente, no aproveitamento de água e nutrientes disponíveis (HILLEL, 2003). A microporosidade está relacionada com os poros dentro dos agregados, ou seja, a porosidade intra-agregados que são os principais responsáveis pela retenção de água, já que as forças que atuam são principalmente as capilares, diferentemente dos macroporos que são poros entre agregados, sendo os responsáveis pela drenagem da água no solo. A macroporosidade é considerada um excelente indicador de degradação do solo, devido à sua relação com a compactação (STOLF et al., 2011). Conforme Hillel (1982) a compactação ocasiona reduções significativas, principalmente no volume de macroporos, enquanto os microporos permanecem praticamente inalterados. Silva e Kay (1997) salientam que a microporosidade do solo é fortemente influenciada pela textura (granulometria) e teor de carbono orgânico. Carvalho et al. (1991) afirmam que a macroporosidade é o atributo físico mais afetado pelo cultivo contínuo de cana-de-açúcar. O efeito do tráfego de máquinas e equipamentos sobre a porosidade de aeração foi demonstrado por Tormena et al. (1998) em experimento conduzido em um Latossolo, em que o tráfego levou à compactação e a conseqüente redução da porosidade de aeração para valores abaixo do limite crítico de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

A resistência à penetração relaciona a qualidade estrutural do solo com o sistema radicular das plantas, podendo ser um indicador direto de condições favoráveis ou desfavoráveis para as plantas. Tormena e Roloff (1996) relatam que a resistência mecânica à penetração é um dos atributos físicos que influencia no crescimento de raízes e serve como base à avaliação dos efeitos dos sistemas de manejo sobre o ambiente radicular. Para Richart et al. (2005), a resistência do solo à penetração é um dos fatores limitantes ao desenvolvimento e estabelecimento das culturas, pois ela expressa o grau de compactação. Este atributo tem sido freqüentemente utilizado como indicador da compactação em sistemas de manejo, por ser um atributo diretamente relacionado ao crescimento das plantas e de fácil e rápida determinação (STOLF et al., 1983; TORMENA; ROLOFF, 1996; MERCANTE et al., 2003). O valor de 2,0 MPa tem sido freqüentemente utilizado como impeditivo ao desenvolvimento do sistema radicular da maioria das culturas (TAYLOR et al., 1966; TORMENA et al., 1999).

Outro importante atributo que infere na qualidade do solo é a matéria orgânica (MO), a qual faz parte da fase sólida do solo, sendo sua quantidade variável entre os

tipos de solo e até mesmo dentro do mesmo solo, dependendo do manejo que é utilizado. O que constitui a matéria orgânica no solo são os restos de plantas parcialmente decompostos e o húmus (substâncias húmicas e não-húmicas). A dinâmica da matéria orgânica no solo é complexa, mas o que dita sua quantidade no solo é basicamente a relação entre as adições de Carbono por resíduos animais ou vegetais e as perdas de Carbono por mineralização da MOS (Bayer & Mielniczuk, 1997). Conforme Stevenson (1994) a matéria orgânica tem várias propriedades que influenciam nos atributos físicos, químicos e biológicos do solo, como: a cor escura; retenção de água; interação com os minerais (formação da estrutura do solo); formação de complexos (indisponibilidade de metais tóxicos); baixa solubilidade em água (pouca perda por lixiviação); poder tampão; capacidade de troca de cátions; e mineralização (liberação de nutrientes).

3.5 Variabilidade espacial dos atributos do solo e de planta

3.5.1 Importância

Classicamente, os estudos agronômicos, principalmente da área de solos, são realizados levando em consideração o solo como homogêneo e distribuindo as parcelas ao acaso para eliminar o efeito de algum fator que não é possível controlar. No entanto, o solo e a distribuição das características das plantas são fundamentalmente heterogêneos (REICHARDT; TIMM, 2012). Desta forma, o pesquisador fica refém do componente residual da análise de variância, para inferir sobre o estudo realizado. Se o resíduo é alto, o experimento fica comprometido. Atributos físicos, químicos e biológicos do solo e também os de plantas apresentam dificuldade de controle em experimentos à campo, pois apresentam variação no espaço. Esta variabilidade do solo pode ser devido à variação dos fatores de formação, como material de origem, relevo, clima, tempo e organismos, ou devido à variação do manejo, sendo neste caso de origem antropogênica (MCGRAW, 1994). Já a variabilidade dos caracteres da planta pode estar associada principalmente aos atributos do solo, as operações de cultivo e ao ataque de pragas e doenças (REICHARDT; TIMM, 2012). Assim, a crença de independência amostral em experimentos agronômicos pode ficar comprometida devido à possibilidade das variáveis não estarem distribuídas ao acaso. A neutralização da dependência espacial foi um dos primeiros argumentos em favor da randomização experimental

de ensaios de campo (YATES, 1938). Fisher (1942) reconheceu a dependência espacial quando defendeu a casualização em blocos e a replicação em experimentos. Se a distribuição espacial das medidas for observada e levada em consideração, é possível tirar proveito da variabilidade espacial para entender melhor as relações entre as variáveis do sistema solo-planta-atmosfera (REICHARDT; TIMM, 2012).

Estudos sobre a variabilidade espacial de atributos físicos em solos cultivados com cana-de-açúcar têm sido realizados com frequência, principalmente para os atributos: resistência à penetração, densidade, porosidade e umidade do solo. Para Cambardella et al. (1994), o conhecimento da distribuição espacial dos atributos do solo em determinada área é importante para o refinamento das práticas de manejo e avaliação dos efeitos da agricultura sobre a qualidade ambiental. Estudos têm mostrado que a variabilidade espacial da densidade, da porosidade, da resistência à penetração e do teor de matéria orgânica não ocorrem ao acaso, mas apresentam correlação ou dependência espacial (CAMBARDELLA et al., 1994; VIEIRA, 2000; SILVA et al., 2004; SOUZA et al., 2006). Em avaliações na cana, Grego et. al. (2010) encontraram para os caracteres número de perfilhos, diâmetro de colmo, altura do colmo, densidade de raiz e produtividade estimada da cana-de-açúcar valores de grau de dependência espacial de baixo a moderado, segundo ZIMBACK (2001).

Uma das maneiras mais eficazes de investigar a variabilidade espacial do solo é o uso da análise geoestatística (WARRICK; NIELSEN, 1980; GOOVAERTS, 1997; VIEIRA, 2000; VIEIRA et al, 2002; COUTO et al, 2007). Essa técnica não recente, mas nova no contexto da agronomia, é fundamentada na teoria das variáveis regionalizadas.

3.5.2 Teoria das variáveis regionalizadas

Krige (1951), trabalhando com dados de concentração de ouro, concluiu que somente a informação dada pela variância seria insuficiente para explicar o fenômeno em estudo. Para tal, seria necessário levar em consideração a distância entre as observações. A partir daí surge o conceito da geoestatística, que leva em consideração a localização geográfica e a dependência espacial. Matheron (1963, 1971), baseado nas observações de Krige, desenvolveu a teoria das variáveis regionalizadas.

Uma variável regionalizada é uma função numérica com distribuição espacial, que varia de um ponto a outro com continuidade aparente, mas cujas variações não podem ser representadas por uma função matemática simples. Do ponto de vista matemático, o valor de uma propriedade, (por exemplo, propriedade do solo) em qualquer lugar da superfície terrestre depende da sua posição. A ideia central da geoestatística é de que medidas mais próximas tendem a ser mais similares do que valores observados em locais distantes. Assim, há alguma expressão matemática que descreve esta variação de um ponto para outro e quantifica esta correlação espacial fornecendo métodos e incorporando-a na estimação e na inferência (GOTWAY; HARTFORD, 1996). As ferramentas estatísticas que provam a independência (ou dependência) entre as amostras são o correlograma e o semivariograma. Essas medidas que avaliam a dependência tem como princípio a verificação da similaridade ou da dissimilaridade das observações. Como em séries temporais e espaciais é utilizado o autocorrelograma para verificar a estrutura de dependência espacial da série de variáveis, será dada ênfase para esta ferramenta.

3.5.3 Séries temporais e espaciais

Existe uma grande classe de fenômenos físicos, químicos e biológicos que quando observados e numericamente quantificados, resultam em uma sequência de dados distribuídos ao longo do tempo e/ou espaço (TIMM, 2002). Temos como exemplos, valores de variáveis físicas, químicas e biológicas do solo coletadas ao mesmo tempo ao longo de uma transeção em espaços equidistantes, ou essas mesmas variáveis coletadas em tempos equidistantes em cada ponto da transeção, formando assim series espaciais no primeiro caso e series temporais no segundo caso. As ferramentas estatísticas foram desenvolvidas inicialmente para analisar uma sequência de dados coletados ao longo do tempo (t), mas sendo válidas para uma série de dados coletados ao longo do espaço (x), somente substituindo t por x (TIMM, 2002). Na ciência dos solos este conceito é aplicado principalmente para séries espaciais, o que corresponde a um conjunto de observações discretas, obtido em intervalos espaciais iguais (ou não), ao longo de transeções ou em grades, e que apresentam dependência espacial (DOURADO-NETO et al.,1999).

3.5.4 Função de autocorrelação

A dependência espacial de um conjunto de observações pode ser avaliada por meio de algumas medidas estatísticas que tem como princípio a verificação da similaridade ou da dissimilaridade das observações. Uma delas é a função de autocorrelação, que tem como princípio a verificação da similaridade entre as observações.

No caso de duas variáveis aleatórias x e y , com alguma relação de dependência, a covariância (C) passa a ter grande importância, sendo definida por:

$$C = \frac{1}{(n-1)} \left[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \right] \quad (1)$$

Na equação 1 as duas variáveis x e y tornam-se uma função de autocorrelação se nessa equação o y for trocado pelo próprio x em outra posição dentro da transeção e esta covariância for relacionada com a variância do conjunto de dados. Como se trata de uma correlação entre uma variável e ela mesma em outra posição, o processo é denominado autocorrelação.

Assim, para as variáveis x_i (na posição i) e x_{i+j} [na posição $(i+j)$, distante de i por j onde h é a distância entre pontos de observações da variável e j é número o de “lag’s”, ou seja o número de defasagem entre os vizinhos sendo igual a: 0, 1, 2, 3, ...] a equação da função de autocorrelação ($r(j)$) é dada por:

$$r(j) = \frac{C(j)}{s^2} \quad (2)$$

Onde: $r(j)$ é o coeficiente da função de autocorrelação; s^2 é a variância dos dados e $C(j)$ é a covariância entre a variável na posição i com ela mesma na posição $i+j$ que é dada por:

$$C(j) = \frac{1}{(n-1)} \left[\sum_{i=1}^{n-j} (x_i - \bar{x})(x_{i+j} - \bar{x}) \right] \quad (3)$$

Onde: x_i e x_{i+j} é a variável na posição i e na posição $i+j$; $\bar{x}$ é a média do conjunto de dados da variável x ; n é o número de observações.

A autocorrelação é, portanto, uma correlação entre vizinhos padronizada pela variância dos dados. A correlação entre primeiros vizinhos é: $j = 1$ (x_1 com x_2 , x_2 com x_3 , x_4 com x_5 ,... x_i com x_{i+1}); entre segundos vizinhos é: $j = 2$ (x_1 com x_3 , x_2 com x_4 ,... x_i com x_{i+2}) e assim por diante. Na verdade, as coordenadas de amostragem de x não entram na análise, mas sua posição na transeção e sua ordenação são importantes. Pode-se verificar que quando há uma defasagem de $j = 1$ perde-se um par na correlação, para $j = 2$ perde-se 2 pares e, assim, com o aumento de j o número de pares indicado na somatória da equação 3 diminui e equivale ao índice superior da somatória: $n - j$. Por isso, para o uso da autocorrelação e outras ferramentas da estatística regionalizada, é preciso de um número n de observações muito grande. Na equação 2 aparece apenas o quociente s^2 por que $s_x = s$ e $s_y = s$, cujo produto é s^2 .

Com a utilização da equação 2 para valores de $j = 0, 1, 2, \dots, k$ obtêm $r(0)$, $r(1)$, $r(2)$, ..., $r(k)$. O valor de $r(0)$ é 1, pois correlaciona-se x_i com x_i . Se houver correlação entre vizinhos, teremos valores de $r(1)$, $r(2)$, proporcionais à estas correlações, mas sempre menores que 1. Para vizinhos muito distantes, espera-se que a correlação diminua tendendo para zero. O gráfico de $r(j)$ em função de j é denominado autocorrelograma. Ele mede, portanto, a variação da autocorrelação em função da distância que separa os dados. Se $r(j)$ cai rapidamente para zero, a variável x não é autocorrelacionada e seus valores x_i podem ser considerados independentes, o que, aliás, é exigido pela estatística clássica e em variáveis de solo pode não ser observado. Se $r(j = 5)$ ainda for significativo (o que pode ser feito através de testes de probabilidade), isto significa que até o quinto vizinho (distante de $5h$) ainda existe autocorrelação.

Para verificar dependência espacial, o próximo passo é o cálculo dos intervalos de confiança de $r(j)$ para verificar se ele é significativo ou não, e, desta forma, definir o comprimento j_h no qual existe a dependência espacial entre as observações adjacentes da variável em estudo.

Para determinar os limites dos intervalos de confiança (IC) de autocorrelação é aplicada a função de probabilidade acumulada p ($p = \pm 1,96$ para 95% confiança) para a função de distribuição normalizada com o número de observações n (equação 4) (DAVIS, 1986):

Desta forma:

$$IC = \pm \frac{p}{\sqrt{n}} \quad (4)$$

Na prática, os autocorrelogramas podem assumir formas variadas, dependendo da variabilidade espacial da variável. Para altos valores de j , $r(j)$ pode até assumir valores negativos e, com o aumento de j , voltar a ser positivo. Reichardt e Timm (2012) salientam que o autocorrelograma expressa a variação da autocorrelação em função da distância que separa os dados, definindo, desta forma, até que distância existe a dependência espacial entre as observações adjacentes de uma dada variável.

3.5.5 Função de crosscorrelação

Com a noção de autocorrelação, a compreensão da função de crosscorrelação, que utiliza duas variáveis em posições diferentes, torna-se mais fácil. A função de crosscorrelação que da origem ao crosscorrelograma, é a correlação de x_i com y_{i+j} , ou seja, a correlação da variável x na posição i com a variável y na posição $i+j$, dada pela equação:

$$r_c(j) = \frac{C(x_i, y_{i+j})}{(\sqrt{s_x^2 \cdot s_y^2})^{1/2}} \quad (5)$$

Onde: $C(x_i, y_{i+j})$ é a covariância entre a variável x na posição i com a sua vizinha y na posição $i+j$. s_x^2 é a variância do conjunto de dados da variável x e s_y^2 é a variância do conjunto de dados da variável y .

Nota-se que quando as correlações são realizadas entre x_i e x_{i+j} elas são idênticas às de x_{i+j} e x_i , por isso, o autocorrelograma é apresentado apenas para j positivo. No caso do crosscorrelograma, a correlação entre x_i e y_{i+j} é diferente de y_{i+j} e x_i , o que irá conferir defasagens em direções positivas e negativa.

3.5.6 Abordagem em espaço de estados

Estudos que utilizam ferramentas estatísticas provenientes da análise de séries temporais e espaciais para caracterizar a variabilidade dos atributos do solo, têm sido pouco explorados no Brasil. Dentre estas ferramentas, a avaliação das relações solo-planta-atmosfera por meio da abordagem de espaço de estados tem

sido realizadas, levando em consideração a variabilidade espacial das variáveis (WENDROTH et al. 2003; REICHARDT; TIMM, 2012).

Na abordagem em espaço de estados, o estado de uma variável, ou de um conjunto de variáveis em um ponto, é relacionado ao estado de outra variável em um ponto vizinho (TIMM, 2002). Este modelo autorregressivo se baseia em uma série (nesse caso, um conjunto de observações obtidas em espaços equidistantes) para fornecer os coeficientes que unem essas variáveis, sendo esses os coeficientes de estados.

A formulação de um modelo em espaço de estados é uma forma de representar um sistema linear (ou não) a partir de um sistema de duas equações dinâmicas: a equação das observações (Equação 6) e a equação de estados ou do sistema (equação 7) (REICHARDT; TIMM, 2012).

$$Y_j(x_i) = M_{jj} Z_j(x_i) + v_{Y_j}(x_i) \quad (6)$$

Sendo: $Y_j(x_i)$ o vetor de observação do processo na localização x_i ; $M_{jj}(x_i)$ é a matriz de observação na posição x_i ; $Z_j(x_i)$ é um vetor de estado não observável do processo na posição x_i ; $v_{Y_j}(x_i)$ é o vetor erros de observações na posição x_i .

$$Z_j(x_i) = \phi_{jj} Z_j(x_{i-1}) + u_{Z_j}(x_i) \quad (7)$$

Sendo $Z_j(x_i)$ um vetor de estado na posição x_i ; ϕ_{jj} é a matriz dos coeficientes de estados ou de transição na posição x_i ; $Z_j(x_{i-1})$ é o vetor não observável do processo na posição x_{i-1} ; $u_{Z_j}(x_i)$ é um vetor erro associado ao estado na posição x_i .

Warrick et al. (1986) e Ahuja e Nielsen (1990) estudaram a relação entre a umidade, temperatura, salinidade e infiltração do solo como variáveis preditoras com a produção da cultura, utilizando esses parâmetros como variáveis preditas; Morkoc et al. (1985) e Shumway et al. (1989) descreveram a associação espacial do conteúdo de água com a temperatura do solo; Nielsen e Alemi (1989) mostraram a coincidência entre a produção de algodão e a infestação de nematóides; Dourado Neto et al. (1999) estudaram a variabilidade espacial da umidade e da temperatura do solo usando um modelo autorregressivo. Cassel et al. (2000) estudaram a relação entre a produção de trigo, saturação de bases e armazenamento de água no solo;

Timm et al. (2004) estudaram a relação entre a umidade do solo, matéria orgânica, conteúdo de argila e estabilidade de agregados; Wendroth et al. (2006) estudaram a relação entre as propriedades hídricas do solo com a condutividade elétrica da solução e a sua textura; Oliveira et al. (2011) modelaram a relação entre a produtividade da soja e a resistência a penetração em um Latossolo utilizando um modelo autorregressivo de espaço de estados, identificando e quantificando as relações locais estocasticamente. Oliveira et al. (2013), estudaram a relação entre os atributos do solo (fósforo, potencial hidrogeniônico e densidade) com a produtividade da soja, obtendo com o modelo de espaço de estados uma maior eficiência nas estimativas dos valores de produtividade da soja em comparação com o modelo de regressão simples. Portanto, a abordagem em espaço de estados constitui-se uma interessante ferramenta para a avaliação da relação das variáveis que compõem o sistema solo-água-atmosfera.

4. Material e Métodos

4.1 Localização e caracterização da área experimental

O estudo foi realizado no município de Porto Xavier no RS, em uma área pertencente à Cooperativa de Produtores de Cana Porto Xavier, Ltda (Coopercana), com coordenadas geográficas de 27° 56' Sul e 55° 14' Oeste e com uma elevação de 131 m, em relação ao nível do mar (Fig. 3). A cooperativa é formada por agricultores quase que exclusivamente familiares, compreendendo em torno de 300 produtores em uma área de aproximadamente 2.100 hectares. Apresenta uma usina de produção de etanol, com capacidade nominal para processar 130 mil Mg ano⁻¹ de cana-de-açúcar e produzir 9 milhões L ano⁻¹ de etanol, absorvendo assim, toda a produção dos associados.

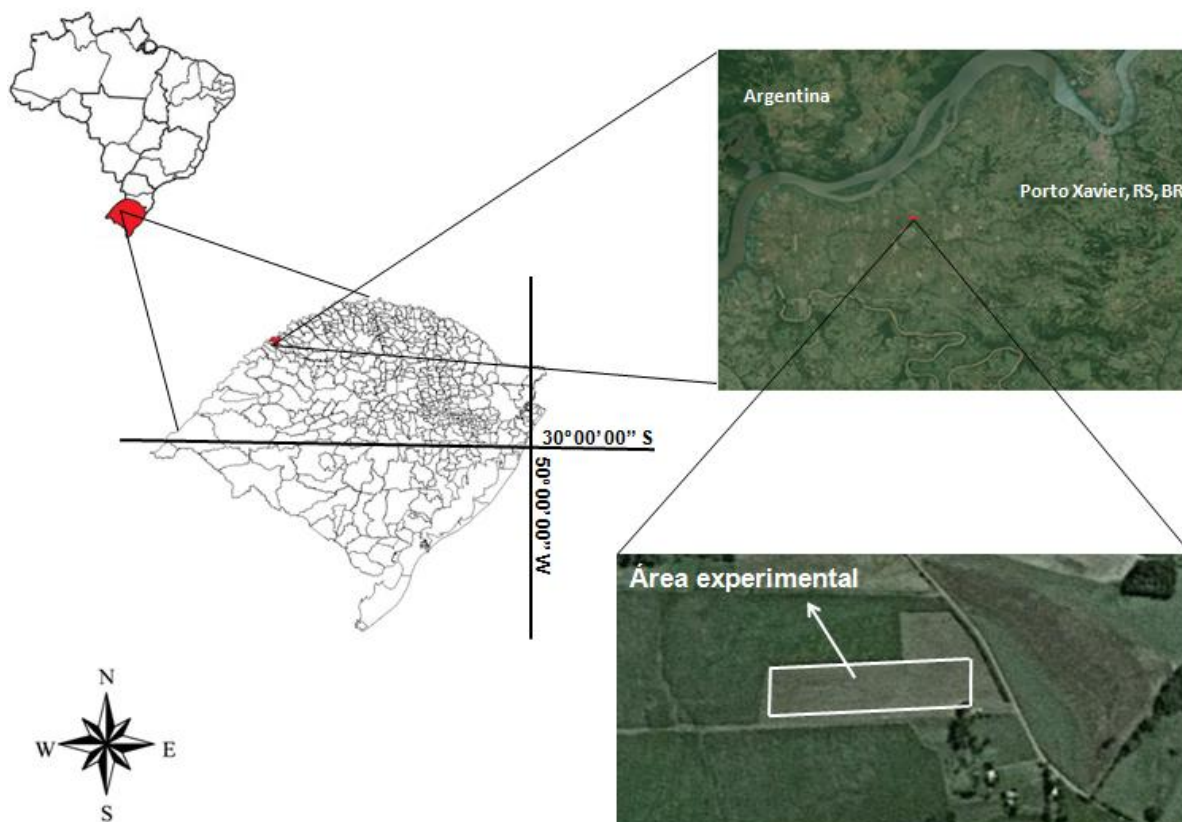


Figura 3 – Localização da área experimental pertencente a Coopercana, em Porto Xavier, RS.

A área experimental e as áreas de cultivo encontram-se no zoneamento agroecológico da cana-de-açúcar para o RS, classificadas com aptidão agrícola média (EMBRAPA, 2009). O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Cfa, subtropical úmido, sem estação seca definida e com verões quentes (KUNINCHNER; BURROL, 2001). Neste tipo de clima, a temperatura é moderada com chuvas bem distribuídas. Os meses do verão costumam ser quentes com temperaturas elevadas, sendo no mês mais quente com as máximas superiores a 30°C. Já nos meses de inverno há ocorrência de geadas, sendo a média de temperatura neste período inferior a 16°C. Nas Fig. 4 e 5 são apresentadas as normais de precipitação e temperatura em médias mensais para a região de Porto Xavier (CEMETRS, 2013). O período considerado nos cálculos das normais climatológicas foi de 1976-2005, perfazendo 30 anos de registros de dados diários.

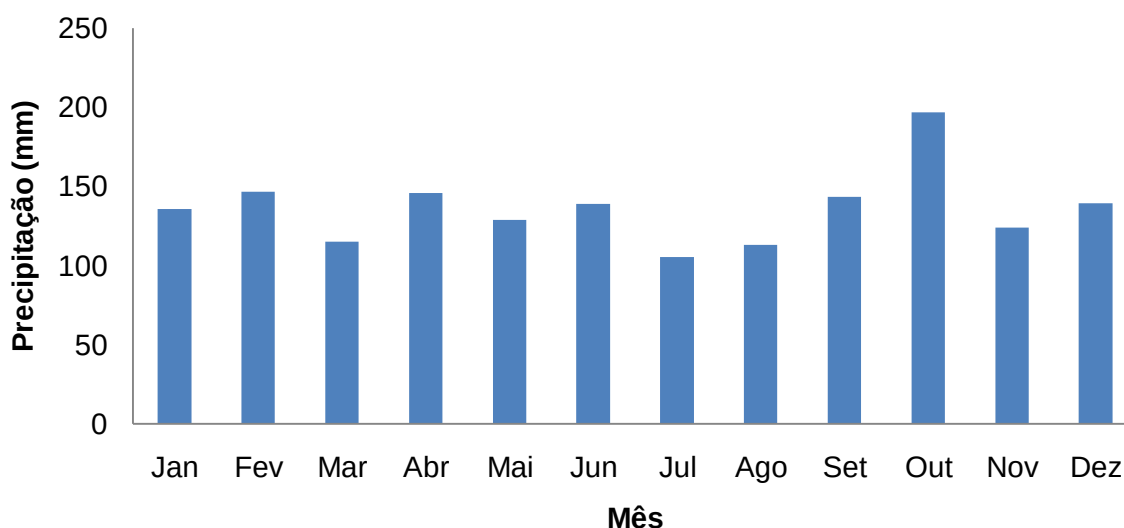


Figura 4 – Precipitação média mensal na região de Porto Xavier, RS.

As médias mensais da normal de precipitação da região de Porto Xavier, RS apresentam regularidade ao longo do ano, mantendo uma distribuição quase que homogênea, característica não somente desta região, mas de todo o RS. Se for realizada uma comparação da normal de precipitação do RS com regiões tradicionais produtoras de cana-de-açúcar, como o Sudeste, irá perceber-se-á uma diferença na distribuição da precipitação ao longo do ano. No Sudeste, ocorrem dois períodos bem distintos ao longo do ano: estação das águas e estação das secas. Durante o inverno há a redução da precipitação e o posterior aumento na primavera, distinguindo a época de chuva e a época de seca. Alexander (1973) afirma que a cana-de-açúcar retarda seu ritmo de crescimento e intensifica o acúmulo de açúcar

em condições específicas de combinação de temperatura do ar e umidade do solo. A estação seca e as baixas temperaturas retardam o crescimento da cana-de-açúcar e forçam a conversão parcial dos açúcares redutores em sacarose (CLEMENTS, 1962). Assim, a condição de redução da precipitação no sudeste favorece a maturação da cana-de-açúcar, que acumula açúcares. Como no RS não há essa redução de precipitação na fase de maturação da cana-de-açúcar, o que estimula o acúmulo de açúcares é a redução da temperatura.

Na Fig. 5 é apresentada a distribuição ao longo do ano das normais de temperaturas mínima, máxima e média. No período invernos (Maio, Junho, Julho e Agosto) o frio é um excelente aliado na maturação da cana, no entanto, há formações de geada que podem ou não causar danos a cultura, dependendo da intensidade.

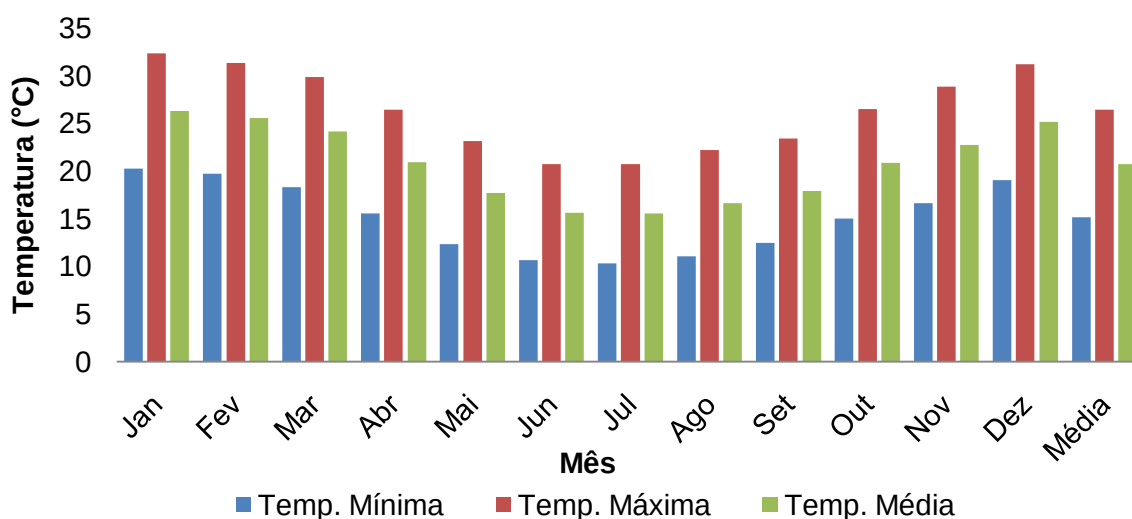


Figura 5 - Normal de temperatura mínima, máxima e média na região de Porto Xavier, RS.

O solo da área experimental é classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo conforme Classificação Brasileira de Solos (EMBRAPA, 2013), o qual é predominante da maioria das áreas cultivadas com cana-de-açúcar nesta cooperativa.

4.2 Implantação do experimento

O experimento foi implantado em 28 de agosto de 2012, em uma área de 200 m de comprimento por 20 m de largura. A área em estudo estava sob o cultivo de cana-de-açúcar até o final de 2011, sendo que em Novembro desse mesmo ano

foram feitas várias gradagens pesadas para a realização do plantio de sorgo sacarino que permaneceu somente por uma safra (2011/12).

Para implantação do experimento, foi realizada uma aplicação de herbicida na resteva da cultura antecessora (sorgo sacarino) e efetuada uma subsolagem. Posteriormente foi realizada a abertura de sulcos (30 cm), com um sulcador de disco, formando o sulco (Fig. 6a) e realizada a distribuição das mudas de cana-de-açúcar nos sulcos. Os colmos foram fragmentados em toletes de três gemas, para obtenção de uma brotação uniforme, pois a dominância apical é bem expressiva nesta planta, mantendo uma densidade de 15 a 20 gemas por metro linear (Fig. 6c). Realizou-se a adubação na linha com base na análise de solo, aplicando 400 Kg ha^{-1} de NPK (Nitrogênio-Fósforo-Potássio) na formulação 02-30-10 e efetuada a cobertura das mudas nos sulcos com o auxílio de um adubador-cobridor (Fig. 6b e d).

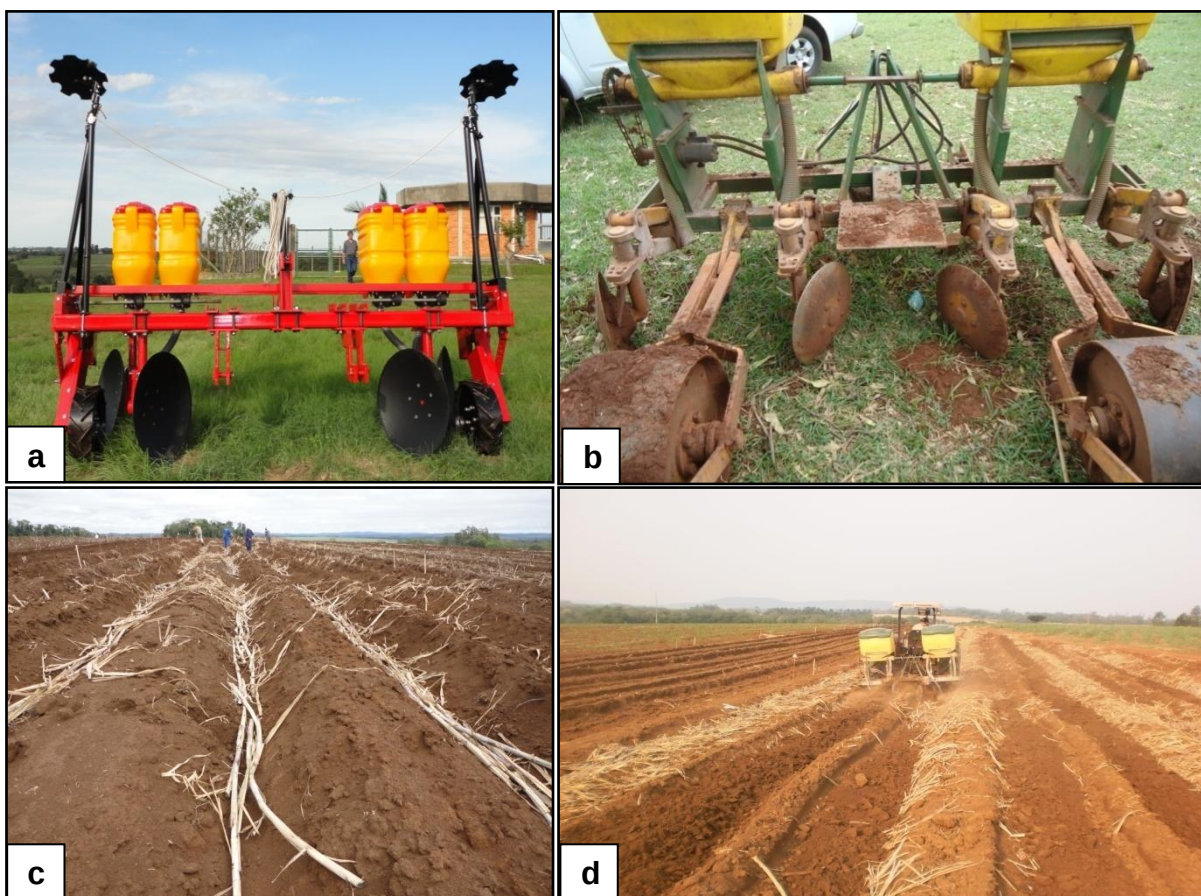


Figura 6 – Etapas da implantação do experimento: abertura dos sulcos utilizando um sulcador de disco (a); adubador-cobridor utilizado na cobertura das mudas e distribuição do adubo(b); distribuição das mudas no sulco (c) e cobertura das mudas (d).

Com relação aos tratos culturais, foi realizada uma adubação de cobertura de 100 Kg ha^{-1} do adubo NPK com formulação de 45-00-00 (uréia) e aplicações de herbicidas. Foram utilizados os herbicidas diuron na dose de 4 L ha^{-1} e o herbicida glifosato na dose de 6 L ha^{-1} , sendo este último aplicado em jato dirigido.

Quanto ao arranjo experimental, a área ($20 \times 200 \text{ m}$) foi dividida em três partes, as quais receberam três tipos de espaçamentos entre linhas da cultura (tratamentos). Cada terço ficou com aproximadamente 20 m de largura por 60 de comprimento. Os espaçamentos definidos no experimento foram: Espaçamento simples com 1,5 metros entre linhas de cultivo (LS); Espaçamento combinado duplo com 0,4 m nas linhas duplas e 1,7 m entre linhas duplas (LD); e espaçamento combinado triplo com 0,3 m nas linhas triplas e 1,50 m entre linhas triplas (LT) (Fig. 7).

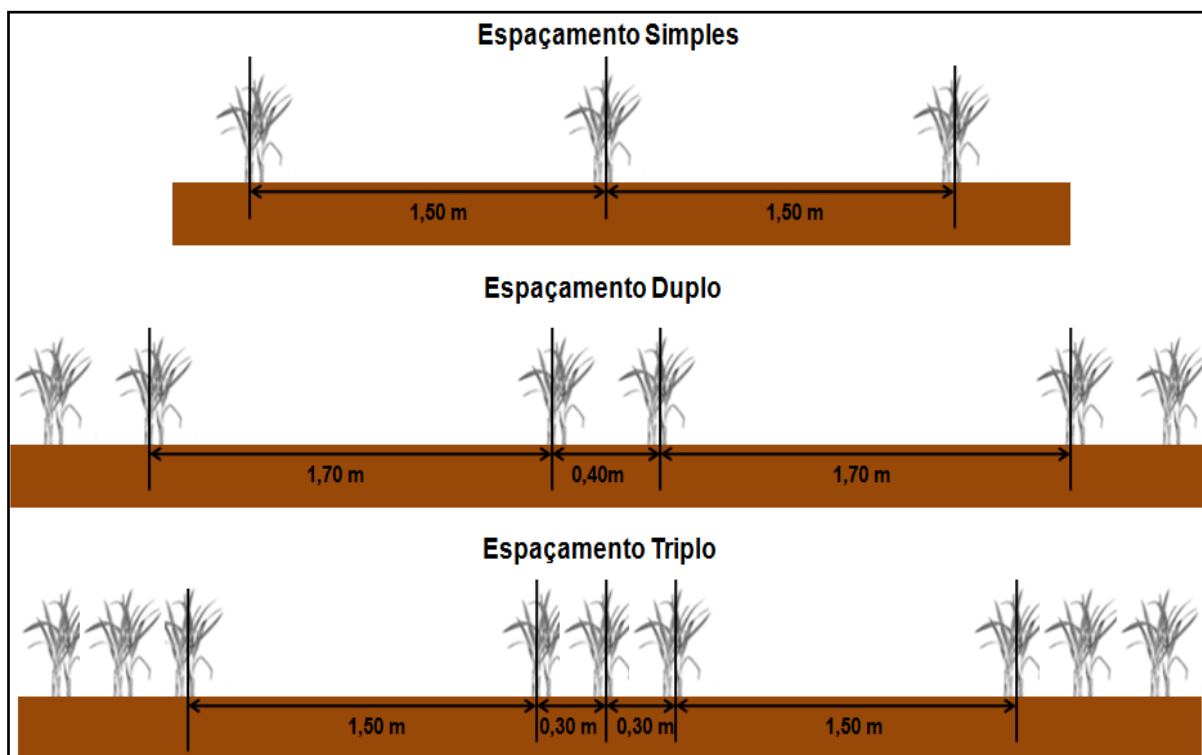


Figura 7 – Espaçamentos entre linhas de cultivo da cana-de-açúcar adotados no presente estudo.

A variedade de cana-de-açúcar plantada foi a RB855156, que possui importância a nível nacional, sendo o principal material genético cultivado pela cooperativa. É destaque pela alta precocidade de maturação, elevada riqueza de açúcares e ótima capacidade de brotação na soqueira, onde foi e é ainda a mais importante variedade de ciclo de maturação precoce do Brasil.

4.3 Colheita

A colheita do experimento foi realizada em 12 de setembro de 2013 e ocorreu após as avaliações dos atributos da planta. O evento foi realizado com uma colhedora Case da serie A 8.000 acompanhada de um trasbordo para coleta dos colmos cortados.

A colhedora utilizada apresenta massa aproximada de 18,3 T e rodado do tipo esteira com distância entre as faces externas da esteira de 1,88 m e largura de esteira de 0,47 m. O transbordo trafegou sobre o experimento com sua capacidade de carga máxima, o que corresponde a 15 T de carga total. A distância entre os lados internos do rodado do equipamento é 1,47 m e a distância entre as os lados externos do rodado é 2,70 m, sendo a largura dos pneus de 1,23 m. O trator que tracionou o trasbordo, é da marca CBT, modelo 2105, com tração 4x2, apresenta massa aproximada de 5 T e tem distância entre as faces internas do rodado traseiro de 1,25 m e distância entre as faces externas de 2,20 m, sendo o pneu traseiro com largura de 0,95 m. No momento da colheita foi avaliada a umidade à base de massa do solo, para fins de caracterização do evento de tráfego (tab. 1), as quais foram bem similares entre os três tipos de espaçamentos.

Tabela 1 – Umidade do solo à base de massa no momento da colheita do experimento.

Tratamento	Umidade a base de massa (%)
LS	30,27
LD	31,57
LT	32,98

LS: Espaçamento simples (convencional); LD: Espaçamento combinado duplo; LT: Espaçamento combinado triplo.

4.4 Avaliação de atributos físicos do solo

No dia 23 de janeiro de 2013, (cinco meses após a implantação do experimento), durante o ciclo de cana planta da cultura e em cada tipo de configuração de espaçamento foram coletadas amostras com estrutura preservada e não preservada, na camada de solo de 0,00-0,20 m. Para isto, foi traçada uma transeção de 50 m de comprimento, localizada sobre a linha da cultura (paralela a

linha da cultura) para cada um dos três tipos de configurações de espaçamentos entre linhas (Fig. 8).

A amostragem foi realizada ao longo de cada uma das três transeções com pontos de amostragem eqüidistante a 1 m.

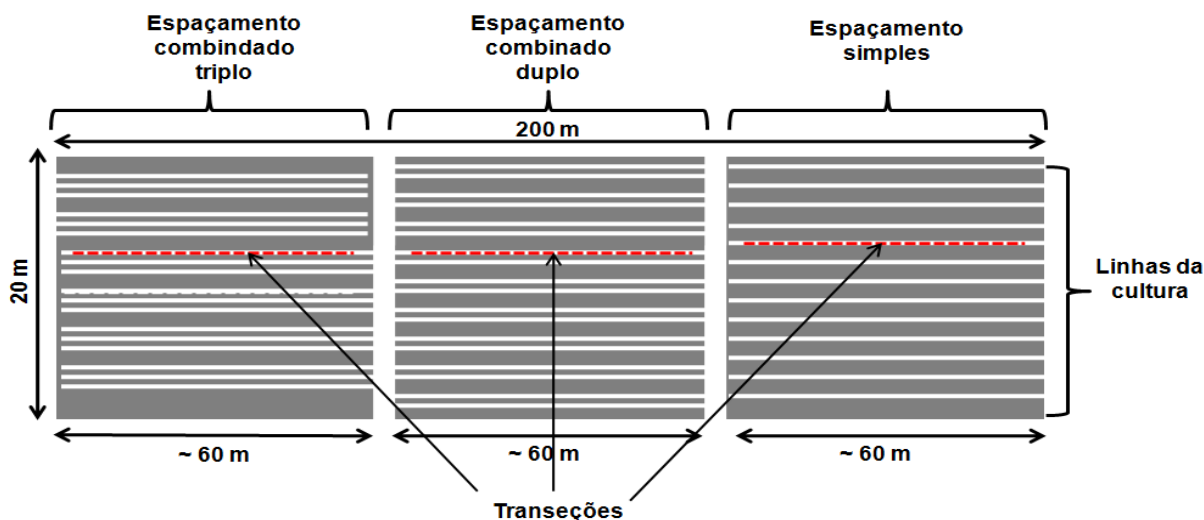


Figura 8 – Transeções utilizadas na coleta de amostras de solo.

As amostras de estrutura preservadas foram coletadas em anéis volumétricos de 3 cm de altura e 4,85 cm de diâmetro, em duplicata para cada ponto de amostragem (Fig. 9a). As amostras de estrutura não preservada (uma amostra em cada ponto de amostragem) foram coletadas com o auxílio de uma pá de corte, (Fig. 9b) totalizando 300 amostras de estrutura preservada e 150 amostras de estrutura não preservada.



Figura 9 – Localização dos pontos de amostragem de: amostras de estrutura preservada (a) e amostras de estrutura não preservada (b).

As amostras de solo foram levadas ao Laboratório de Física do Solo da Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel (FAEM), da Universidade Federal de Pelotas (UFPeI). A Fig. 10 apresenta um fluxograma dos procedimentos que foram realizados com as amostras de estrutura preservada. Com este tipo de amostras foram realizadas as seguintes determinações: densidade do solo (D_s), porosidade total do solo (P_t), macro (M_a) e microporosidade do solo (M_i), resistência à penetração do solo (R_P), umidade à base de volume correspondente a capacidade de campo (θ_{CC}), umidade à base de volume correspondente ao ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) e a Capacidade de água disponível (CAD).

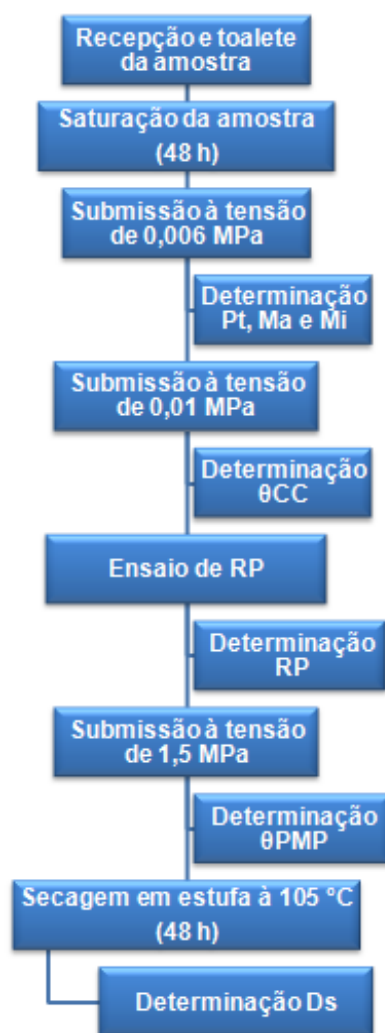


Figura 10 - Fluxograma dos procedimentos realizados em amostras de estrutura preservada para avaliação dos atributos físicos do solo.

Realizou-se primeiramente o toalete nas amostras e essas foram submetidas à saturação por no mínimo 48 horas. Após foram pesadas e colocadas em mesa de tensão para serem submetidas à tensão de 0,006 MPa. Depois de atingido o equilíbrio entre a pressão aplicada e a quantidade de água retida na amostra, essas foram pesadas e juntamente com a massa de solo seco, obtida após todas as etapas (como mostra o fluxograma da Fig. 10), determinou-se a P_t , a M_a e a M_i (Embrapa, 2011). Posteriormente, as amostras foram saturadas novamente por um período de 24 a 48 horas e submetidas a uma tensão de 0,01 MPa em uma câmara de pressão de Richards (KLUTE, 1986), tensão essa correspondente à capacidade de campo. Depois de obtido o equilíbrio entre a pressão aplicada e o conteúdo de água, cada amostra foi pesada para obtenção da θ_{CC} e submetida ao ensaio de resistência à penetração, com um penetrômetro eletrônico de bancada modelo MA 933, fabricado pela empresa MARCONI LTDA, obtendo assim a RP. Este equipamento consiste de uma haste com atuador linear e célula de carga de 20 kg acoplada a um computador para aquisição e armazenamento de dados.

A RP foi determinada em três locais distanciados igualmente do centro da amostra com uma velocidade de penetração de 10 mm.min^{-1} (BRADFORD, 1980). Depois de finalizado o ensaio de RP, as amostras foram saturadas novamente por 24 a 48 horas e submetidas a uma tensão de 1,5 MPa, referente ao ponto de murcha permanente, em câmara de pressão de Richards (KLUTE, 1986). Obtido o equilíbrio entre a tensão aplicada e a quantidade de água retida, as amostras foram pesadas para determinação da θ_{PMP} . Por último, as amostras foram secas em estufa a 105°C por no mínimo 48 horas e pesadas para obter a massa de solo seco, necessária para a obtenção dos atributos físicos relatados anteriormente. Além disso, foi removido o solo dos anéis volumétricos e estes foram pesados para obtenção da tara e do volume. Com a massa de solo seco e com o volume do anel, foi calculada a densidade do solo (EMBRAPA, 2011) a qual foi utilizada para converter os valores da umidade à base de massa (capacidade de campo e ponto de murcha permanente) para volume. O cálculo da capacidade de água disponível (CAD) foi feito pela diferença entre o conteúdo de água volumétrico armazenada entre θ_{CC} e θ_{PMP} pela camada avaliada (0,20 m) (REICHARDT; TIMM, 2004).

As amostras com estrutura não preservada foram utilizadas para a determinação da densidade de partículas (D_p), das frações granulométricas do solo (argila, silte e areia) e da argila natural (AN) segundo Embrapa (2011) e do teor de

carbono orgânico total (COT) com o método da combustão úmida segundo Walkley-Black modificado por Tedesco et al. (1995).

4.5 Avaliações de atributos da planta

A avaliação dos atributos altura do colmo (H), o diâmetro do colmo (DC), o °Brix, o número de colmos (NC) e a massa do colmo (MC) da cana-de-açúcar foram realizadas no dia 12 de setembro de 2013, no final do ciclo de cana planta, ao longo da mesma transeção considerada na amostragem de solo. A avaliação também ocorreu metro a metro, considerando os mesmos pontos da amostragem de solo.

Para a determinação da altura do colmo, considerou-se a distância entre o primeiro entre-nó na parte inferior até o último entre-nó na parte superior do colmo, descartando as folhas da parte superior do dossel, (Fig.11a). Foi determinada a altura de três colmos com o auxílio de uma régua, totalizando três repetições por ponto de amostragem (Fig. 11b).



Figura 11 – Distância (H) considerada para avaliação da altura do colmo (a) e a determinação com a régua da altura do colmo (b) da cana de açúcar em diferentes pontos de amostragem ao longo da transeção.

Para determinação do diâmetro do colmo, utilizou-se um paquímetro digital onde foi medido o diâmetro do entre-nó da parte mediana de três colmos em cada ponto de amostragem (Fig. 12a). Para avaliação do °Brix realizou-se a extração do caldo do entre-nó mediano com o auxílio de um extrator (Fig. 12b) e o °Brix do caldo determinado com um refratômetro digital portátil que expressa o valor em grau brix, ou seja, teor de sólidos solúveis totais do caldo (Fig. 12c). Considerando a sacarose como um dos sólidos do caldo que representa de 80 a 90%, o aumento do seu conteúdo acaba por resultar em aumento do Brix do caldo.



Figura 12 – Determinação do diâmetro do colmo (a), extração do caldo (b) e determinação do °Brix com refratômetro digital portátil (c).

Foram cortados todos os colmos dentro de cada ponto ao longo da transeção (Fig.13a) para avaliação do número de colmos (NCM) e da massa do colmo (MC). Os colmos foram dispostos sobre cada ponto e antes de serem pesados foram contados (Fig. 13b). Para a obtenção da massa dos colmos, todos os colmos do ponto foram pesados com uma balança instalada em um tripé (Fig. 13c). Assim, para obter a massa de colmo por ponto dividiu-se a massa de todos os colmos pesados pelo número de colmos contados. No espaçamento combinado duplo e no espaçamento combinado triplo, o número de colmos e a massa do colmo foi dividida por 2 e por 3, respectivamente, pois em cada ponto da transeção desses tipos de espaçamentos foi feita a avaliação nas linhas combinadas (dupla e tripla), sendo que

na linha combinada dupla há duas linhas e na linha combinada tripla há três linhas, permitindo comparação com o espaçamento do tipo simples (convencional).



Figura 13 – Colmos cortados e dispostos sobre o ponto de amostragem para avaliação do número e da massa de colmos (a), procedimento de contagem dos colmos (b) e de pesagem dos colmos (c).

4.6 Análise dos dados

Inicialmente foi realizada uma análise estatística descritiva nos atributos de planta (MC, NC, DC, HC, Brix) e nos atributos de solo (RP, Ds, CAD, COT, Pt, Ma, Mi, argila, silte, areia, θ_{CC} , θ_{PMP} , Dp, AN e CAD) onde se determinou as medidas de posição (média aritmética e mediana) de dispersão [valores mínimo e máximo, desvio padrão (s) e coeficiente de variação (CV)] e que indicam o formato da distribuição [os coeficientes de assimetria (Ass.) e curtose (Cur.)]. Também foi realizada a verificação da distribuição de frequência dos atributos de planta e de solo utilizando como teste o kolmogorov-smirnov. Este é um teste de aderência não paramétrico que verifica se o conjunto de dados pode ser considerado com uma distribuição de probabilidade, nesse caso, a distribuição normal. Todas as análises foram realizadas com o *software R* (R CORE TEAM, 2013).

Após, foi verificada a estrutura de dependência espacial das variáveis através do cálculo da função de autocorrelação e, posteriormente, por meio da construção do autocorrelograma. O cálculo da função de autocorrelação foi realizado pelo *software R* (R CORE TEAM, 2013), sendo descrito na equação 2. Para determinar os limites dos intervalos de confiança (IC) de autocorrelação, foi aplicada a função de probabilidade acumulada p ($p = \pm 1,96$ para 95% confiança) para a função de distribuição normalizada (Davis, 1986) com o número de observações $n=50$ (equação 4). Considerou-se dependência espacial quando os valores dos coeficientes de autocorrelação no primeiro lag foram superiores ou inferiores ao limite do IC.

Com base no autocorrelograma, as variáveis que apresentaram autocorrelação de ao menos um lag, puderam ser relacionadas com as variáveis respostas por meio da função de crosscorrelação. A análise de crosscorrelação foi realizada para as variáveis MC e °BRIX em relação as variáveis que apresentaram autocorrelação espacial, para os diferentes espaçamentos (LS, LD e LT). A função de crosscorrelação que dá origem ao crosscorrelograma é dada pela equação 5. Foi utilizado o *software R* (R CORE TEAM, 2013) para o cálculo da função de crosscorrelação.

Nos crosscorrelogramas as linhas tracejadas horizontais representam os limites do intervalo de confiança calculados para um número de observações $n=50$ com nível de 95% de confiança. Os valores dos coeficientes de crosscorrelação acima e abaixo desses limites para ambas as direções indicam a correlação espacial entre as variáveis ao nível de 5% de significância pelo teste t . Considera-se a faixa de correlação espacial a distância até o lag em que o coeficiente de crosscorrelação foi maior que o IC, sendo se há distâncias (lag's) diferentes entre as duas direções do crosscorrelogramas (positiva e negativa) é considerado sempre o lado com menor lag. Se há crosscorrelação só para uma direção do crosscorrelograma e não para a outra, não há correlação cruzada.

De acordo com o crosscorrelograma entre massa do colmo e °Brix com as variáveis autocorrelacionadas espacialmente, foram selecionadas as variáveis que apresentaram dependência cruzada com as variáveis preditas (massa do colmo e °Brix) para serem preditoras, compondo o modelo autorregressivo de espaço de estados para cada espaçamento entre linhas. Nas variáveis escolhidas, foi realizada uma padronização dos dados para manter o mesmo grau de magnitude entre as

variáveis, de acordo com a equação 8. Segundo Hui et al. (1998), o uso de dados padronizados na análise de espaço de estados fornece valores da matriz dos coeficientes de estado (equação 9) com magnitude proporcional ao grau de importância da contribuição de cada variável preditora na estimativa da variável resposta.

$$Z'_j(x_i) = \frac{[Z_j(x_i) - (m - 2s)]}{4s} \quad (8)$$

Sendo $Z'_j(x_i)$ o valor padronizado, $Z_j(x_i)$ é o valor medido, m é a média amostral e s o desvio padrão amostral de $Z_j(x_i)$.

A análise de espaço de estados foi realizada com o auxílio de um software denominado ASTSA [Applied Statistical Time Series Analysis - Shumway (1988)]. Com os coeficientes de estados (ϕ_{pp}) (equação 7), os valores estimados das variáveis em estudo e os desvios padrões das estimativas das variáveis avaliou-se a relação entre as variáveis de planta (massa do colmo e °Brix) com as variáveis de solo e outras de planta em cada tipo de configuração de espaçamento entre linhas da cultura.

Para avaliar a eficiência da estimativa utilizando a abordagem de espaço de estados foi calculado o coeficiente de determinação (R^2) da regressão linear simples entre os valores transformados estimados e observados da variável resposta, conforme demonstrado pela equação 9.

$$R^2 = \frac{SQR}{SQT} \quad (9)$$

Sendo SQR a soma dos quadrados da diferença entre os valores estimados pela regressão e a média aritmética da população amostral e SQT soma dos quadrados da diferença entre os valores observados e a média aritmética.

Com a identificação de independência espacial entre massa do colmo e °Brix (variáveis preditas) com algumas variáveis de solo e de planta (variáveis preditoras) apresentadas pelos gráficos crosscorrelograma, não se pôde utilizar a abordagem de espaço de estados para avaliar as suas relações. Realizou-se então uma análise

de regressão múltipla nos três espaçamentos (LS, LD e LT) utilizando como variáveis independentes em cada espaçamento a massa do colmo e o °Brix e como dependentes as variáveis que não se relacionaram espacialmente pela análise de crosscorrelação com essas duas variáveis. Separaram-se as variáveis dependentes (preditoras) em dois grupos: as de planta e as de solo, sendo realizada a análise de regressão múltipla separadamente para cada grupo. Avaliaram-se os coeficientes da regressão de cada variável preditora quanto a sua significância pelo teste t em cada grupo. As que apresentaram coeficientes significativos a 5 % foram padronizadas conforme a equação 8 e submetidas a uma nova análise de regressão múltipla, utilizando como variáveis preditas a massa do colmo e o °Brix e como preditoras somente as que apresentaram coeficientes significativos para cada grupo, nos três espaçamentos entre linhas. Como medidas de avaliação da qualidade do modelo, foram considerados o coeficiente de determinação e o erro padrão médio.

As variáveis que apresentaram elevada colinearidade foram excluídas pelo critério do fator de inflação da variância, cujo valor considerado que a multicolinearidade pode estar influenciando indevidamente as estimativas dos mínimos quadrados foi maior que 10 (NETER, et al., 2004). Foi utilizado o *software R* (R CORE TEAM, 2013) para a análise.

5. Resultados e Discussão

5.1 Estatística descritiva

A análise estatística descritiva por tipo de parâmetro (solo e planta) nos espaçamentos simples (LS), combinado duplo (LD) e combinado triplo (LT) é apresentada nas tab. 2, 3 e 4, respectivamente. Para classificação dos coeficientes de variação dos atributos de planta e de solo nos três espaçamentos adotou-se a classificação proposta por Gomes (1990). O autor tendo em vista os coeficientes de variação obtidos comumente nos ensaios agrícolas de campo classificou como: baixos quando inferiores a 10%; médios quando de 10 a 20%; altos quando de 20 a 30%; e muito altos quando superiores 30%.

Observa-se que as médias dos atributos da planta [número de colmos por metro linear (NC), massa do colmo MC, diâmetro do colmo (DC), altura do colmo (H) e grau brix (°Brix)] foram maiores no sistema de espaçamento entre linhas simples, seguido pelo espaçamento entre linhas combinado duplo e triplo. Essa redução nos parâmetros biométricos deve-se ao aumento populacional de colmos por unidade de área. Levando em consideração os espaçamentos, se for calculado o número de colmos por metro quadrado, tem-se 6,49, 7,06, e 7,90 colmos/m² no espaçamento entre linhas simples, combinado duplo e combinado triplo, respectivamente, havendo um acréscimo populacional de colmos nos espaçamentos combinados. Isto pode ser explicado pela interceptação da radiação solar pelas folhas da cultura. Essa interceptação é resultado da atenuação da densidade de fluxo, que ocorre do topo para a base das plantas (MACHADO et al., 1985). Não havendo limitações hídricas e minerais a relação entre acúmulo de matéria seca e quantidade de radiação interceptada é linear (MONTEITH, 1977). Com o aumento da densidade populacional, reduz-se a interceptação da radiação solar devido ao menor índice de área foliar por colmo, reduzindo assim a fitomassa do colmo. Em espaçamentos com maior densidade populacional como o combinado duplo e triplo, o índice de área foliar por unidade de área, pode ser maior (SHIH; GASCHO, 1980). Bull e Bull (1996) relataram que no espaçamento entre linhas combinado houve aumento da interceptação da radiação por unidade de área e aumento na produtividade da cultura.

Tabela 2 – Medidas de posição (média aritmética e mediana) de dispersão [valores mínimo e máximo, desvio padrão (s) e coeficiente de variação (CV)], que indicam o formato da distribuição [os coeficientes de assimetria (Ass.) e curtose (Cur.)] e o teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov das variáveis analisadas (N=50) no espaçamento entre linhas simples (LS) da cultura.

Var. ¹	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	s	CV(%)	Ass.	Cur.	p ²
----- Atributos da planta -----									
NCM (NC)	9,73	10,00	3,00	17,00	3,21	32,95	0,244	-0,366	0,849
MC (Kg)	1,04	1,05	0,74	1,38	0,13	12,42	0,071	0,317	0,973
DC (mm)	26,00	25,70	21,13	30,28	2,15	8,28	0,264	-0,282	0,669
HC (cm)	199,8	201,7	161,7	226,7	15,57	7,79	-0,396	-0,397	0,638
°BRIX (%)	20,77	20,75	19,10	22,83	0,81	3,92	0,156	-0,254	0,922
----- Atributos do solo -----									
Ds (Mg.m ⁻³)	1,22	1,21	1,14	1,31	0,04	3,26	0,409	-0,511	0,655
RP (MPa)	0,88	0,86	0,57	1,38	0,21	23,54	0,525	-0,533	0,439
CAD (mm)	18,03	17,93	11,32	23,87	3,42	18,98	-0,054	-1,035	0,522
COT (%)	0,86	0,86	0,69	1,02	0,07	7,75	0,267	0,043	0,848
Pt (m ³ m ⁻³)	0,6015	0,6063	0,5551	0,6427	0,02	3,59	-0,268	-0,624	0,939
Ma (m ³ m ⁻³)	0,1966	0,2008	0,1383	0,2551	0,03	15,27	-0,077	-0,829	0,809
Mi (m ³ m ⁻³)	0,4049	0,4056	0,3594	0,4661	0,02	5,45	0,314	0,298	0,926
θ _{CC} (m ³ m ⁻³)	0,3739	0,3770	0,3223	0,4309	0,02	5,89	-0,113	-0,134	0,503
θ _{PMP} (m ³ m ⁻³)	0,2837	0,2849	0,2496	0,3229	0,02	5,75	0,085	0,058	0,847
Argila (gKg ⁻¹)	555,30	554,00	522,40	603,40	20,01	3,60	0,492	-0,083	0,985
Areia (gKg ⁻¹)	218,14	220,30	168,30	255,00	23,54	10,79	-0,390	-0,483	0,976
Silte (gKg ⁻¹)	227,90	227,30	193,70	265,50	17,44	7,65	0,135	-0,728	0,676
AN (gKg ⁻¹)	178,13	178,80	156,90	191,80	7,08	3,97	-0,467	0,516	0,972
Dp (Mgm ⁻³)	2,89	2,89	2,81	2,99	0,03	1,14	0,000	1,044	0,645

¹Variáveis: NCM: número de colmos por metro; MC: massa individual do colmo; DC: diâmetro do colmo; HC: altura do colmo; °Brix: sólidos solúveis totais; Ds: densidade do solo; RP: resistência à penetração; CAD: capacidade de água disponível; COT: carbono orgânico total; Pt: porosidade total; Ma: macroporosidade; Mi: microporosidade; θ_{CC}: umidade à base de volume na capacidade de campo; θ_{PMP}: umidade à base de volume no ponto de murcha permanente; Argila: argila; Areia: areia; Silte: silte; AN: argila naturalmente dispersa; e Dp: densidade de partículas.

²p – Probabilidade de não rejeitar a hipótese de distribuição normal dos dados pelo teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov (p>0,05 - dados com distribuição normal a 5% de probabilidade).

Tabela 3 – Medidas de posição (média aritmética e mediana) de dispersão [valores mínimo e máximo, desvio padrão (s) e coeficiente de variação (CV)], que indicam o formato da distribuição [os coeficientes de assimetria (Ass.) e curtose (Cur.)] e o teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov das variáveis analisadas (N=50) no espaçamento entre linhas combinado duplo (LD).

Var. ¹	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	s	CV(%)	Ass.	Cur.	p ²
----- Atributos da planta -----									
NCM (NC)	7,42	7,50	3,00	12,50	2,00	26,93	0,105	0,165	0,630
MC (Kg)	0,99	1,00	0,58	1,46	0,22	21,83	-0,007	-0,697	0,913
DC (mm)	24,73	25,10	19,07	28,53	2,20	8,90	-0,696	0,244	0,959
HC (cm)	172,8	175,0	113,3	206,7	20,78	12,02	-0,525	-0,003	0,473
°BRIX (%)	20,53	20,57	18,73	22,30	0,86	4,19	0,029	-0,342	0,869
----- Atributos do solo -----									
Ds (Mgm ⁻³)	1,21	1,20	1,07	1,37	0,08	6,37	0,295	-0,464	0,743
RP (MPa)	1,04	0,90	0,48	2,37	0,39	37,90	1,300	1,871	0,183
CAD (mm)	16,19	16,00	10,01	23,14	3,57	22,07	-0,058	-0,847	0,992
COT (%)	0,99	0,98	0,81	1,18	0,09	8,98	0,134	-0,054	0,863
Pt (m ³ m ⁻³)	0,6098	0,6105	0,5448	0,6872	0,03	4,82	-0,002	0,300	0,860
Ma (m ³ m ⁻³)	0,1965	0,2037	0,1137	0,3025	0,05	23,15	-0,027	-0,742	0,945
Mi (m ³ m ⁻³)	0,4133	0,4105	0,3633	0,4683	0,02	5,96	0,266	-0,170	0,991
θ _{CC} (m ³ m ⁻³)	0,3906	0,3892	0,3392	0,4465	0,02	6,28	-0,015	-0,105	0,976
θ _{PMP} (m ³ m ⁻³)	0,3098	0,3084	0,2547	0,3880	0,03	9,42	0,494	0,250	0,992
Argila (gKg ⁻¹)	601,81	601,10	571,80	632,30	13,30	2,21	0,059	-0,035	0,959
Areia (gKg ⁻¹)	168,03	163,70	124,00	230,00	24,28	14,45	0,488	-0,325	0,628
Silte (gKg ⁻¹)	230,16	231,70	197,60	261,00	16,65	7,23	-0,178	-0,948	0,441
AN (gKg ⁻¹)	191,75	191,73	191,70	211,60	7,93	4,14	0,006	0,371	0,849
Dp (Mgm ⁻³)	2,91	2,92	2,83	2,99	0,04	1,38	-0,125	-0,554	0,778

¹Variáveis: NCM: número de colmos por metro; MC: massa individual do colmo; DC: diâmetro do colmo; HC: altura do colmo; °Brix: sólidos solúveis totais; Ds: densidade do solo; RP: resistência à penetração; CAD: capacidade de água disponível; COT: carbono orgânico total; Pt: porosidade total; Ma: macroporosidade; Mi: microporosidade; θ_{CC}: umidade à base de volume na capacidade de campo; θ_{PMP}: umidade à base de volume no ponto de murcha permanente; Argila: argila; Areia: areia; Silte: silte; AN: argila naturalmente dispersa; e Dp: densidade de partículas.

²p – Probabilidade de não rejeitar a hipótese de distribuição normal dos dados pelo teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov (p>0,05 - dados com distribuição normal a 5% de probabilidade).

Tabela 4 – Medidas de posição (média aritmética e mediana) de dispersão [valores mínimo e máximo, desvio padrão (s) e coeficiente de variação (CV)], que indicam o formato da distribuição [os coeficientes de assimetria (Ass.) e curtose (Cur.)] e o teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov das variáveis analisadas (N=50) no espaçamento entre linhas combinado triplo (LT).

Var. ¹	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	s	CV(%)	Ass.	Cur.	p ²
----- Atributos da planta -----									
NCM (NC)	5,53	5,00	3,00	10,00	1,63	29,44	1,057	1,019	0,118
MC (Kg)	0,83	0,83	0,64	1,03	0,10	12,28	0,018	-0,528	0,992
DC (mm)	23,26	23,35	18,71	26,98	1,80	7,75	-0,147	-0,238	0,954
HC (cm)	165,7	166,7	123,3	193,3	12,85	7,75	-0,880	1,797	0,406
°BRIX (%)	20,44	20,48	17,90	22,57	1,07	5,21	-0,428	-0,010	0,892
----- Atributos do solo -----									
Ds (Mgm ⁻³)	1,24	1,23	1,11	1,43	0,08	6,25	0,606	0,045	0,832
RP (MPa)	1,35	1,03	0,57	4,32	0,74	55,00	2,152	5,527	0,051
CAD (mm)	16,09	16,04	9,82	22,40	3,01	18,73	-0,011	-0,870	0,675
COT (%)	0,88	0,87	0,71	1,29	0,09	10,65	1,702	6,627	0,282
Pt (m ³ m ⁻³)	0,6136	0,6125	0,5549	0,6806	0,03	4,26	0,228	0,258	0,846
Ma (m ³ m ⁻³)	0,1711	0,1688	0,0855	0,2651	0,04	22,86	0,186	-0,149	0,995
Mi (m ³ m ⁻³)	0,4425	0,4418	0,4004	0,5009	0,02	5,06	0,213	-0,209	0,916
θ _{CC} (m ³ m ⁻³)	0,4198	0,4168	0,3847	0,4824	0,02	5,46	0,507	-0,368	0,910
θ _{PMP} (m ³ m ⁻³)	0,3393	0,3381	0,2930	0,3932	0,03	7,58	0,221	-0,727	0,771
Argila (gKg ⁻¹)	640,18	639,70	603,20	702,40	21,68	3,39	0,468	0,313	0,995
Areia (gKg ⁻¹)	126,29	126,50	84,67	173,00	23,15	18,33	0,097	-0,592	0,941
Silte (gKg ⁻¹)	233,53	233,20	212,60	263,50	11,79	5,05	0,177	-0,443	0,967
AN (gKg ⁻¹)	190,26	192,40	169,20	202,90	7,74	4,07	-0,889	0,352	0,060
Dp (Mgm ⁻³)	2,94	2,94	2,86	2,99	0,03	1,05	-0,276	-0,795	0,437

¹Variáveis: NCM: número de colmos por metro; MC: massa individual do colmo; DC: diâmetro do colmo; HC: altura do colmo; °Brix: sólidos solúveis totais; Ds: densidade do solo; RP: resistência à penetração; CAD: capacidade de água disponível; COT: carbono orgânico total; Pt: porosidade total; Ma: macroporosidade; Mi: microporosidade; θ_{CC}: umidade à base de volume na capacidade de campo; θ_{PMP}: umidade à base de volume no ponto de murcha permanente; Argila: argila; Areia: areia; Silte: silte; AN: argila naturalmente dispersa; e Dp: densidade de partículas.

²p – Probabilidade de não rejeitar a hipótese de distribuição normal dos dados pelo teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov (p>0,05 - dados com distribuição normal a 5% de probabilidade).

O menor número de colmos por metro linear nos espaçamentos duplos e triplos pode inferir em um menor perfilhamento nesses espaçamentos em relação ao espaçamento simples (tab. 2, 3 e 4). O número final de perfilhos são resultantes da competição por luz, água e nutrientes durante o seu desenvolvimento (CASTRO; CHRISTOFOLETTI, 2005). Com uma menor interceptação de luz há uma maior produção de auxinas no ápice promovendo o alongamento dos colmos e inibindo o crescimento das gemas laterais, resultando em uma menor formação de perfilhos (DILLEWIJN, 1952). Singels e Smit (2002) mostraram que a densidade de perfilhos finais e de pico são geralmente dependentes do espaçamento entre linhas, justificando a redução do número de colmos por metro linear nos espaçamentos duplo e triplo. O coeficiente de variação (CV) do NCM apresentou maior variação no espaçamento LS (CV= 32,95%) seguido do espaçamento LT com 29,44% e pelo LD com CV de 26,93%. Conforme classificação de Gomes (1990), apresentou-se alto o CV do número de colmos por metro para os espaçamentos LD e LT e muito alto para o espaçamento LS. Ferreira et al. (2007) estudando relações fenotípicas e genotípicas entre componentes de produção em cana-de-açúcar também obtiveram para esse atributo um coeficiente de variação elevado (27,06%). Essa variação ao longo da transeção pode ser resultado da desuniformidade de emergência dos perfilhos primários, devido aos vários fatores que afetam a emergência, a qualidade da muda, a distribuição da muda no sulco, a profundidade de plantio, o ambiente, entre outros. Com relação a distribuição de frequência dos dados, observa-se na tab. 2, 3 e 4 que os valores das médias e das medianas dos espaçamentos LS, LD e LT foram próximas, indicando uma tendência de centralidade, podendo caracterizar uma distribuição próxima à normal dos dados (REICHARDT; TIMM, 2012). Observando os valores de coeficiente de assimetria e curtose do NCM nos três espaçamentos (LS, LD e LT) percebe-se que os valores são próximos de zero, corroborando com a tendência de centralidade da distribuição dos dados pela mediana.

Quanto às médias do diâmetro do colmo (tab. 2, 3 e 4), houve uma redução de 5% com o aumento da densidade populacional no espaçamento entre linhas combinado duplo e de 10% no espaçamento triplo. De acordo com Townsend (2000) a luz captada por cada colmo está relacionada com o espaçamento entre linhas, sendo que as plantas muito próximas competem por luz e conseqüentemente tem sua taxa fotossintética reduzida, apresentando menor diâmetro do colmo. Shih e

Gascho (1980a) também afirmam que devido ao aumento populacional há uma diminuição no diâmetro do colmo. Nota-se neste atributo um CV maior no espaçamento LD (8,90%), seguido por 8,28 e 7,75 % do espaçamento LS e LT, respectivamente. Conforme classificação de Gomes (1990), o CV do DC para os três espaçamentos é classificado como baixo, pois é inferior a 10%. Ferreira et al. (2007) também encontraram um CV baixo quando avaliaram este atributo em um estudo de componentes de produção de cana-de-açúcar. Os coeficientes de assimetria e curtose do DC nos três espaçamentos foram bem próximos de zero, inferindo em uma distribuição de frequência dos dados próximo à normal. Isto pode ser observado também na comparação da média com a mediana, onde foram semelhantes nos três espaçamentos.

A altura do colmo (HC) também diminuiu devido aos espaçamentos LD e LT, havendo um decréscimo em relação a LS de 13,5% e 17%, respectivamente (tab. 2, 3 e 4). Matherne (1971) observou uma redução na altura do colmo em um espaçamento entre linhas mais denso (0,9 m), corroborando com os resultados encontrados. Este comportamento apresentado pela HC não corrobora com os resultados encontrados por Boyce (1968), possivelmente devido ao espaçamento que este autor utilizou (0,9 m) ser bem inferior ao abordado no presente estudo. Shih e Gascho (1980b) encontraram colmos maiores em espaçamentos mais densos (0,5 m), discordando dos dados obtidos. O crescimento do colmo é estimulado por luz, umidade e calor, e como em um plantio com uma população mais densa há competição principalmente por luz e umidade, resulta em uma redução na altura do colmo. Os coeficientes de variação do HC foram próximos nos espaçamentos LS e LT, (7,79 e 7,75 %, respectivamente) sendo classificados como baixos conforme Gomes (1990). O CV do espaçamento LD foi classificado como médio (12,02%), apresentando maior variação ao longo da transeção. Ferreira et al. (2007) encontraram CV de 5,25% para este atributo. Os coeficientes de assimetria e curtose da HC nos três espaçamentos foram próximos a zero, com exceção do coeficiente de curtose do espaçamento LT (-1,8).

A massa do colmo foi menor nos espaçamentos LD e LT (tab. 2, 3 e 4), devido ao comportamento apresentado e já discutido dos seus dois principais componentes (DC e HC). A redução foi maior no espaçamento LT, onde houve um decréscimo em relação à média do espaçamento convencional de 20,2%. Já no espaçamento LD o decréscimo foi menor, igual a 4,8% da média, inferindo em uma

possível vantagem em relação aos demais espaçamentos. Bell e Garside (2005) obtiveram uma redução da massa do colmo com o aumento da densidade populacional, e, além disso, citam estudos que obtiveram uma relação negativa entre a massa individual do colmo e a densidade populacional de colmos. No entanto, para realizar inferências sobre a vantagem do uso de espaçamentos mais adensados, deve-se observar a massa de colmos por unidade de área ao invés da massa individual do colmo. Considerando a população de 6,49, 7,06 e 7,90 colmos/m² e a massa individual do colmo de 1,04, 0,99 e 0,83 kg nos espaçamentos LS, LD e LT, respectivamente, obtém-se uma produção de toneladas de colmo por hectare (TCH) em ciclo de cana planta de 67,5 Mg ha⁻¹ no espaçamento LS (convencional), de 69,9 Mg ha⁻¹ no espaçamento LD e de 65,6 Mg ha⁻¹ no espaçamento LT. Observa-se que os valores foram bem próximos nos três espaçamentos, com uma ligeira superioridade do espaçamento LD em relação ao LS e ao LT, sendo um acréscimo não muito expressivo, mas promissor, pois a avaliação ocorreu somente em ciclo de cana planta e vários autores relatam que as maiores vantagens ocorrem em ciclo de cana soca (PARANHOS, 1972; BRAUNACK; MCGARRY, 2006). É incipiente afirmar qual espaçamento é o mais adequado tomando como base somente os valores de TCH e somente em ciclo de cana plana, pois ainda não houve efeito do tráfego da colheita sobre as plantas, sendo que a vantagem dos espaçamentos combinados é justamente em adequar o tráfego de máquinas para evitar a compactação na região de maior desenvolvimento radicular (BRAUNACK; MCGARRY, 2006). Paranhos (1972) obteve em média de cinco cortes da cultura valores de TCH superiores em espaçamentos duplos do que em espaçamentos simples. Braunack e McGarry (2006) observaram uma ligeira superioridade em TCH do espaçamento combinado duplo (1,8 x 0,3m) em relação ao tradicional (1,5 m), na média de três anos de avaliações e relatam ainda que as vantagens do espaçamento combinado ocorrem em longo prazo.

Os valores do coeficiente de variação da MC foram próximos nos espaçamentos LS e LT (12,42 e 12,28 %, respectivamente) sendo classificados como médio, conforme Gomes (1990). No entanto, o CV do espaçamento LD foi classificado como alto (21,83%), sendo superior ao dos outros espaçamentos, o que infere em maior variação ao longo da transeção. Ferreira et al. (2007) encontraram um CV de 11,24% para este atributo, sendo bem próximo aos encontrados nos espaçamentos LS e LT, classificado como médio. Os coeficientes de assimetria e

curtose da MC nos três espaçamentos foram bem próximos de zero, inferindo em uma distribuição próximo à normal dos dados.

O °Brix do caldo foi semelhante nos espaçamentos LS, LD e LT (tab. 2, 3 e 4). Este atributo representa o teor de sólidos solúveis totais, sendo utilizado para verificar a maturação da cana-de-açúcar. Como critério para julgar o estágio de maturação da cana utilizando o °Brix, o valor ideal para considerá-la madura é de no mínimo 18% no caldo (FERNANDES, 1985). Tomando como base o valor de 18% observa-se que os valores de °Brix nos três espaçamentos é elevado (20,77; 20,53 e 20,44). Isto é devido a cultivar RB855156 (utilizada no experimento) ser de ciclo de maturação precoce, pois segundo Horii (2004) as cultivares de cana-de-açúcar de ciclo precoce apresentam-se maduras no início de Maio, e as avaliações do experimento foram realizadas em agosto, quando a cultivar já se apresentava em plena maturação. Para FERNANDES (2003) o °Brix sofre influência principalmente da temperatura e da umidade do solo. Os valores encontrados corroboram com Boyce (1968) e Paranhos (1972), que afirma que as variações nas características dos colmos causadas pelas diferentes densidades populacionais não alteraram as qualidades industriais, não havendo variações no teor de sacarose dos colmos. Os coeficientes de variação deste atributo nos três tipos de espaçamentos entre linhas foram classificados conforme Gomes (1990) como baixos, mas com uma elevação nos espaçamentos LD e LT em relação ao LS. Com relação à comparação da média com a mediana, nota-se uma similaridade entre esses dois parâmetros nos três tipos de espaçamentos entre linhas, inferindo juntamente com os valores próximos a zero dos coeficientes de assimetria e curtose em uma distribuição de frequência próximo à normal dos dados.

Com relação aos atributos do solo, as médias de argila, silte e areia nos três espaçamentos são apresentadas nas tab. 2, 3 e 4. Os valores de argila são 555,30, 601,81 e 640,18 g.Kg⁻¹ e os de areia são 218,14, 168,03 e 126,29 g.Kg⁻¹ para os espaçamentos LS, LD e LT, respectivamente. Quanto aos valores de silte nos três espaçamentos os valores foram 227,90, 230,16 e 233,53 g.Kg⁻¹ nos espaçamentos LS, LD e LT, respectivamente. Observa-se ainda nas tab. 2, 3 e 4 que os valores do CV para a argila nos três espaçamentos foram de 3,60, 2,21 e 3,39% para os espaçamentos LS, LD e LT respectivamente, classificados como baixos conforme Gomes (1990). O CV do silte (LS=10,79%, LD=14,45% e LT=18,33%), é classificado como médio de acordo com Gomes (1990). Os coeficientes de variação da areia

(LS=7,65%, LD=7,23% e LT=5,05%) foram também classificados como baixos, de acordo com a classificação de Gomes (1990). Os atributos argila, silte e areia nos três espaçamentos (LS, LD e LT) apresentaram coeficientes de assimetria e curtose próximos a zero e mediana próxima à média nos três espaçamentos entre linhas.

Os valores de argila naturalmente dispersa (AN) nos três espaçamentos são apresentados nas tab. 2, 3 e 4. O valor deste atributo nos espaçamentos LS, LD e LT foi 178,13 g Kg⁻¹, 191,75 g Kg⁻¹ e 190,26 g Kg⁻¹, respectivamente. Os valores de coeficiente de variação para este atributo nos espaçamentos LS (3,97%), LD (4,14%) e LT (4,07%) foram classificados em baixos, conforme Gomes (1990). Os coeficientes de assimetria e curtose nos três espaçamentos para AN foram bem próximos a zero e a mediana deste atributo nos três espaçamentos foi próxima a média, evidenciando uma distribuição de frequência dos dados próximo à normal.

Observa-se na tab. 2, 3 e 4 que a densidade do solo foi semelhante nos três espaçamentos entre linhas (LS=1,22 Mg m⁻³, LD=1,21 Mg m⁻³ e LT=1,24 Mg m⁻³) com valores praticamente iguais na comparação da LS com a LD e com uma ligeira superioridade na LT. Souza et al. (2004), estudando a variabilidade espacial da densidade do solo em um Latossolo sob cultivo de cana-de-açúcar, observou valor médio da densidade de 1,40 Kg dm⁻³, e com valores mínimos e máximos de 1,16 e 1,68 Kg dm⁻³, respectivamente. Cabe ressaltar que a área em estudo onde os autores avaliaram estava há 30 anos sob cultivo de cana-de-açúcar e as avaliações realizadas no presente estudo foi em ciclo de cana planta. Reichert et al. (2003) propuseram para algumas classes texturais valores de densidade crítica: 1,30 a 1,40 Mg m⁻³ para solos argilosos, 1,40 a 1,50 Mg m⁻³ para os franco-argilosos e de 1,70 a 1,80 Mg m⁻³ para os franco-arenosos. Nota-se que a média da densidade do solo para os três espaçamentos (LS=1,22, LD=1,21 e LT=1,24) estão bem abaixo dos valores considerados críticos, inferindo em uma condição estrutural do solo adequada para o desenvolvimento das plantas, se for levado em consideração somente esse critério. Cabe ressaltar que as avaliações do presente trabalho são em cana planta, ou seja, somente no primeiro dos seis anos de vida útil do canavial. Observa-se nas tab. 2, 3 e 4 que o valor do coeficiente de variação deste atributo foi menor no espaçamento LS (3,26%) e semelhante entre os espaçamentos LD e LT (6,37 e 6,25%, respectivamente). Essa maior variação em relação a média nos espaçamentos LD e LT pode ser visualizada pelos valores de mínimo e máximo, cujas amplitudes foram maiores em comparação com o espaçamento LS. Conforme

classificação de Gomes (1990) o CV nos três tipos de espaçamento são classificados como baixo. Souza et al. (2004) encontraram valor de CV para a Ds em um estudo de variabilidade espacial e uma área sob cultivo de cana-de-açúcar de 5,45%, e classificou este valor em baixo de acordo com classificação para o coeficiente de variação proposto por Warrick & Nielsen (1980), corroborando com os resultados encontrados. Os valores da mediana ($1,21 \text{ Kg dm}^{-3}$ na LS, $1,20 \text{ Kg dm}^{-3}$ na LD e $1,23 \text{ Kg dm}^{-3}$ na LT) foram bem próximos dos valores da média nos três tipos de espaçamento ($1,22 \text{ Kg dm}^{-3}$ na LS, $1,21 \text{ Kg dm}^{-3}$ na LD e $1,24 \text{ Kg dm}^{-3}$ na LT) indicando uma tendência de centralidade na distribuição dos dados.

Nas tab. 2, 3 e 4 são apresentados também os valores de resistência à penetração (RP) nos três espaçamentos entre linhas. Nota-se que no LD e LT as médias foram maiores ($1,04$ e $1,35 \text{ MPa}$, respectivamente) em comparação ao LS ($0,88 \text{ MPa}$). O que pode ter ocasionado esse aumento da RP na LT e LD foi a forma como foi realizada a abertura e posteriormente a cobertura do sulco em cada tipo de espaçamento entre linhas para a implantação do canavial. Houve um problema de adequação do equipamento para sulcar e cobrir o sulco no espaçamento LD e principalmente na LT, sendo que para essas operações o trator teve que trafegar sobre as linhas para cobrir o sulco adjacente, devido a proximidade entre eles dentro da linha combinada, o que pode ter ocasionado um aumento da RP em função desse tráfego do trator com o equipamento.

Se for considerado o valor crítico de RP de 2 MPa , ou $2,5 \text{ MPa}$ considerado por vários autores como limitante (CAMARGO; ALLEONI, 1997) nota-se que nos três espaçamentos os valores de RP ficaram bem abaixo do valor crítico. Cabe ressaltar, que esses valores críticos de RP são considerados por alguns autores como não limitantes (REICHERT et al., 2003; REICHERT et al., 2009) sendo que esse valor pode ser bem superior à 2 MPa . Como a RP é altamente influenciada pela umidade do solo, esta foi determinada na umidade correspondente a capacidade de campo, para cada espaçamento entre linha. É possível notar nas tab. 2, 3 e 4 que os valores de θ_{cc} foram bem próximos em cada espaçamento ($LS=0,3739 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, $LD=0,3906 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e $LT=0,4198 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) causando pouca influencia na RP. Almeida et al. (2008b) relatam que a forte dependência deste atributo ao conteúdo de água pode causar uma sub ou superestimativa do valor da resistência a penetração em função da umidade. Os valores de CV de RP foi maior nos espaçamentos LD (37,90%) e LT (55%) em comparação ao LS (23,54%) (tab. 2, 3 e 4). Alguns autores já relataram

que essa variável apresenta uma alta variação espacial (SOUZA et al., 2006; SOUZA et al., 2004; CAVALCANTE, 1999 e SOUZA et al., 2001). Com relação à mediana deste atributo, observa-se que houve uma proximidade com a média somente no espaçamento LS, sendo que em LD e LT os valores da mediana se afastaram da média. Essa falta de tendência de centralidade dos dados de RP nos espaçamentos LD e LT pode ser verificada pelos valores de coeficiente de curtose (1,871 e 5,527, respectivamente) e assimetria (1,3 e 2,152, respectivamente) distantes do valor de zero.

Os valores de porosidade total ($0,6015$, $0,6098$ e $0,6136 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) macro ($0,1966$, $0,1965$ e $0,1711 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) e microporosidade do solo ($0,4049$, $0,4133$ e $0,4425 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) nos espaçamentos LS, LD e LT, respectivamente são apresentados nas tab. 2, 3 e 4. Conforme Baver et al. (1972), em solos argilosos de textura mais fina, a tendência é predominar microporos. Ferreira (2010) afirma que a distribuição de poros por tamanho é uma função da estrutura e da textura do solo. Silva & Kay (1997) salientaram que a microporosidade é fortemente influenciada pela textura, teor de carbono orgânico e pouco pelo aumento da densidade do solo originada pelo tráfego. Ferreira (2010) relata que os microporos são importantes para a retenção e armazenamento de água pelo solo, sendo que os macroporos são responsáveis pela infiltração, rápida redistribuição de água e aeração do solo. Observa-se que os valores de macroporosidade foram superiores a $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, preconizados por Baver et al. (1972) como valor crítico. VAN LIER (2001), afirma que devem ser considerados alguns fatores (porosidade total do solo, profundidade a ser aerada e o nível de consumo de oxigênio) para melhor estimar a porosidade de aeração mínima necessária, mas que é razoável admitir valores de porosidade de aeração entre $0,10$ e $0,12 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ como críticos, ficando acima ainda desse limite crítico, as médias de macroporosidade nos três espaçamentos. Os coeficientes de variação da Pt (LS=3,59%, LD=4,82% e LT=4,26%) e Mi (LS=5,45%, LD=5,96% e LT=5,06%) nos três espaçamentos foram classificados como baixos conforme Gomes (1990). Já o CV da macroporosidade foi classificado como médio no espaçamento LS (15,27%) e como alto nos espaçamentos LD (23,15%) e LT (22,86%) conforme Gomes (1990), concordando com os valores encontrados por Souza et al. (2004) em áreas de cultivo de cana-de-açúcar para este atributo. Foi evidenciado um comportamento de distribuição dos dados próximo a normalidade pelos coeficientes de assimetria e

curtose que foram bem próximos a zero e pela proximidade entre os valores da média e da mediana para os três atributos nos três espaçamentos entre linhas.

Observa-se nas tab. 2, 3 e 4 os valores de θ_{CC} : 0,3739, 0,3906 e 0,4198 $m^3.m^{-3}$ e de θ_{PMP} : 0,2837, 0,3098 e 0,3393 $m^3.m^{-3}$ para os espaçamentos LS, LD e LT, respectivamente. Percebe-se uma ligeira superioridade dos valores de θ_{PMP} nos espaçamentos LD e LT, que possivelmente pode ser explicado pela maior microporosidade apresentada nesses espaçamentos. Os valores de CV do θ_{CC} e do θ_{PMP} nos espaçamentos foram classificados conforme Gomes (1990) como baixos (tab. 2, 3 e 4). Os coeficientes de assimetria e curtose do θ_{CC} e do θ_{PMP} nos três espaçamentos foram bem próximos a zero e a mediana desses dois atributos nos três espaçamentos foi próxima a média.

Quanto aos valores da capacidade de água disponível, observa-se nas tab. 2, 3 e 4 os valores nos espaçamentos LS (18,03 mm), LD (16,19 mm) e LT (16,09 mm). A CAD é resultado da diferença entre θ_{CC} e θ_{PMP} sendo o seu valor depende dos valores desses dois atributos. Percebe-se que houve um aumento da θ_{PMP} nos espaçamento LD e LT, sendo de 9,20 e 19,6%, respectivamente. Como a θ_{CC} não variou muito nos três espaçamentos, houve uma alteração na diferença entre θ_{CC} e θ_{PMP} nos espaçamentos LD e LT, resultando em menores valores de CAD. Esse maior incremento da θ_{PMP} na LD e LT pode ser resultado de alterações do arranjo dos microporos, devido às alterações na estrutura do solo por eventos de tráfego na implantação do canavial evidenciados pela maior RP, resultando em um desfavorecimento do fenômeno de capilaridade e favorecimento da adsorção. Conforme REICHARDT e TIMM (2012), a capilaridade é responsável pela retenção de água no solo em faixas mais úmidas e a adsorção em faixas mais secas. Assim, o aumento da retenção de água em maiores tensões (fenômeno de adsorção) provavelmente foi mais efetivo que o aumento da retenção de água em menores tensões (fenômeno de capilaridade), diminuindo a CAD. O coeficiente de variação deste atributo nos espaçamento LS, LD e LT foi de 18,98; 22,07 e 18,73%, respectivamente (tab. 2, 3 e 4). Os valores de CV nos espaçamentos LS e LT foram classificados como altos e no espaçamento LD como muito alto, conforme Gomes (1990). Os coeficientes de assimetria e curtose nos três espaçamentos foram bem próximos a zero e a mediana destes atributos nos três espaçamentos foi próxima a média.

Os valores de Dp nos espaçamentos LS, LD e LT foram 2,89, 2,91 e 2,94 Mg.m⁻³, respectivamente. Ferreira (2010) afirma que a Dp não reflete as condições de estruturação do solo pois é um atributo muito estável e sua magnitude depende exclusivamente da composição das partículas sólidas. Os valores do coeficiente de variação nos espaçamentos LS, LD e LT foram 1,14; 1,38 e 1,05%, respectivamente, sendo classificados em baixos conforme Gomes (1990). Os coeficientes de assimetria e curtose nos três espaçamentos foram bem próximos a zero e a mediana deste atributos nos três espaçamentos foi próxima a média, evidenciando uma distribuição de frequência dos dados próximo à normal.

Quanto aos valores de carbono orgânico total (COT) nos espaçamentos LS (0,86%), LD (0,99%) e LT (0,88%), nota-se que o espaçamento LD apresentou maior valor de COT, seguido pelo LT e pelo LS (tab. 2, 3 e 4). A dinâmica da matéria orgânica no solo é complexa, mas o que dita sua quantidade no solo é basicamente a relação entre as adições de carbono por resíduos animais ou vegetais e as perdas de carbono por mineralização da matéria orgânica (BAYER; MIELNICZUK, 1997). Conforme Silva et al. (2012) a matéria orgânica é um componente bastante sensível às condições ambientais a às mudanças nas práticas de manejo agrícola. Como a avaliação do presente trabalho é em ciclo de cana planta, as variações dos teores de COT nos espaçamentos entre linhas é função de manejos ocorridos anteriormente a implantação do experimento e não em função do tipo de espaçamento. Os valores do coeficiente de variação nos espaçamentos LS, LD e LT foram 7,75; 8,98 e 10,65%, respectivamente, sendo os dois primeiros classificados em baixos e o último como médio, conforme Gomes (1990). Os coeficientes de assimetria e curtose nos espaçamentos LS e LD foram bem próximos a zero, porém no espaçamento LT se afastaram um pouco de zero (Ass.=1,702 e Cur.=6,627). A mediana destes atributos nos três espaçamentos foi próxima a média, evidenciando uma distribuição de frequência dos dados próximo à normal. Os valores de coeficiente de assimetria e curtose se afastaram um pouco de zero.

Percebe-se nas tab. 2, 3 e 4 que todas as variáveis nos três espaçamentos apresentaram distribuição de frequência próximo à normal de acordo com o teste de aderência não paramétrico kolmogorov-smirnov. Isto é evidenciado pelos valores de probabilidade (p) para não rejeição da hipótese de distribuição normal dos dados serem todos acima de 0,05, (considerando 5% de significância).

5.2 Análise de autocorrelação amostral

A Fig. 14 apresenta os gráficos autocorrelogramas para as variáveis correspondentes aos atributos da planta (Sólidos solúveis totais - °Brix, diâmetro do colmo - DC, altura do colmo - HC, número de colmos por metro - NCM e massa do colmo - MC) nos espaçamentos simples (LS), combinado duplo (LD) e combinado triplo (LT). Observa-se que apenas as variáveis °Brix e massa do colmo (MC) apresentaram dependência espacial ao nível de significância de 5% pelo teste entre as observações adjacentes nos três tipos de espaçamentos. A variável número de colmos por metro (NCM) apresentou dependência espacial entre as observações adjacentes significativa apenas no espaçamento LD. As variáveis diâmetro de colmo (DC) e altura do colmo (HC) não apresentaram dependência espacial significativa a 5% entre as observações adjacentes em nenhum dos três tipos de espaçamentos. O °Brix obteve uma faixa de dependência espacial ao nível de 5% de significância entre as observações adjacentes nos espaçamentos LS, LD e LT de apenas 1 lag. Como no presente estudo 1lag = 1 m, a dependência espacial para o °Brix foi de 1 m. O atributo NCM também apresentou faixa de dependência espacial ao nível de significância de 5% de 1 lag ou 1 m somente para o espaçamento LD. Timm et al. (2003) avaliando a produção de cana pela abordagem de espaço de estados com espaçamento entre linhas convencional (1,4 m), obtiveram uma dependência espacial para NCM de 10 m em um Nitossolo vermelho sob diferentes manejos de palhada. Com relação à MC esta apresentou dependência espacial de 1 lag ou 1 m nos espaçamentos LS e LT e de 7 lag's ou 7 m no espaçamento LD. Observa-se também um comportamento possivelmente cíclico desta variável no espaçamento LS. Verificou-se então que os conjuntos de dados referentes à °Brix e MC nos espaçamentos LS, LD e LT e ao NCM no espaçamento LD podem ser submetidos a análise de crosscorrelação para verificar se podem ser avaliadas pela abordagem de espaço de estados por meio de um modelo autoregressivo de primeira ordem.

A Fig. 15 apresenta os gráficos autocorrelogramas para as variáveis do solo argila, areia, silte, argila naturalmente dispersa (AN) e densidade de partículas (Dp) nos espaçamentos simples (LS), combinado duplo (LD) e combinado triplo (LT). Observa-se que as variáveis argila e areia apresentaram dependência espacial entre as observações adjacentes nos três tipos de espaçamentos.

O silte apresentou dependência espacial entre as observações adjacentes apenas nos espaçamentos LD e LT. A variável AN apresentou dependência espacial nos espaçamentos LS e LD e a variável Dp apenas no espaçamento LT. A argila obteve uma faixa de dependência espacial entre as observações adjacentes nos espaçamentos LS e LT de 8 lag's (ou 8 m) e no espaçamento LD de 5 lag's (ou 5 m). Timm et al. (2004) utilizando a abordagem de espaço de estados para relacionar propriedades físicas e químicas do solo, encontraram uma dependência espacial de 19 m para a argila. A faixa de dependência espacial para a areia foi de 4, 5 e 7 lag's para os espaçamentos LS, LD e LT, respectivamente. A argila e a areia dos Latossolos são atributos estáveis, ou seja, modificam-se pouco ao longo do tempo por ação do intemperismo (SOUZA et al. 2004c), o que confere uma continuidade espacial e por consequência forte dependência espacial. Para a variável silte, a faixa de dependência espacial foi de 1 lag para o espaçamento LD e de 3 lag's para o espaçamento LT.

A AN apresentou dependência espacial de 1 lag no espaçamento LS e LD. A densidade de partículas apresentou dependência espacial de apenas 1 lag e somente no espaçamento LT. Assim, as variáveis argila e areia nos três espaçamentos, a variável silte nos espaçamentos LD e LT, a variável AN nos espaçamentos LS e LD e a variável Dp no espaçamento LT podem ser submetidas à análise de crosscorrelação.

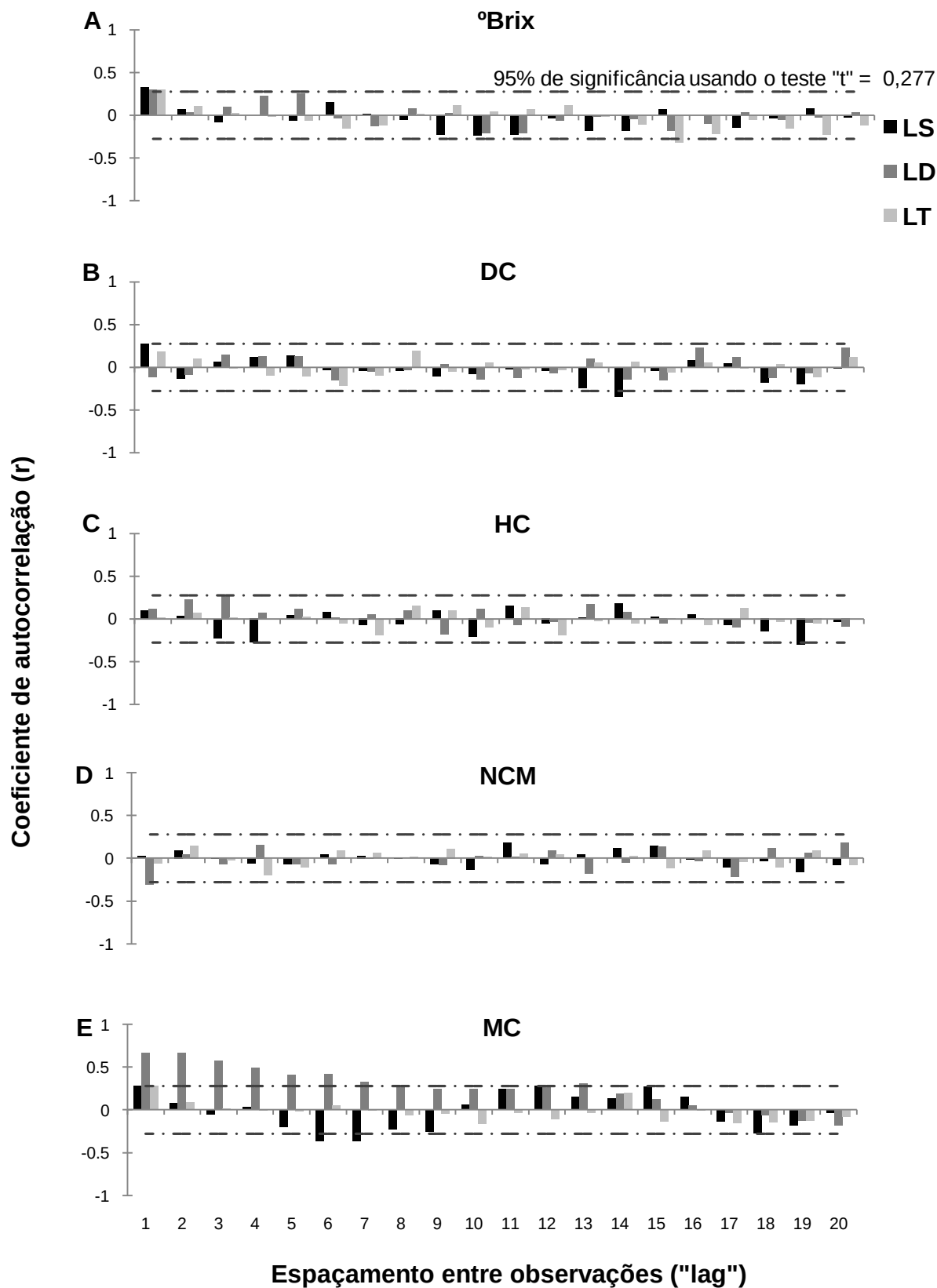


Figura 14 – Autocorrelogramas amostrais do °Brix da cana (°Brix - A), diâmetro do colmo (DC - B), altura do colmo (HC - C), número de colmos por metro (NCM - D) e massa do colmo (MC - E) obtido nos três espaçamentos (Linha simples - LS; Linha Dupla - LD; Linha tripla - LT).

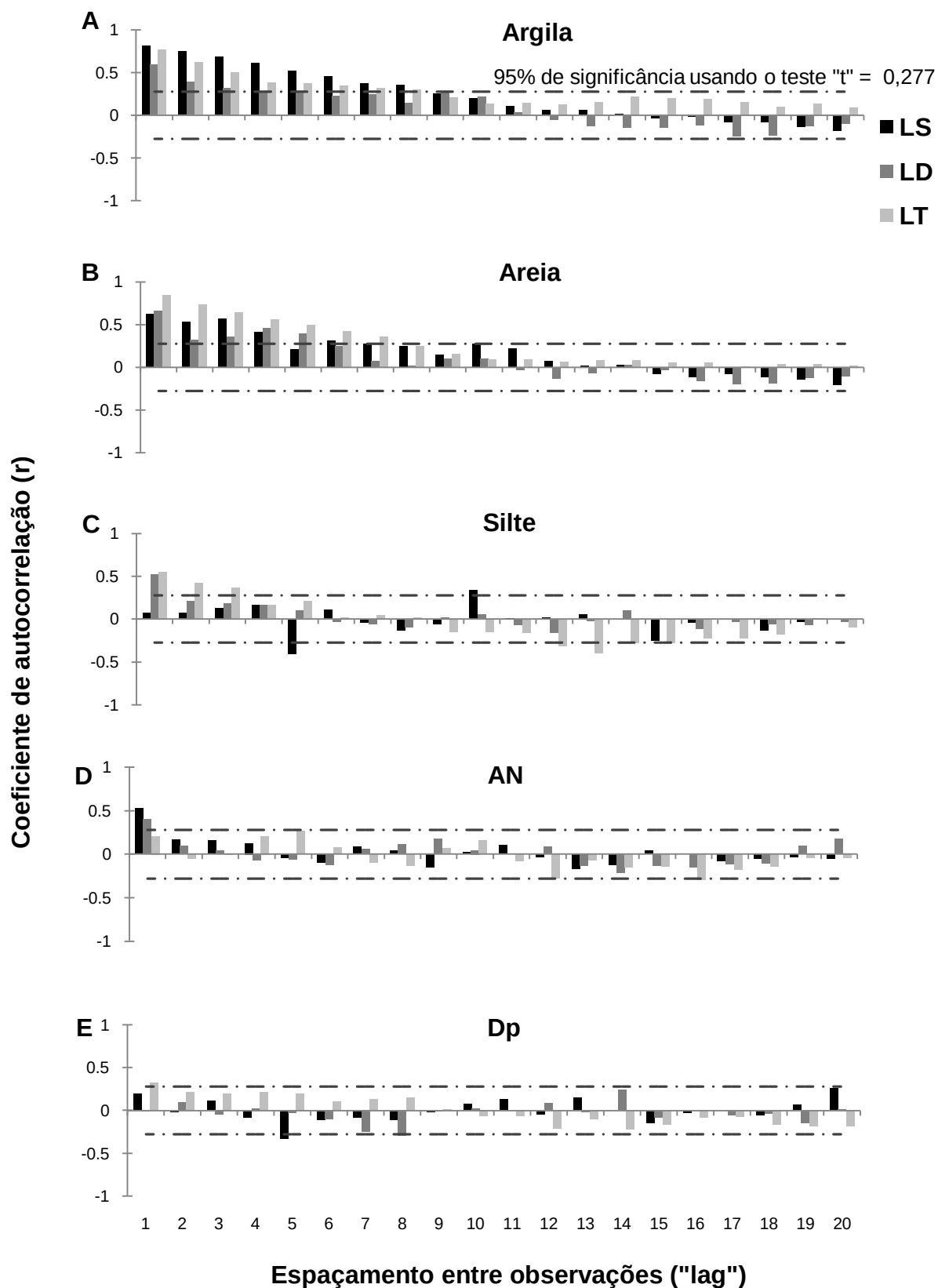


Figura 15 – Autocorrelogramas amostrais da argila (A), areia (B), silte (C), argila naturalmente dispersa (AN - D) e densidade de partículas (Dp – E) obtido nos três espaçamentos (Linha simples – LS; Linha Dupla – LD; Linha tripla - LT).

As variáveis porosidade total (Pt), Macroporosidade (Ma), Microporosidade (Mi), umidade a base de volume na capacidade de campo (θ_{CC}) e umidade a base de volume no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) nos espaçamentos simples (LS), combinado duplo (LD) e combinado triplo (LT) foram avaliadas quanto a sua estrutura de dependência espacial, podendo ser visualizada pelos autocorrelogramas amostrais na Fig. 16.

A Pt apresentou dependência espacial nos três espaçamentos, com uma faixa de dependência de 1 lag nos espaçamentos LS e LT e de 2 lag's no espaçamento LD. Já a Ma e a Mi apresentaram dependência entre as observações adjacentes apenas no espaçamento LT de apenas 1 lag. Souza et al. (2004a) avaliando a variabilidade espacial da porosidade total, da macro e microporosidade de um Latossolo vermelho sob cultivo de cana-de-açúcar a 30 anos, obteve dependência espacial de 27, 20 e 27 m para os atributos Pt, Ma e Mi, respectivamente, sendo o tamanho do lag considerado no estudo de 10 m e a ferramenta utilizada para avaliação da estrutura de dependência espacial foi o semivariograma.

A θ_{CC} nos espaçamentos LS e LT foram dependente espacialmente da observação adjacente até 1 lag. A θ_{PMP} apresentou dependência espacial de 1 lag nos espaçamentos LS e LT e de 4 lag's no espaçamento LD. Com isso, as variáveis Pt e θ_{PMP} nos três espaçamentos, a variável Ma e Mi no espaçamento LT e a variável θ_{CC} nos espaçamentos LS e LT podem ser submetidas a análise de crosscorrelação, devido à ocorrência de relação espacial de pelo menos um 1 lag.

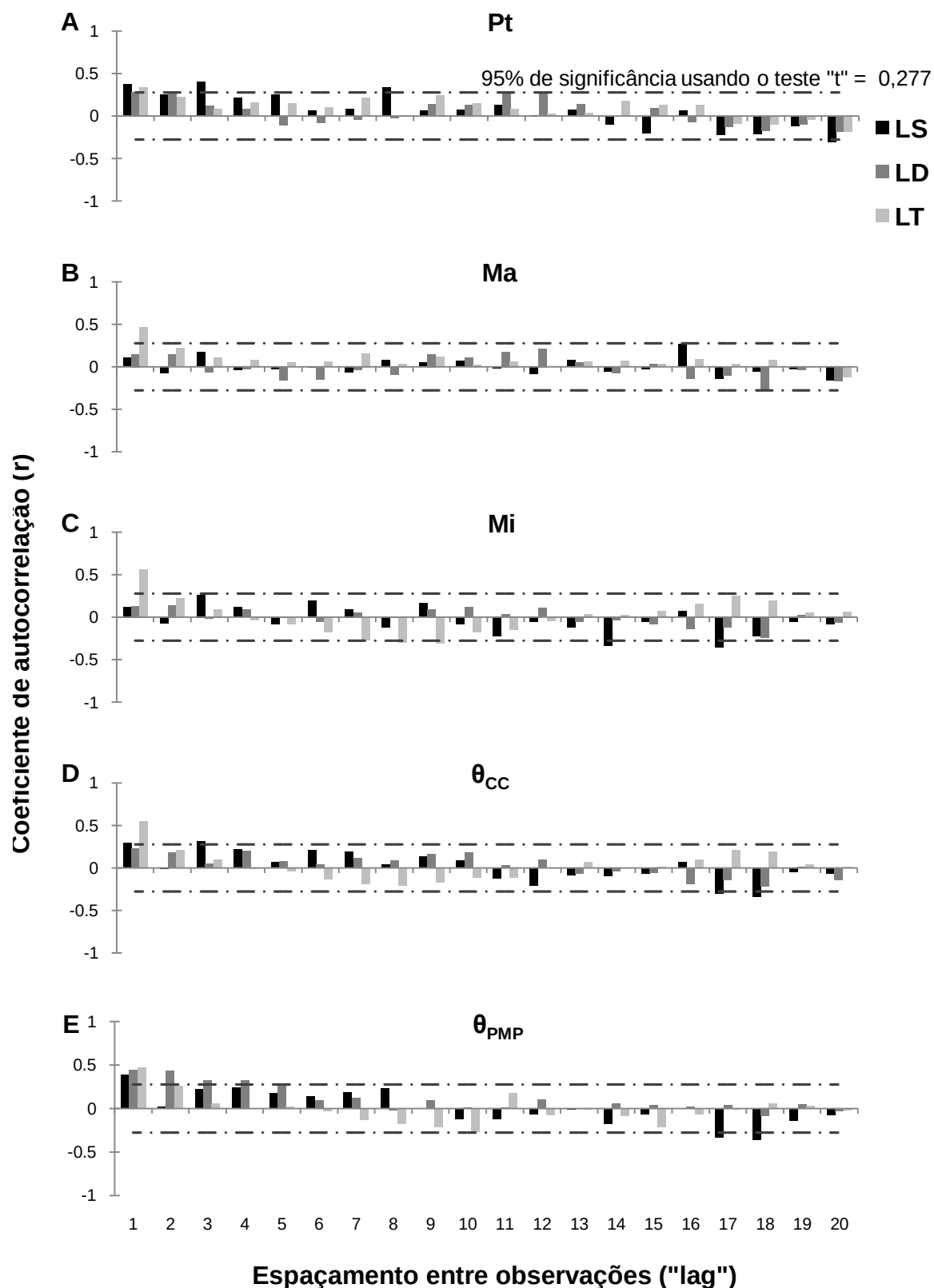


Figura 16 - Autocorrelogramas amostrais da porosidade total do solo (Pt - A), macroporosidade do solo (Ma - B), microporosidade do solo (Mi - C), umidade à base de volume na capacidade de campo (θ_{CC} - D), umidade à base de volume no ponto de murcha permanente (θ_{PMP} - E) nos três espaçamentos (Linha simples – LS; Linha Dupla – LD; Linha tripla - LT).

Na Fig. 17 são apresentadas as estruturas de variabilidade espacial da densidade do solo (Ds), resistência à penetração (RP), capacidade de água disponível (CAD) e carbono orgânico total (COT) nos espaçamentos simples (LS), combinado duplo (LD) e combinado triplo (LT). Observa-se que a Ds e CAD apresentaram dependência espacial nos três tipos de espaçamentos. A variável RP apresentou dependência espacial entre observações adjacentes apenas no espaçamento LT. Já o COT apresentou dependência espacial nos espaçamentos LS e LD.

Quanto a faixa de dependência espacial, a Ds apresentou dependência de 1 lag para os espaçamentos LS e LT e de 2 lag's para o espaçamento LD. Oliveira et al. (2013) aplicaram o modelo de espaço de estados para propriedades do solo e produtividade da soja em um Latossolo e observaram através do autocorrelograma uma dependência espacial da Ds de 3 m. A RP no espaçamento LT apresentou apenas 1 lag de dependência espacial. Souza et al. (2004b) estudando a variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo sob cultivo de cana-de-açúcar com mais de 30 anos observou dependência espacial de 24 e 20 m para os atributos RP e Ds, respectivamente. Os autores avaliaram a estrutura de dependência espacial dessas variáveis utilizando como ferramenta o semivariograma e consideraram o tamanho do lag de 10 m nas direções x e y. Os valores das observações de CAD nos espaçamentos LD e LT foram dependentes espacialmente até o terceiro lag e no espaçamento LS até o sétimo lag, apresentando dependência espacial. O COT apresentou dependência espacial de 3 e 2 lag's para os espaçamentos LS e LD, respectivamente. Timm et al. (2004) utilizando a abordagem de espaço de estados para avaliar a relação entre propriedade físicas e químicas do solo, encontraram uma dependência espacial com o autocorrelograma de 10 m para a variável COT. Devido a presença de dependência espacial de pelo menos 1 lag, as variáveis Ds e CAD nos três espaçamentos, o COT nos espaçamentos LS e LD e a RP no espaçamento LT podem ser analisadas pela função de crosscorrelação para verificar as relações espaciais com as variáveis preditas.

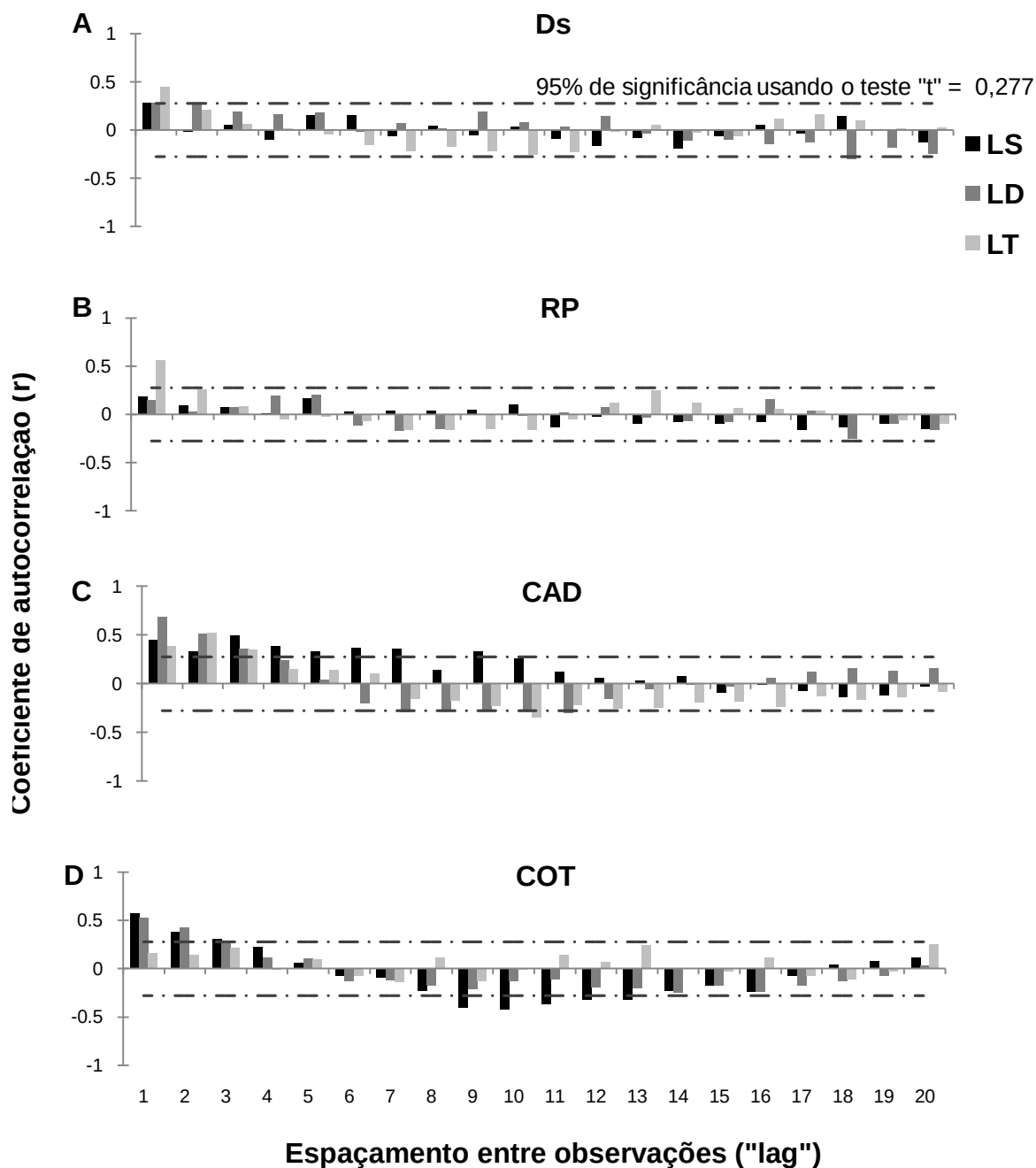


Figura 17 – Autocorrelogramas amostrais da densidade do solo (Ds - A), resistência à penetração (RP - B), capacidade de água disponível (CAD - C) e carbono orgânico total (COT - D) nos três espaçamentos (Linha simples – LS; Linha Dupla – LD; Linha tripla - LT).

A tab. 5 apresenta um resumo das variáveis que obtiveram dependência espacial e a faixa de dependência apresentada através da análise de autocorrelação espacial ao nível de significância de 5% pelo teste t (Intervalo de confiança = 0,277).

Tabela 5 – Resumo da análise de autocorrelação das variáveis de solo e de planta nos três espaçamentos (LS, LD e LT).

Variável ¹	Dependência espacial ²		
	LS ³	LD ³	LT ³
----- Atributos da planta -----			
NCM	SD	1 lag	SD
MC	1 lag	7 lag	1 lag
DC	SD	SD	SD
HC	SD	SD	SD
°BRIX	1 lag	1 lag	1 lag
----- Atributos do solo -----			
Ds	1 lag	2 lag	1 lag
RP	SD	SD	1 lag
CAD	7 lag	3 lag	3 lag
COT	3 lag	2 lag	SD
Pt	1 lag	2 lag	1 lag
Ma	SD	SD	1 lag
Mi	SD	SD	1 lag
θ_{CC}	SD	SD	1 lag
θ_{PMP}	1 lag	4 lag	1 lag
Argila	8 lag	5 lag	8 lag
Areia	4 lag	5 lag	7 lag
Silte	SD	1 lag	3 lag
AN	1 lag	1 lag	SD
Dp	SD	SD	1 lag

¹ Variáveis: NCM: número de colmos por metro; MC: massa individual do colmo; DC: diâmetro do colmo; HC: altura do colmo; °Brix: sólidos solúveis totais; Ds: densidade do solo; RP: resistência à penetração; CAD: capacidade de água disponível; COT: carbono orgânico total; Pt: porosidade total; Ma: macroporosidade; Mi: microporosidade; θ_{CC} : umidade à base de volume na capacidade de campo; θ_{PMP} : umidade à base de volume no ponto de murcha permanente; Argila: argila; Areia: areia; Silte: silte; AN: argila naturalmente dispersa; e Dp: densidade de partículas.

² SD: Sem dependência espacial; lag: 1 m; Dependência espacial ao nível de 5% de significância pelo teste t.

³ Espaçamentos entre linhas: LS: Espaçamento simples; LD: Espaçamentos combinado duplo; e LT: Espaçamento combinado triplo.

Nota-se que as variáveis MC, °BRIX, Ds, CAD, Pt, θ_{PMP} , argila e areia apresentaram dependência espacial de pelo menos 1 lag nos três espaçamentos entre linhas (LS, LD e LT) ao nível de 5% de significância. Já as variáveis DC e HC, não apresentaram dependência espacial, sendo as observações adjacentes independentes no intervalo de no mínimo 1 m. As variáveis RP, Ma, Mi, θ_{CC} e Dp obtiveram dependência espacial apenas no espaçamento LT e as variáveis COT e AN somente nos espaçamentos LS e LD. A variável silte apresentou dependência espacial nos espaçamentos LD e LT. Portanto, as variáveis que apresentaram dependência espacial de no mínimo 1 lag em cada espaçamento entre linhas podem ser submetidas a análise de crosscorrelação.

5.3 Análise de crosscorrelação amostral

A análise de crosscorrelação foi realizada para verificar a estrutura de correlação espacial entre as séries de dados que compõem esse estudo, sendo a dependência cruzada um requisito para a avaliação das variáveis por meio da abordagem de espaço de estados. Os coeficientes de crosscorrelação foram obtidos pelo cálculo da equação 5. Os valores dos coeficientes de crosscorrelação no primeiro lag (1 e -1) acima e abaixo do limite do IC para ambas as direções (positiva e negativa) indicam a correlação espacial entre as variáveis ao nível de 5% de significância pelo teste t.

Foram escolhidos os atributos MC e o °BRIX como variáveis preditas para os modelos autorregressivos de espaço de estados em cada um dos espaçamentos entre linhas. O °Brix é um dos parâmetros tecnológicos que define a qualidade da matéria-prima, quanto mais rica em açúcares for a planta melhor a qualidade industrial e mais o produtor recebe, pois a indústria paga por quantidade de açúcares recebido em cada tonelada de cana (CONSECANA, 2006). Assim, estudar as relações dessa variável com algumas variáveis de solo pode apresentar algumas informações interessantes para a melhor gestão da lavoura e também para obter melhores rendimentos da lavoura. A MC é um parâmetro que engloba vários outros componentes de produção da cana-de-açúcar e resume isto pela sua medida. O colmo é a parte mais importante da planta, constitui o fruto agrícola da mesma e nele se encontra armazenado o açúcar, sendo a avaliação da sua massa um indicador direto de produtividade.

5.3.1 Análise de crosscorrelação amostral entre massa do colmo (MC) e variáveis com autocorrelação espacial nos três espaçamentos

As Fig. 18 e 19 apresentam os crosscorrelogramas da variável MC em relação às variáveis de solo que apresentaram autocorrelação espacial no espaçamento LS. Nota-se que não houve crosscorrelação entre MC com nenhuma variável preditora no espaçamento LS, sendo os crosscorrelogramas entre a variável MC e as variáveis Pt, CAD, °Brix, Ds, COT, argila, areia, AN e θ_{PMP} apresentados nas Fig. 18 e 19. Assim, a MC não pode ser avaliada por meio da abordagem de espaço de estado no espaçamento LS.

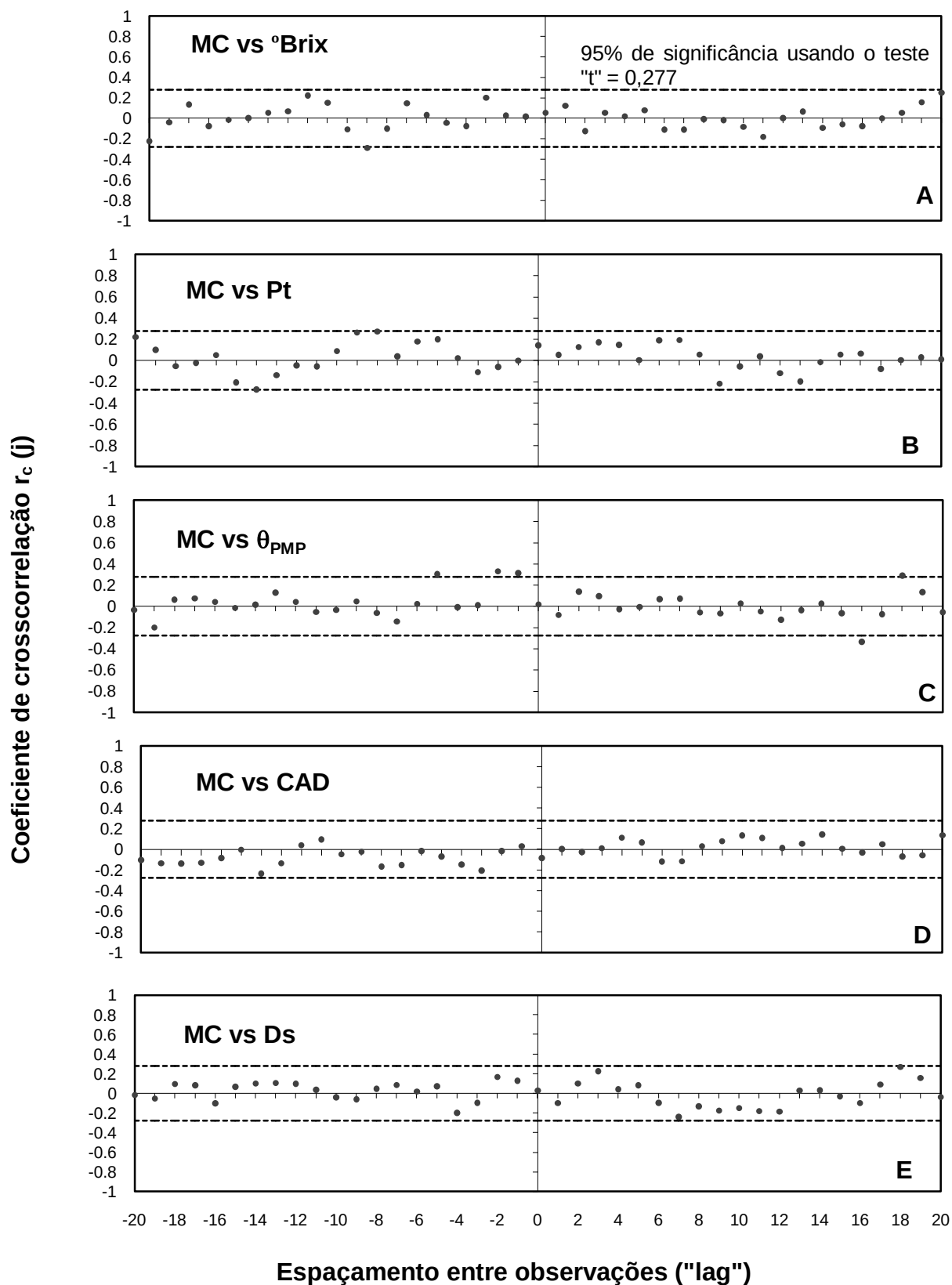


Figura 18 – Crosscorrelogramas amostrais entre massa do colmo e °Brix (A), porosidade total (B), ponto de murcha permanente (C), capacidade de água disponível (D) e densidade do solo (E) no espaçamento simples.

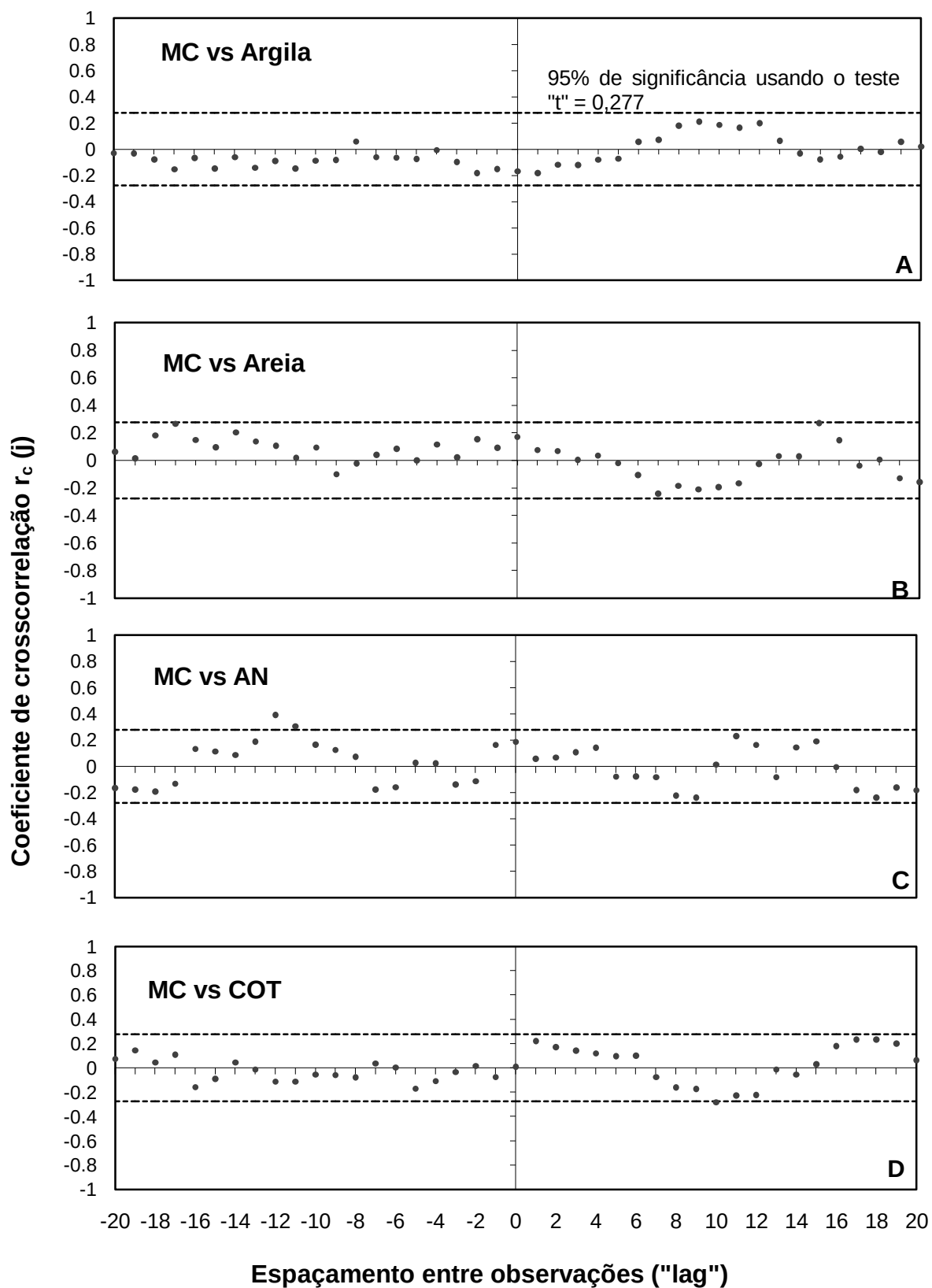


Figura 19 – Crosscorrelogramas amostrais entre massa do colmo e argila (A), areia (B), argila naturalmente dispersa (C), carbono orgânico total (D) no espaçamento simples.

Quanto a análise de crosscorrelação da variável MC em relação às variáveis que apresentaram autocorrelação espacial no espaçamento LD, observa-se nas Fig. 20, 21 e 22 que houve dependência cruzada entre a MC e as variáveis argila, areia, Pt e CAD. Não houve dependência cruzada significativa entre a MC e as variáveis AN, Ds, θ_{PMP} , °Brix, NCM, COT e silte. A crosscorrelação entre MC e as variáveis argila, areia, Pt e CAD apresentaram uma dependência espacial cruzada de 1, 2, 3 e 1 lags, respectivamente, como observado pelos crosscorrelogramas das Fig. 20, 21 e 22 onde os valores dos coeficientes de crosscorrelação foram superiores ao IC de 0,277 e considerou-se a direção da crosscorrelação em que houve o menor número de lag's. Assim, a variável MC no espaçamento LD pode ser estimada utilizando no modelo as variáveis argila, areia, Pt e CAD. No entanto, devido a colinearidade entre a argila e a areia, foram confeccionados dois modelos para estimativa de PC no espaçamento LD. O primeiro foi composto pelas variáveis, argila, Pt e CAD e o segundo composto pelas variáveis areia, Pt e CAD.

Observa-se nas Fig. 23, 24 e 25 a crosscorrelação entre a variável MC com as variáveis que apresentaram autocorrelação espacial no espaçamento LT. Nota-se que houve dependência cruzada significativa apenas entre a MC e a variável Ma, de 1 lag, podendo ser observado pelo crosscorrelograma da Fig. 24. Assim, a variável MC no espaçamento LD pode ser estimada utilizando no modelo autorregressivo de espaço de estados a variável Ma como preditora.

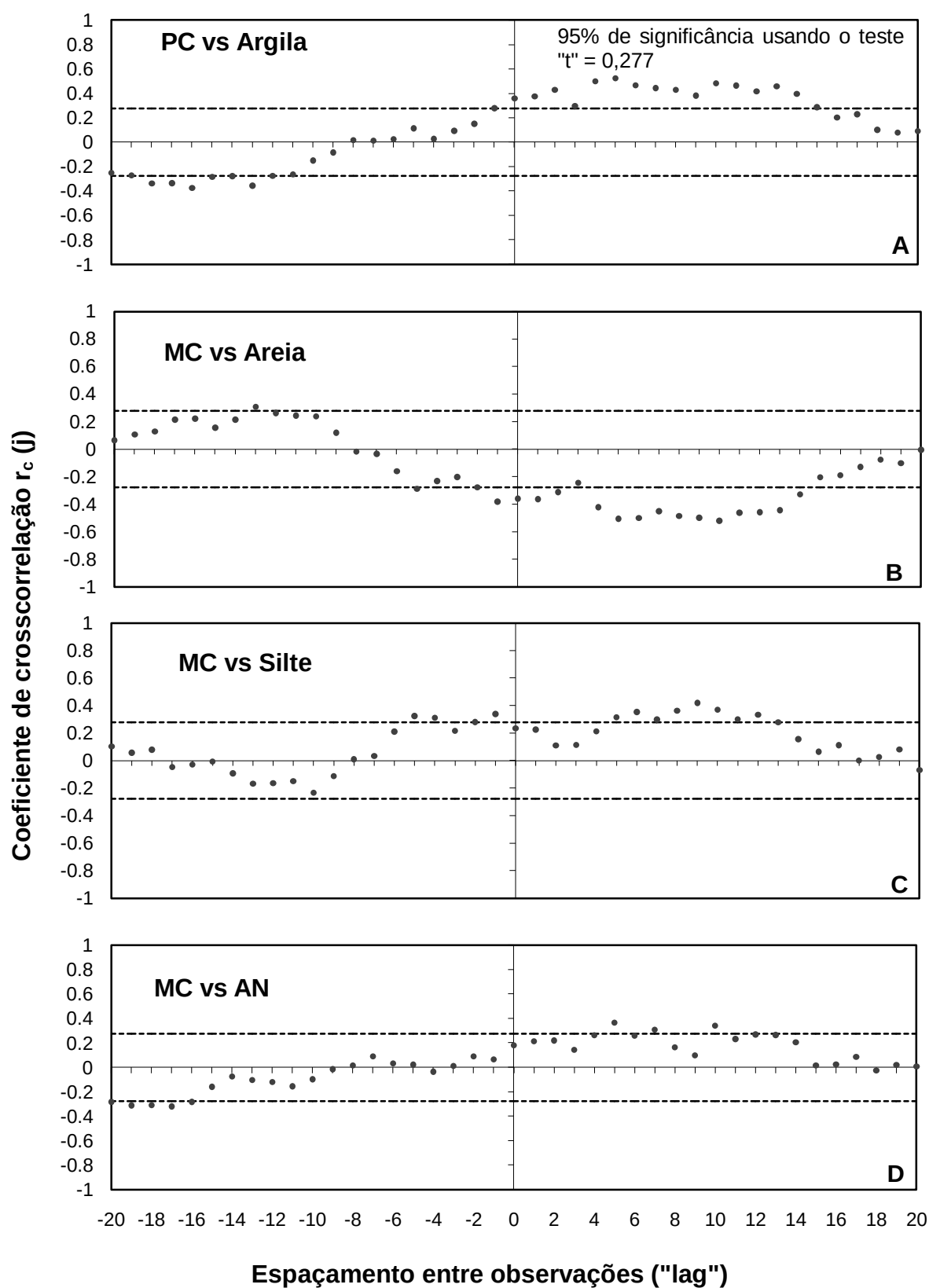


Figura 20 – Crosscorrelogramas amostrais entre massa do colmo e argila (A), areia (B), silte (C) e argila naturalmente dispersa (D) no espaçamento combinado duplo.

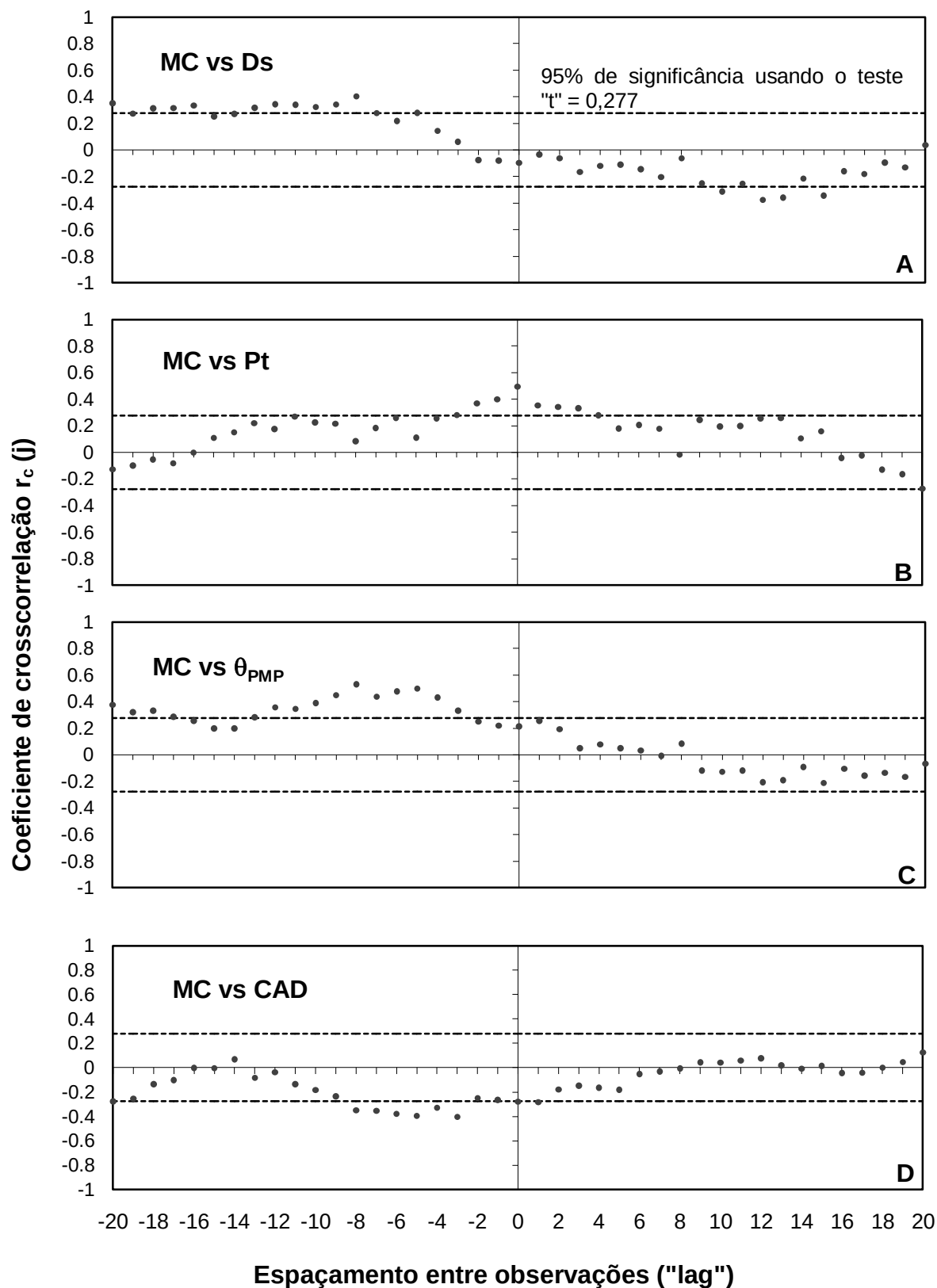


Figura 21 – Crosscorrelogramas amostrais entre massa do colmo e densidade do solo (A), porosidade total (B), umidade do solo no ponto de murcha permanente (C) e capacidade de água disponível (D) no espaçamento combinado duplo.

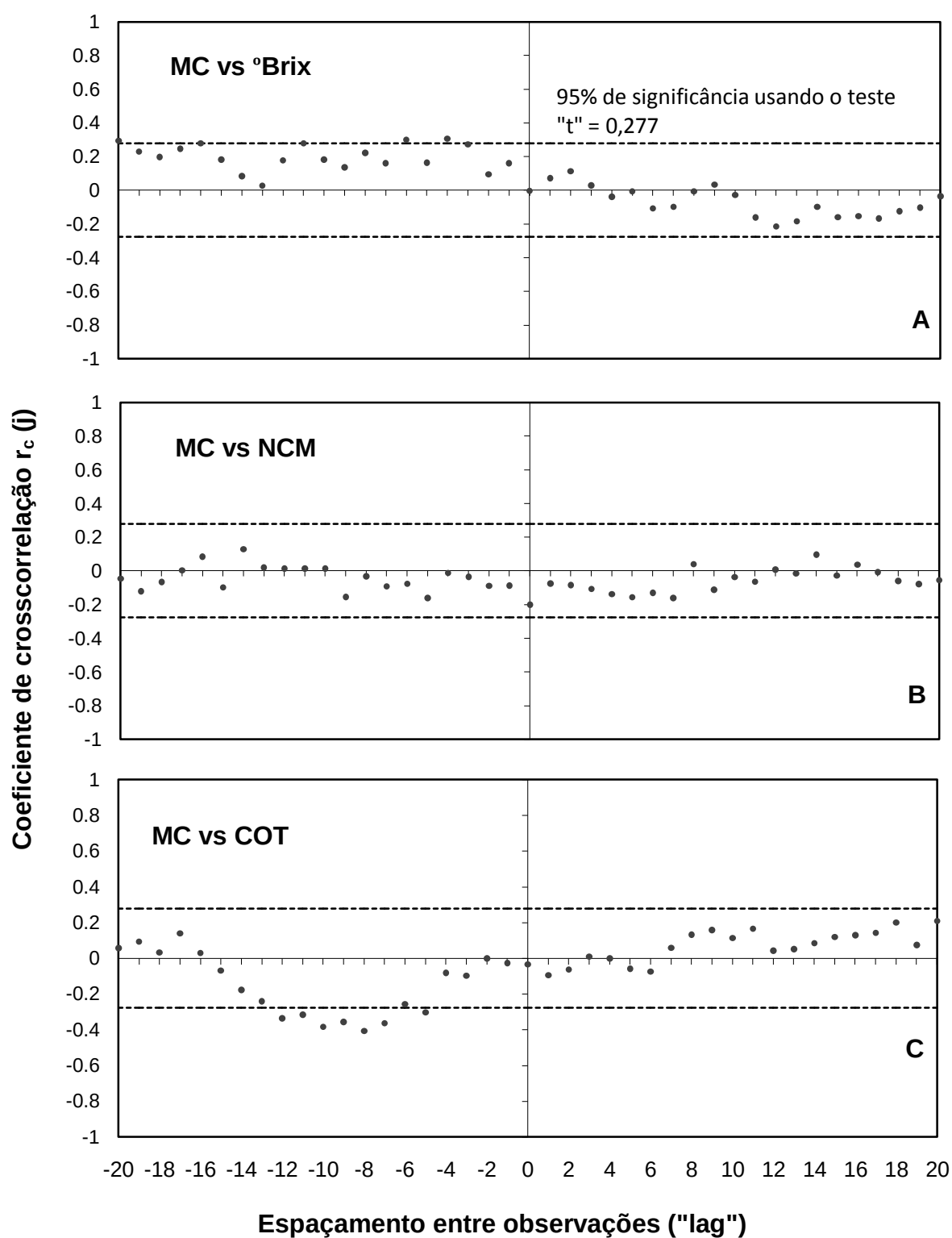


Figura 22 – Crosscorrelogramas amostrais entre massa do colmo e °Brix (A), número de colmos por metro (B) e carbono orgânico total (C) no espaçamento combinado duplo.

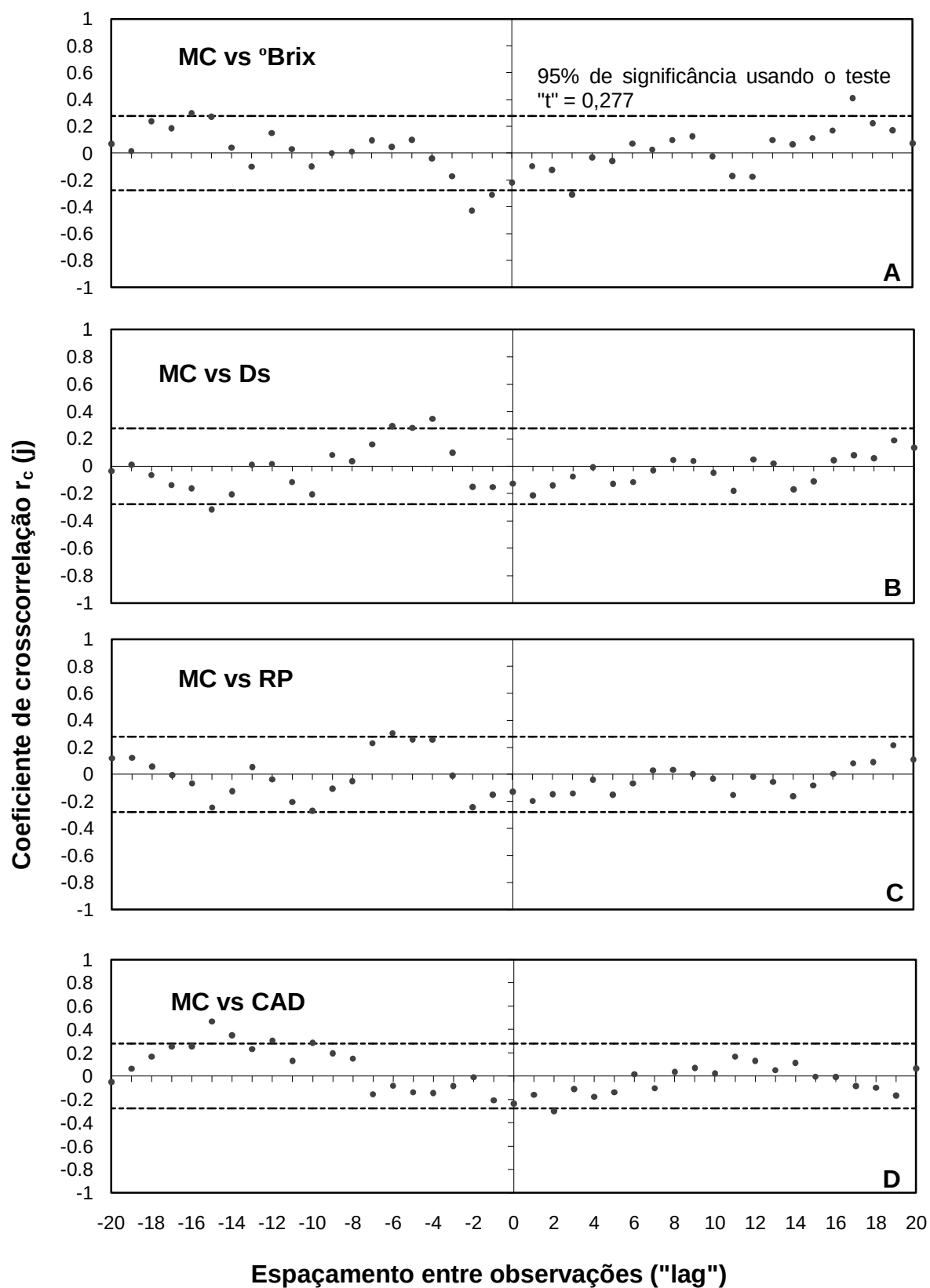


Figura 23 – Crosscorrelogramas amostrais entre massa do colmo e °Brix (A), densidade do solo (B), resistência à penetração (C) capacidade de água disponível (D) no espaçamento combinado triplo.

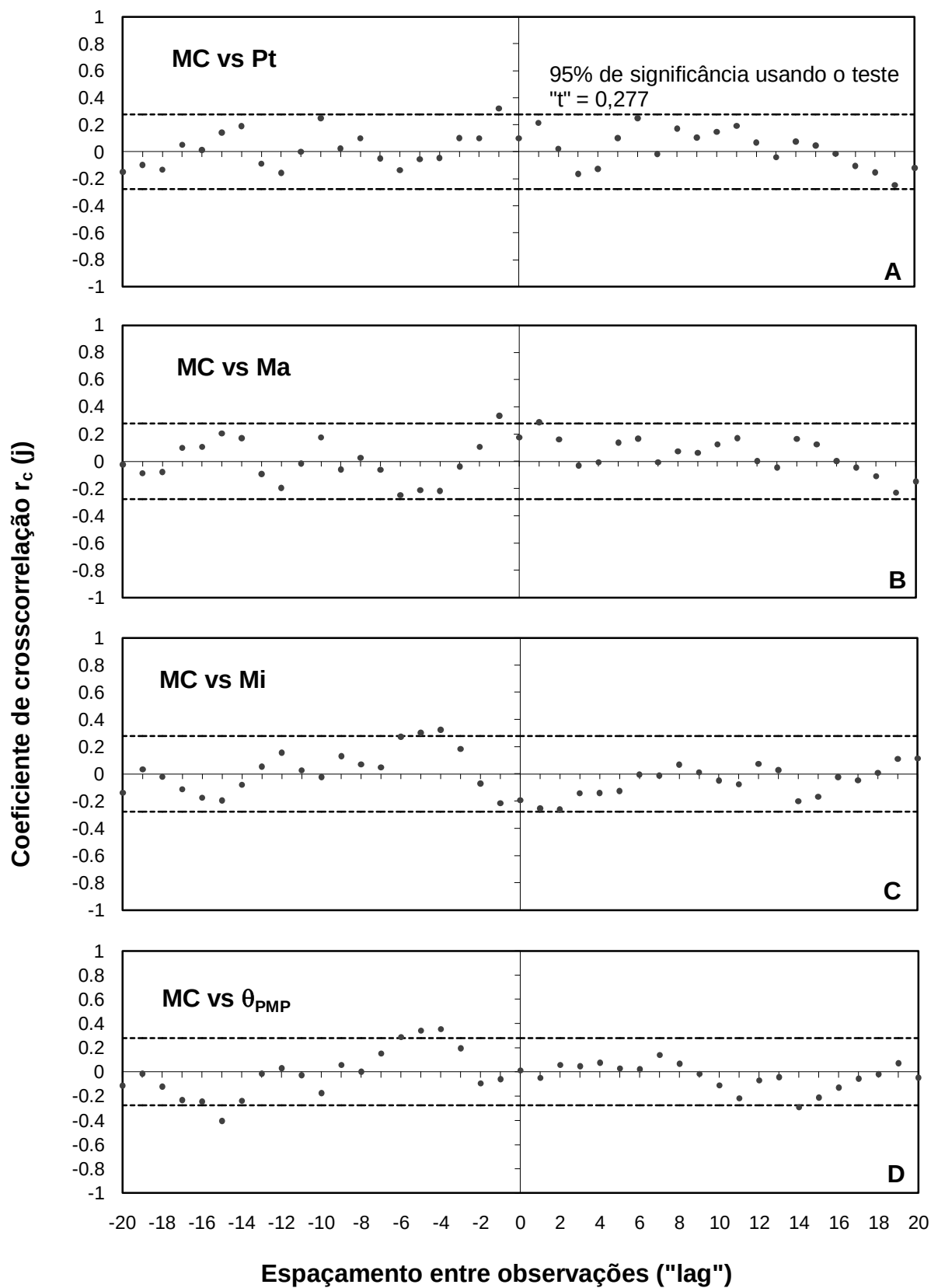


Figura 24 – Crosscorrelogramas amostrais entre massa do colmo e porosidade total (A), macroporosidade (B), microporosidade (C) e umidade no ponto de murcha permanente (D) no espaçamento combinado triplo.

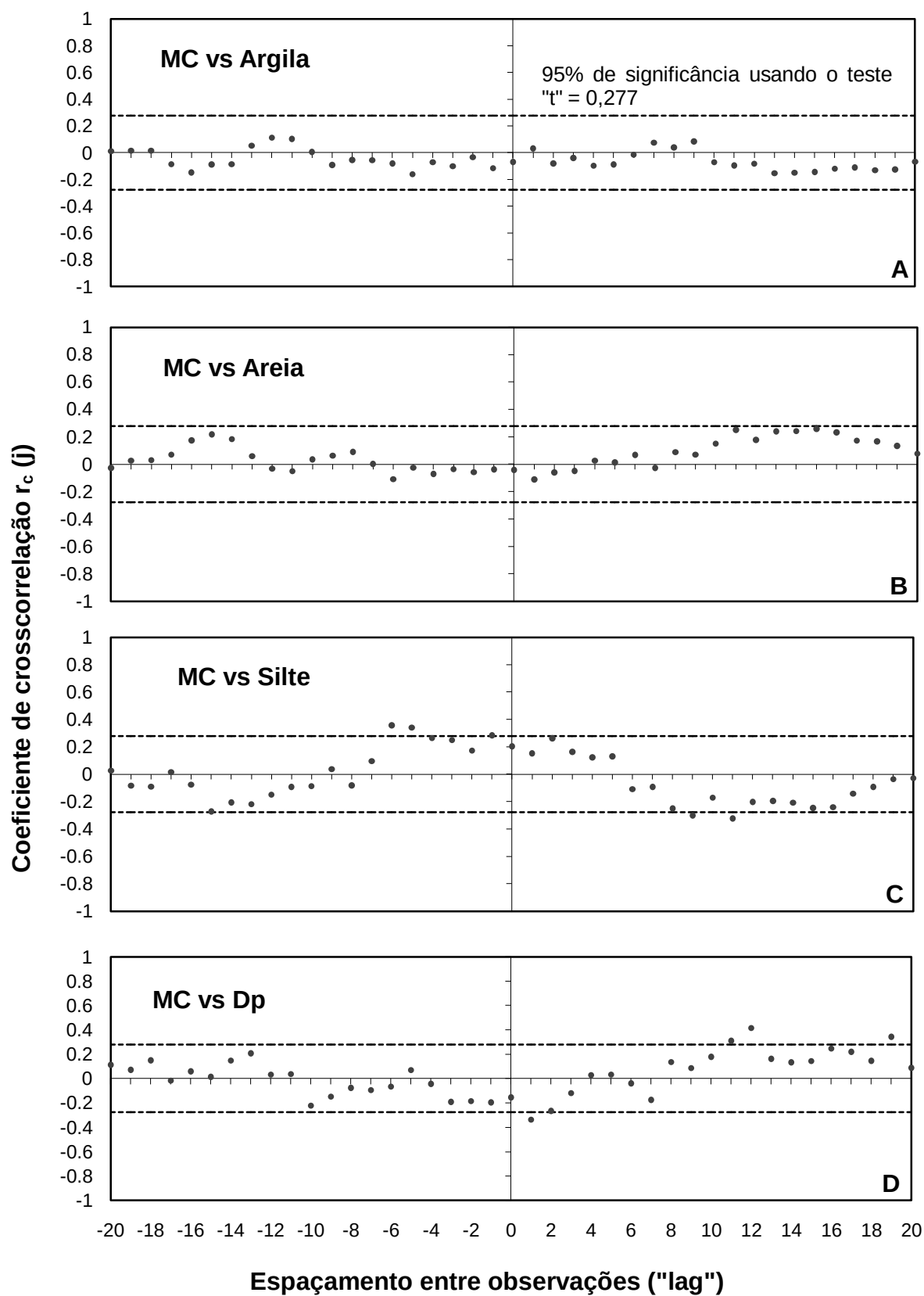


Figura 25 – Crosscorrelogramas amostrais entre massa do colmo e argila (A), areia (B), silte (C) densidade de partículas (D) no espaçamento combinado triplo.

5.3.2 Análise de crosscorrelação amostral entre °Brix e variáveis com dependência espacial nos três espaçamentos

As Fig. 26 e 27 apresentam os crosscorrelogramas da variável °Brix contra as variáveis que apresentaram autocorrelação espacial no espaçamento LS. Nota-se, que não houve crosscorrelação significativa entre a variável °Brix com as variáveis autocorrelacionadas espacialmente (argila, areia, AN, COT MC, Pt, θ_{PMP} , CAD e Ds.). A variável °Brix no espaçamento LS, portanto não pode ser estimada utilizando o modelo autorregressivo de espaço de estados.

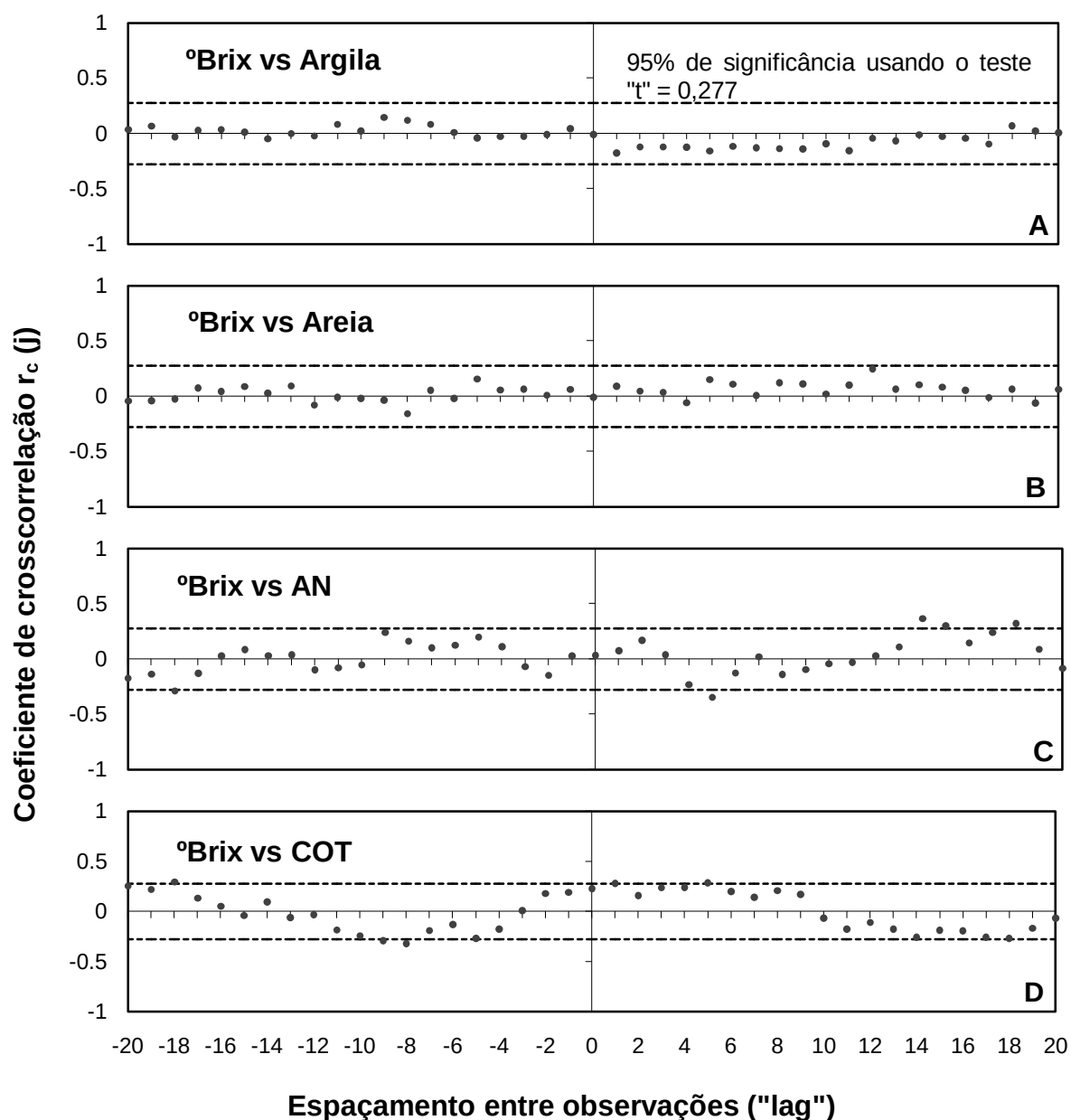


Figura 26 – Crosscorrelogramas amostrais entre °Brix e argila (A), areia (B), argila naturalmente dispersa (C) e carbono orgânico total (D) no espaçamento simples.

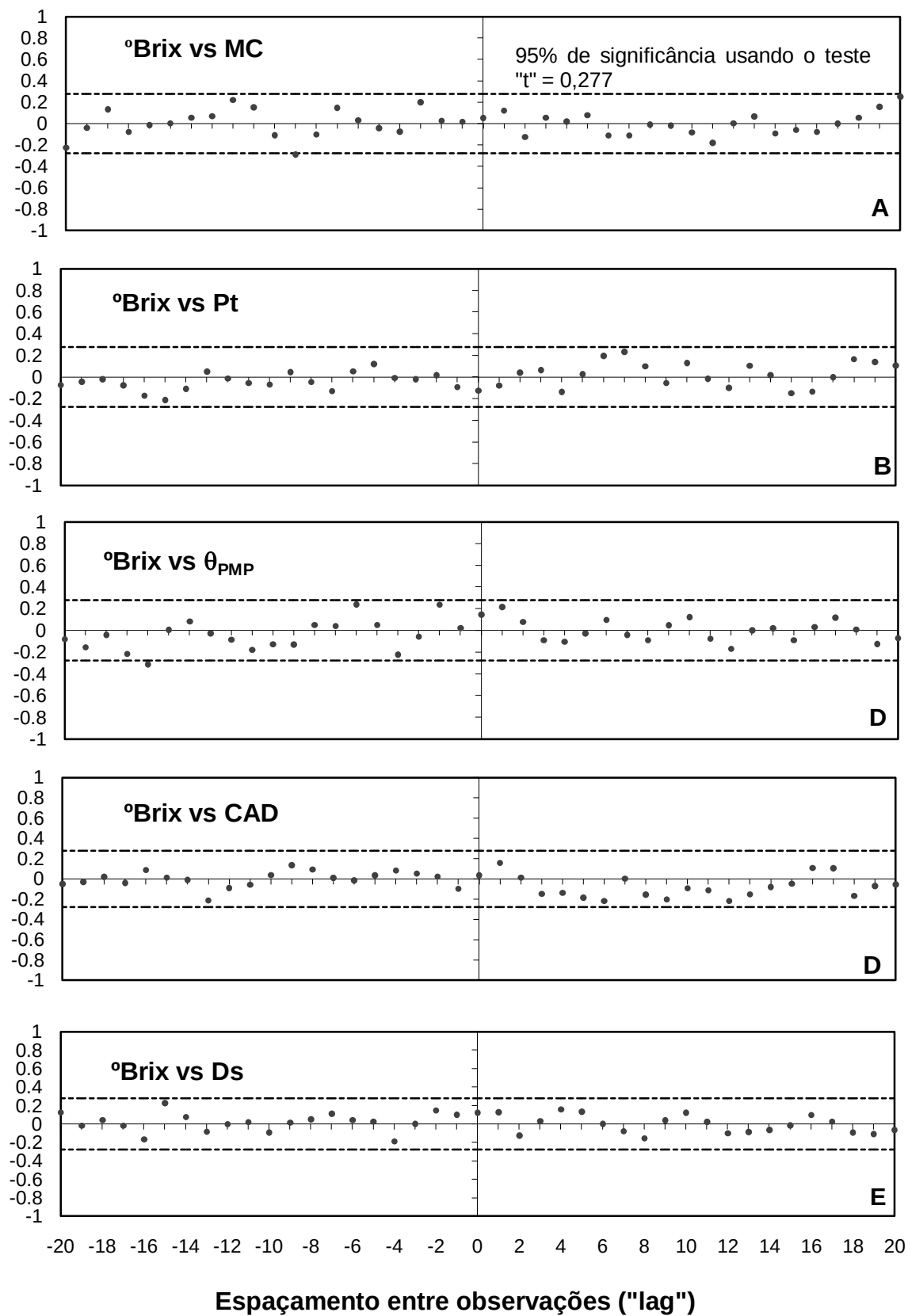


Figura 27 – Crosscorrelogramas amostrais entre °Brix e massa do colmo (A), porosidade total (B), umidade no ponto de murcha permanente (C), capacidade de água disponível (D) e densidade do solo no espaçamento simples.

Com relação a análise de crosscorrelação entre a variável °Brix com as variáveis que apresentaram autocorrelação espacial no espaçamento LD, observar-se nas Fig. 29, 30 e 31 os crosscorrelogramas desta análise. Nota-se que houve dependência cruzada significativa apenas entre °Brix e a variável CAD, de 1 lag, (Fig. 30D) pois foram superiores ao intervalo de confiança de 0,277, no primeiro lag em ambas as direções. Assim, a variável °Brix no espaçamento LD pode ser estimada utilizando no modelo a variável CAD.

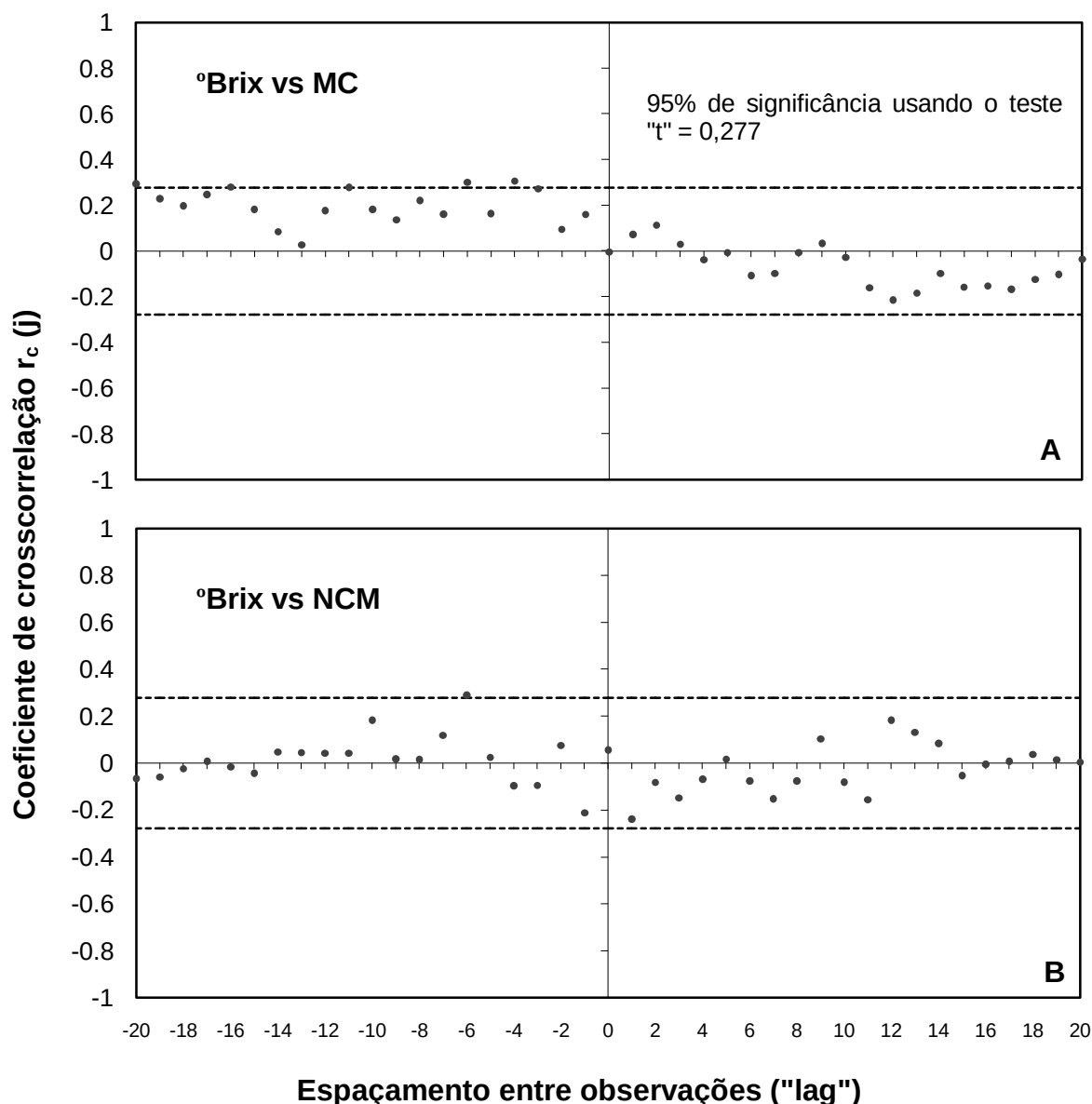


Figura 28 – Crosscorrelogramas amostrais entre °Brix e massa do colmo (A) e entre °Brix e número de colmos por metro (B) no espaçamento combinado duplo.

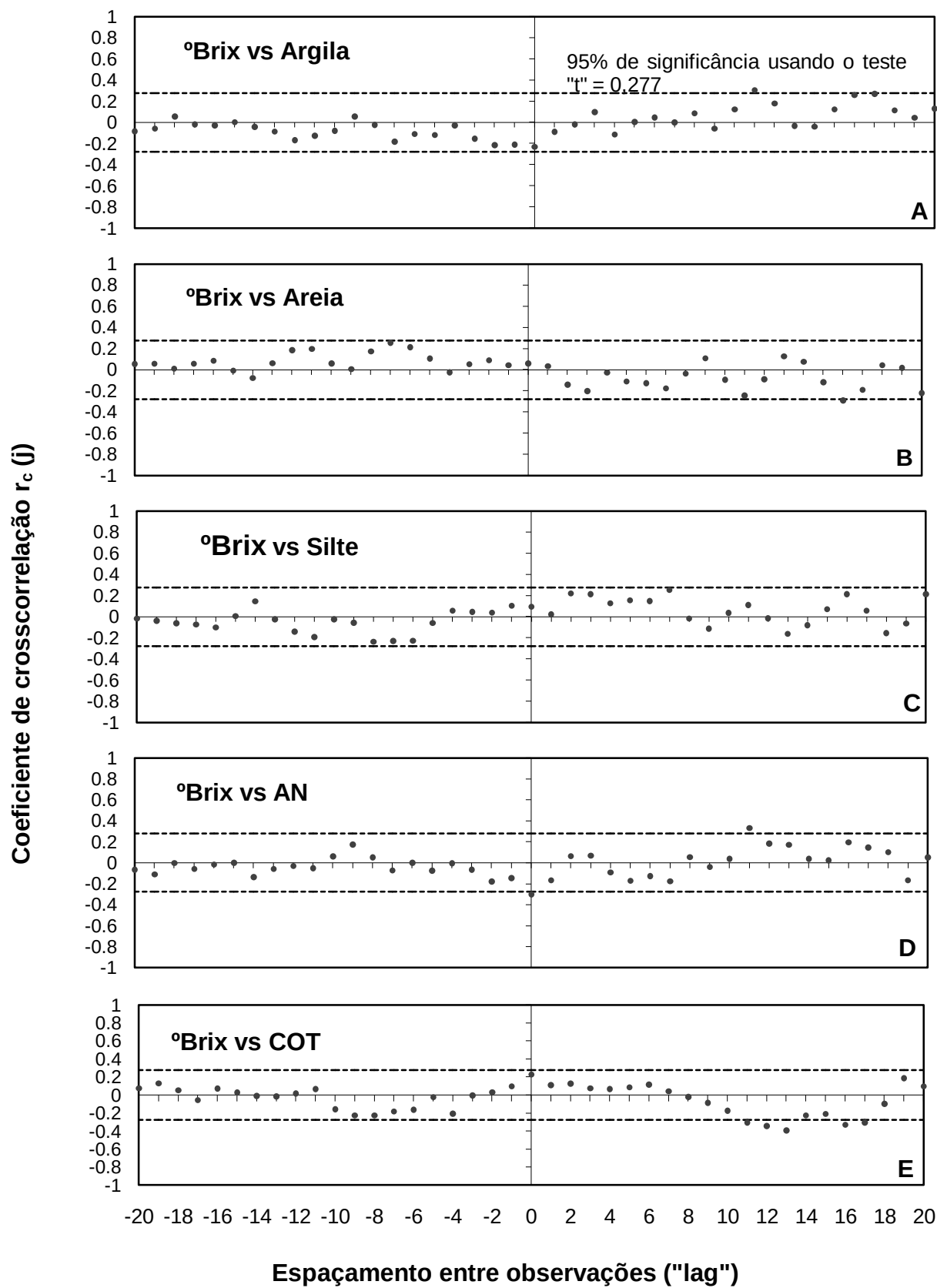


Figura 29 – Crosscorrelogramas amostrais entre °Brix e argila (A), areia (B), silte (C), argila naturalmente dispersa (D) e carbono orgânico total (E) no espaçamento combinado duplo.

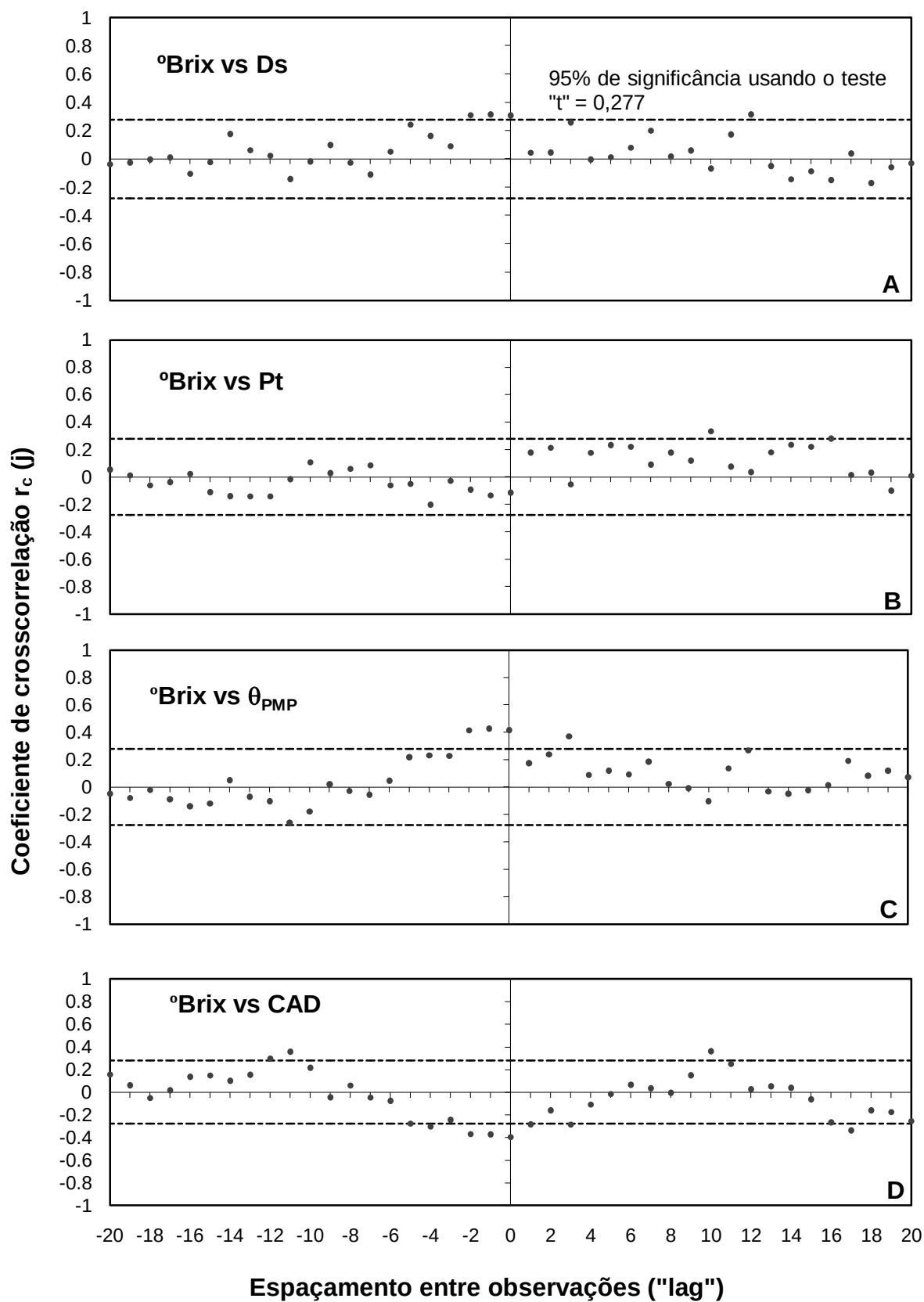


Figura 30 – Crosscorrelogramas amostrais entre °Brix e densidade do solo (A), porosidade total (B), umidade no ponto de murcha permanente (C) e capacidade de água disponível (D) no espaçamento combinado duplo.

Quanto à análise de crosscorrelação da variável °Brix com as variáveis que apresentaram dependência espacial no espaçamento LT (Ds, RP, CAD, Pt, Ma, Mi, θ_{PMP} , argila, areia, silte, Dp e MC), observa-se nas Fig. 31, 32 e 33 que não houve dependência cruzada significativa entre a variável °Brix com nenhuma variável. Assim, a variável °Brix no espaçamento LT não pode ser estimada utilizando o modelo autorregressivo de espaço de estados.

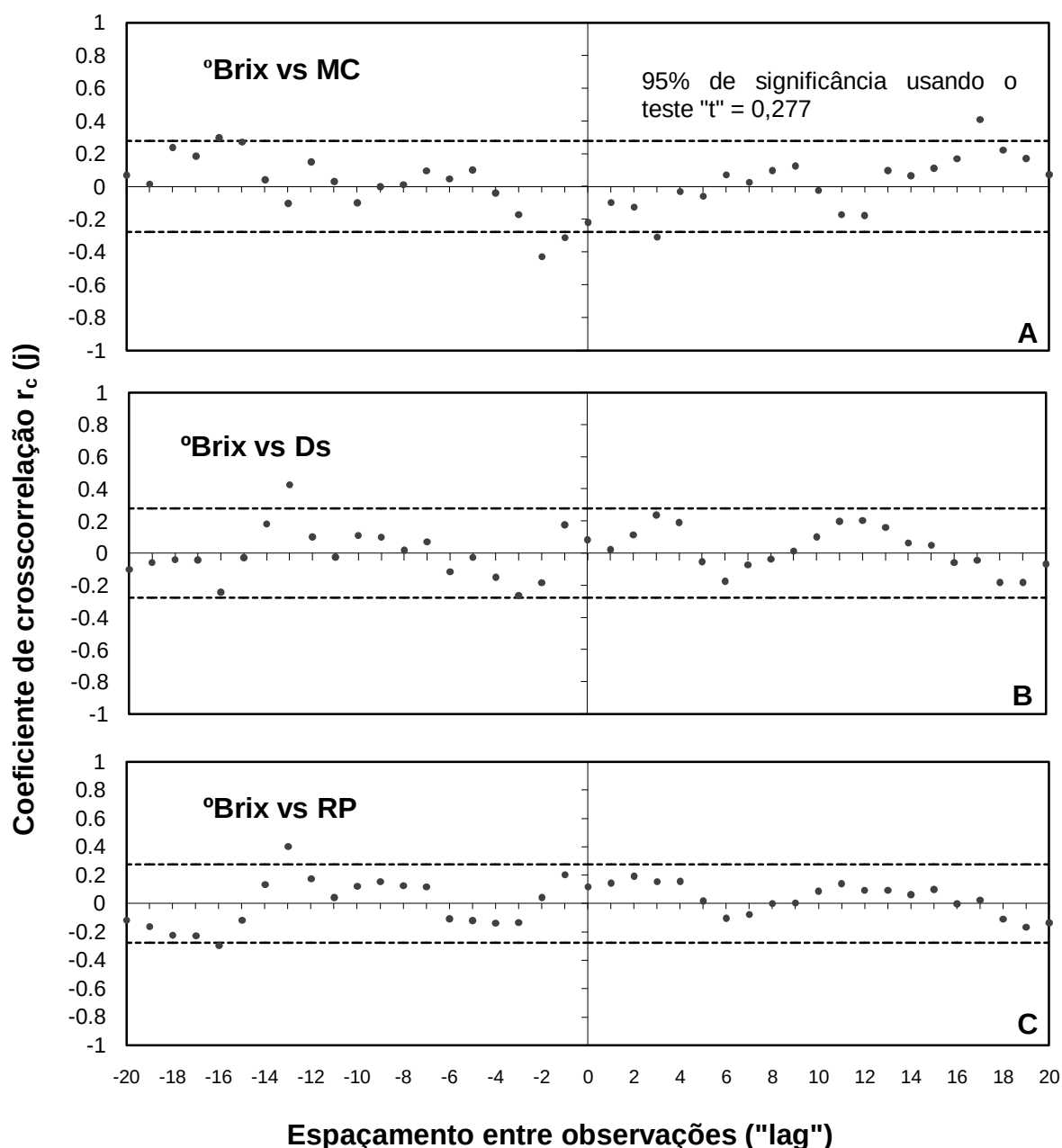


Figura 31 – Crosscorrelogramas amostrais entre °Brix e massa do colmo (A), entre °Brix e densidade do solo (B) e entre °Brix e resistência à penetração (C) no espaçamento combinado triplo.

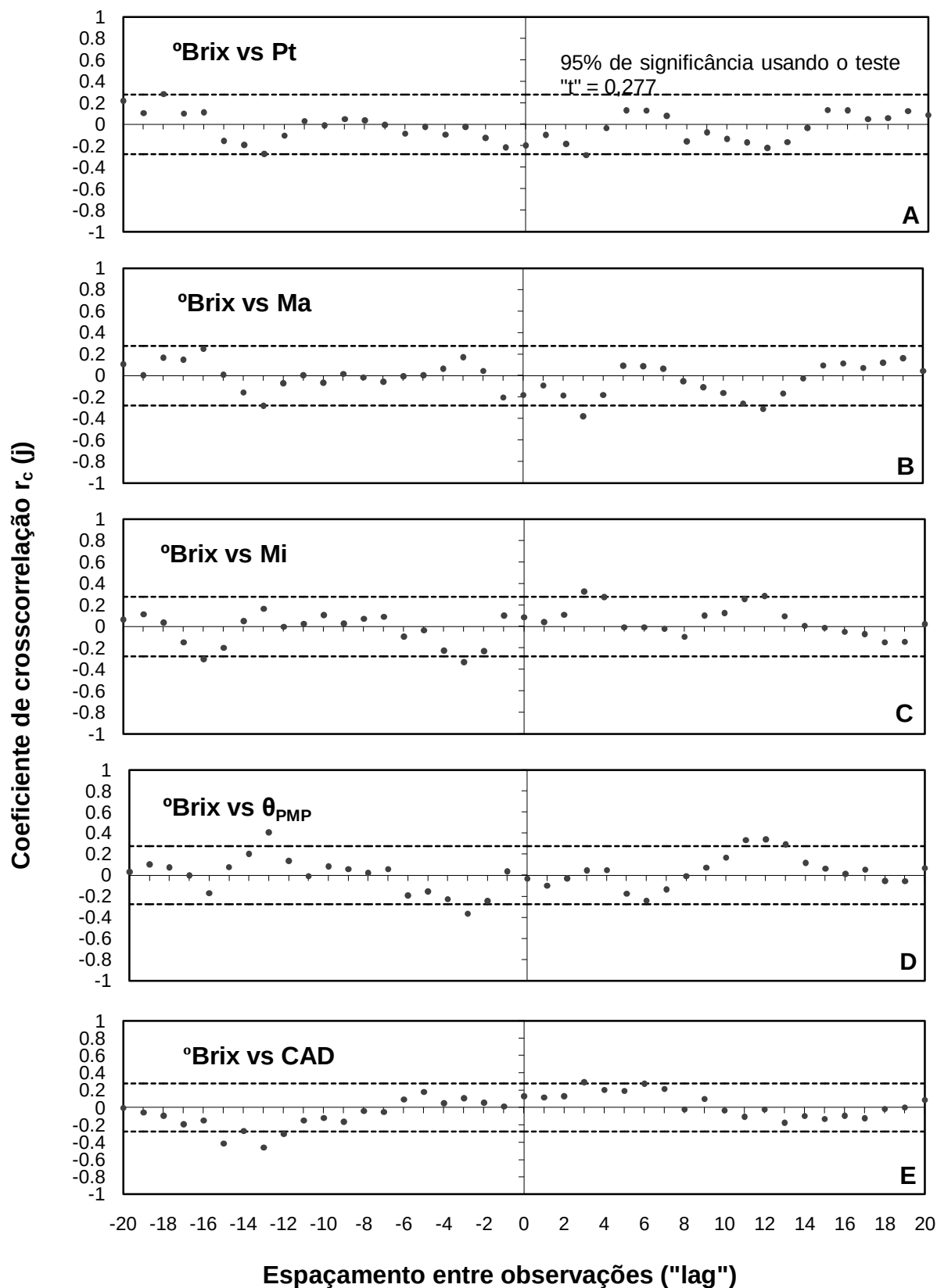


Figura 32 – Crosscorrelogramas amostrais entre °Brix e porosidade total (A), entre °Brix e a macroporosidade (B), entre °Brix e microporosidade (C), entre °Brix e umidade no ponto de murcha permanente (D) e entre °Brix e capacidade de água disponível (E) no espaçamento combinado triplo.

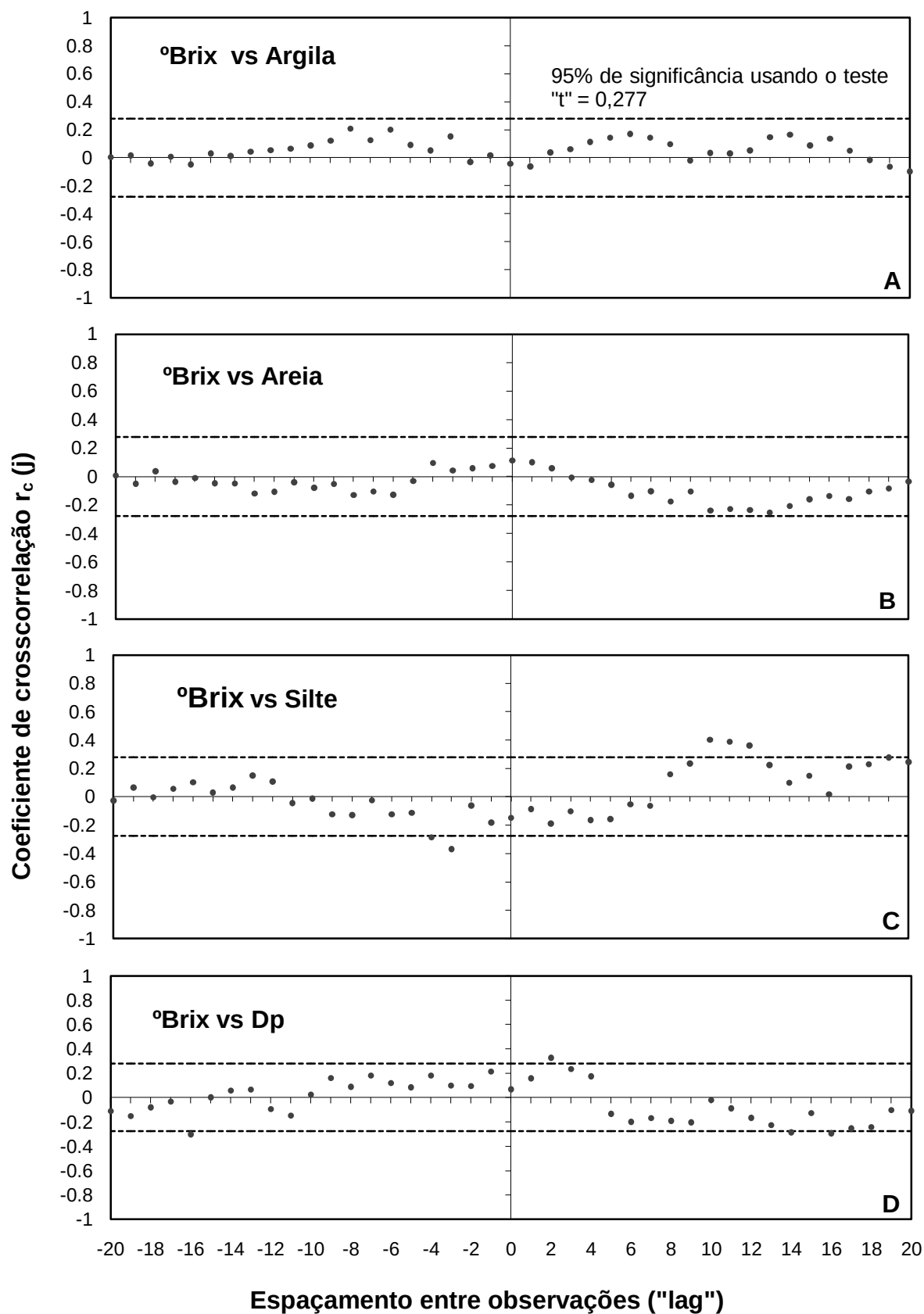


Figura 33 – Crosscorrelogramas amostrais entre °Brix e argila (A), entre °Brix e areia (B), entre °Brix e silte (C) e entre massa do colmo e silte (D) no espaçamento combinado triplo.

5.4 Relação entre massa do colmo e variáveis de planta e de solo nos três tipos de espaçamentos entre linhas da cultura da cana-de-açúcar

5.4.1 Abordagem de espaço de estados

Não houve dependência cruzada entre a massa do colmo e as variáveis de planta e de solo no espaçamento LS, como foi discutido no item 5.3. Um dos requisitos para avaliação das variáveis do sistema solo-planta pela abordagem de espaço de estados é a autocorrelação e crosscorrelação espacial. Como não houve correlação cruzada entre a variável MC e as variáveis que apresentaram dependência espacial, isto possibilita utilizar a análise de regressão linear múltipla, pois os dados são independentes entre si.

No espaçamento LD, houve correlação cruzada entre a variável MC com as variáveis argila, areia, porosidade total (Pt) e capacidade de água disponível (CAD), sendo o modelo de espaço de estados para a estimativa da MC composto por essas co-variáveis. Como a argila e a areia apresentam colinearidade, foram confeccionado dois modelos de espaço de estados para a estimativa da MC. Um dos modelos foi composto pela MC, argila, Pt e CAD e o outro modelo foi confeccionado com a MC, areia, Pt e CAD.

A primeira equação de espaço de estados da variável massa do colmo (MC) no espaçamento LD indica que essa variável medida no ponto $i-1$ contribui com aproximadamente 99% na estimativa do ponto i (Fig. 34). A argila contribui com 13,7 %, enquanto que as variáveis Pt e CAD com 16,3% e 4,95%, respectivamente. Analisando a dispersão dos dados ao longo da transeção (Fig. 34), observa-se os valores estimados, dentro de uma faixa de confiança construída pelo valor estimado no ponto i mais (limite superior) e menos (limite inferior) um desvio padrão calculado para estimativa de cada ponto i , sendo que os valores nessa área são um indicativo da qualidade da estimativa do modelo. Verifica-se a ocorrência de um número relativamente pequeno de valores observados fora dos limites de confiança calculados para cada estimativa, fato este corroborado pelo valor do coeficiente de determinação ($R^2 = 0,79$) entre os valores observados e estimados pela equação de estados (Fig. 35). As Fig. 34 e 35 revelam que as variações espaciais da MC estão significativamente relacionadas com variações de argila, Pt e CAD em toda a transeção medida no espaçamento LD.

$$MC_i = 0,989 * MC_{i-1} + 0,137 * Argila_{i-1} - 0,163 * Pt_{i-1} + 0,0495 * CAD_{i-1} + u_i$$

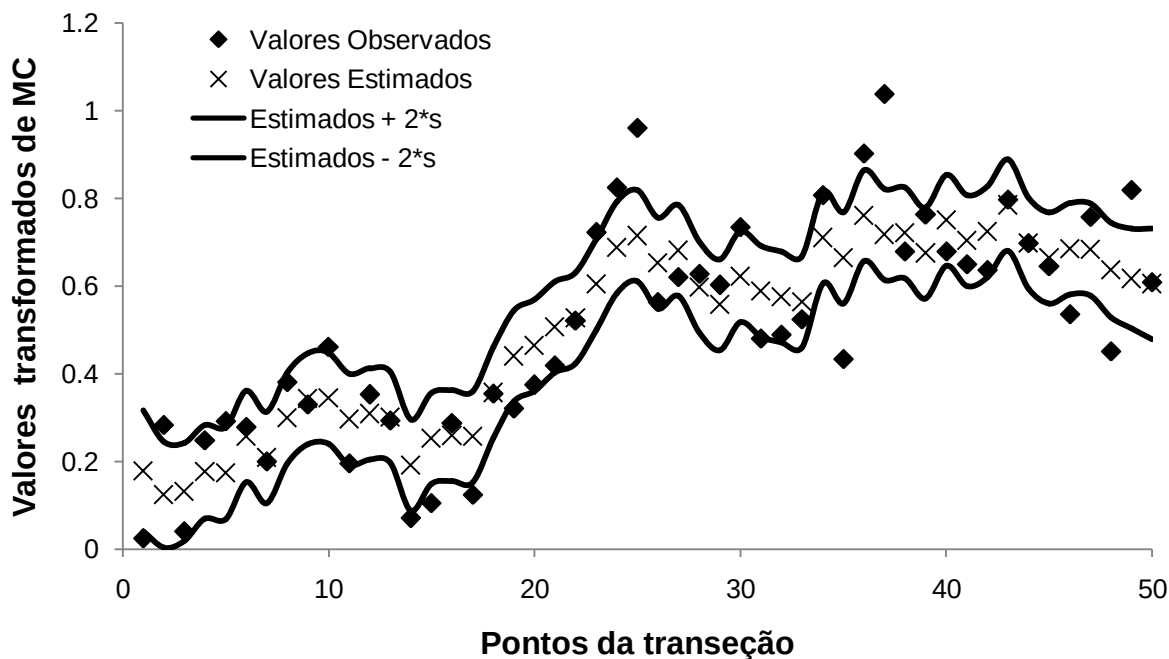


Figura 34 - Análise de espaço de estados aplicada a variável massa do colmo na posição i em função da quantidade de argila, porosidade total e capacidade de água disponível na posição $i-1$, no espaçamento LD.

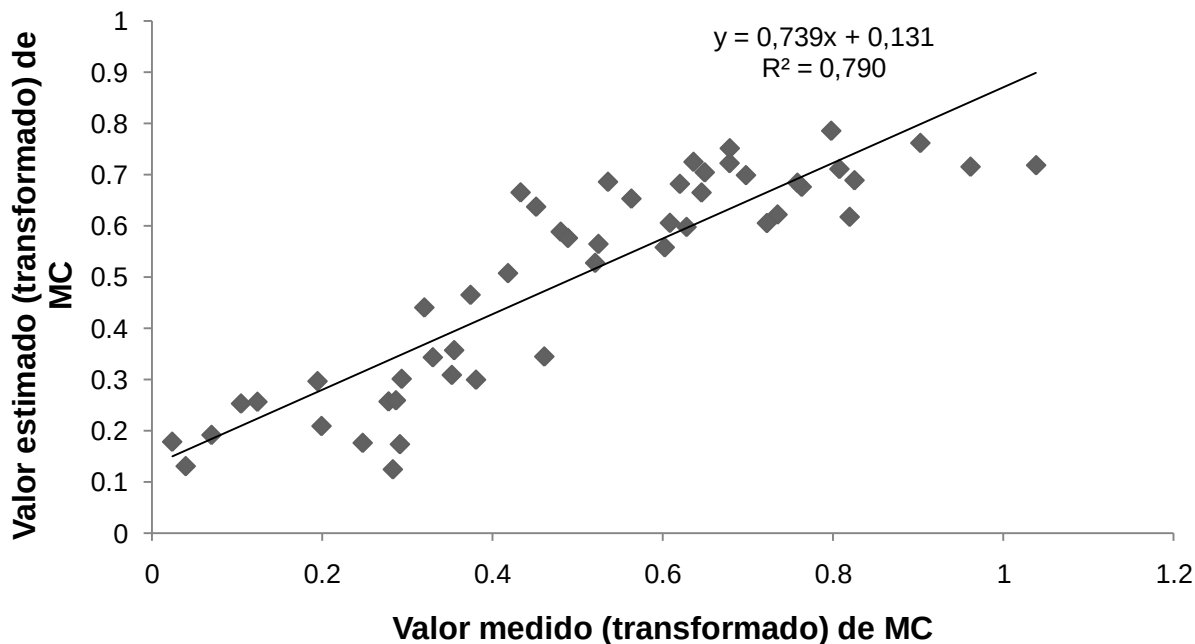


Figura 35 - Regressão linear entre os valores transformados observados e estimados de massa do colmo (MC) para o primeiro modelo de estimativa de MC no espaçamento LD.

A segunda equação de espaço de estados da variável massa do colmo (MC) no espaçamento LD, onde se substituiu a variável argila pela variável areia, nota-se que a variável MC medida no ponto $i-1$ contribui com aproximadamente 115% na

estimativa do ponto i (Fig. 36). A areia contribui com 0,01 %, enquanto que as variáveis Pt e CAD com 24,3% e 9,75%, respectivamente. Com a substituição da argila pela areia, observa-se que a contribuição desta última variável ficou acima de 100%, o que dificulta a interpretação. Nota-se também que a contribuição da variável areia na estimativa da MC no ponto vizinho foi bem inferior a contribuição da variável argila, o que já era de se esperar, pois o solo da área em estudo tem o predomínio da fração argila, sendo essa fração a regente. Com relação a contribuição da MC pelas variáveis Pt e CAD, nota-se nos coeficientes de espaço de estados na equação da Fig 36 que houve um aumento em relação a equação que era composta pela argila, devido a menor contribuição da variável areia que proporcionou uma maior distribuição das contribuições para as outras variáveis que compõe o modelo. Analisando a dispersão dos dados ao longo da transeção, observam-se na Fig. 36 os valores estimados mais e menos o desvio padrão da estimativa em cada posição i representados pelas linhas superior e inferior, cuja área é onde o modelo apresentou bom desempenho. Verifica-se a ocorrência de um número relativamente pequeno de valores observados fora dos limites de confiança calculados para cada estimativa, fato este corroborado pelo valor de mediano a alto do coeficiente de determinação ($R^2 = 0,77$) da regressão entre os valores observados e estimados pela equação de estados (Fig. 37). Nota-se que houve uma redução do coeficiente de determinação da equação de regressão em comparação com o coeficiente obtido pela primeira equação de estimativa da MC no espaçamento LD ($R^2=0,79$), onde se utilizou a variável argila.

No entanto, como houve variáveis que não apresentaram correlação cruzada e que não puderam ser avaliadas por meio da abordagem de espaço de estados, e são importantes para a avaliação da relação entre MC com variáveis de planta e de solo no espaçamento duplo, realizou-se uma análise de regressão múltipla para avaliar essa relação no espaçamento LD que será discutida no próximo item.

A segunda equação de espaço de estados da variável massa do colmo (MC) no espaçamento LD, onde se substituiu a variável argila pela variável areia, nota-se que a variável MC medida no ponto i-1 teve a maior contribuição entre as variáveis preditoras (Fig. 36). A Pt teve a segunda maior contribuição, seguida pela CAD e pela areia, com a menor. A menor contribuição da areia já era de se esperar, pois o solo da área em estudo tem o predomínio da fração argila, sendo essa fração a atuante nos atributos do solo. Com relação a contribuição na estimativa de MC pelas

variáveis Pt e CAD, nota-se que os coeficientes da matriz de estado na equação da Fig 36 aumentaram em relação a equação que era composta pela argila, devido a menor contribuição da variável areia que proporcionou uma maior distribuição das contribuições para as outras variáveis que compõe o modelo. Analisando a dispersão dos dados ao longo da transeção, observa-se que a maioria dos valores estimados ficaram próximos dos valores observados ou ao menos dentro dos limites de confiança calculados para cada estimativa, fato este corroborado do coeficiente de determinação ($R^2 = 0,77$) entre os valores observados e estimados pela equação de estado (Fig. 37). Nota-se que houve uma redução do coeficiente de determinação da equação de regressão em comparação com o coeficiente obtido pela primeira equação de estimativa da MC no espaçamento LD ($R^2=0,79$).

No entanto, como houveram variáveis que não apresentaram correlação cruzada e que não foram avaliadas por meio da abordagem de espaço de estados, e são importantes para a avaliação da relação entre MC com variáveis de planta e de solo no espaçamento duplo, realizou-se uma análise de regressão múltipla para avaliar essa relação no espaçamento LD que será discutida no próximo item.

$$MC_i = 1,156 * MC_{i-1} + 0,000105 * Areia_{i-1} - 0,243 * Pt_{i-1} + 0,0975 * CAD_{i-1} + u_i$$

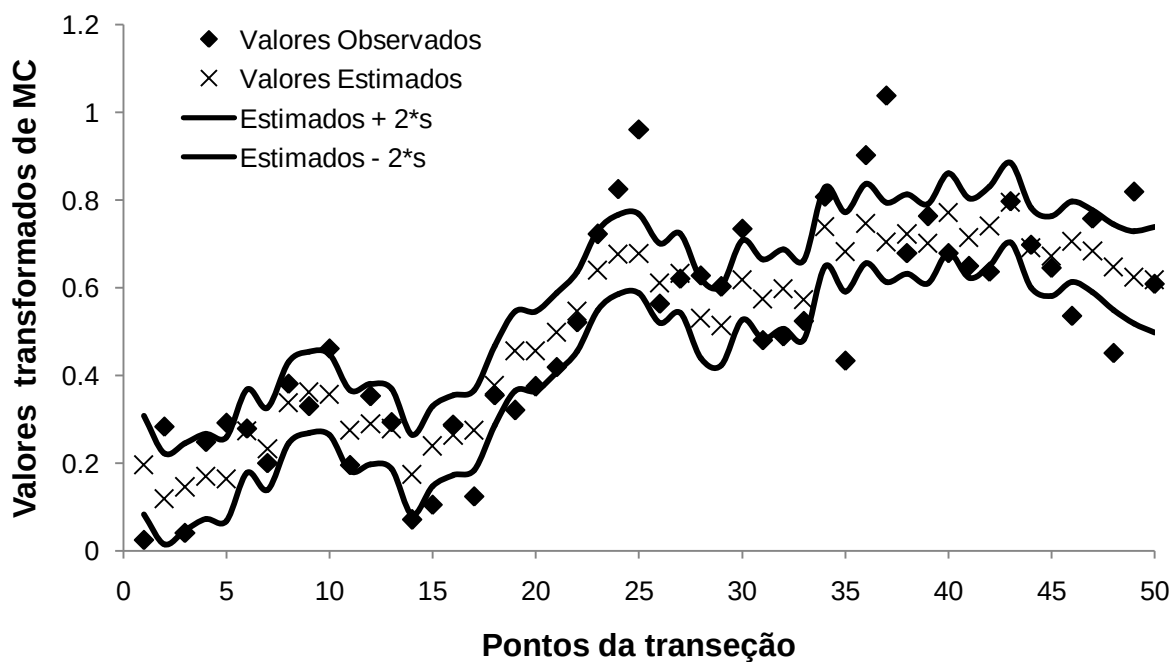


Figura 36 - Análise de espaço de estados aplicada a variável massa do colmo na posição i em função da quantidade de areia, porosidade total e capacidade de água disponível na posição $i-1$, no espaçamento LD.

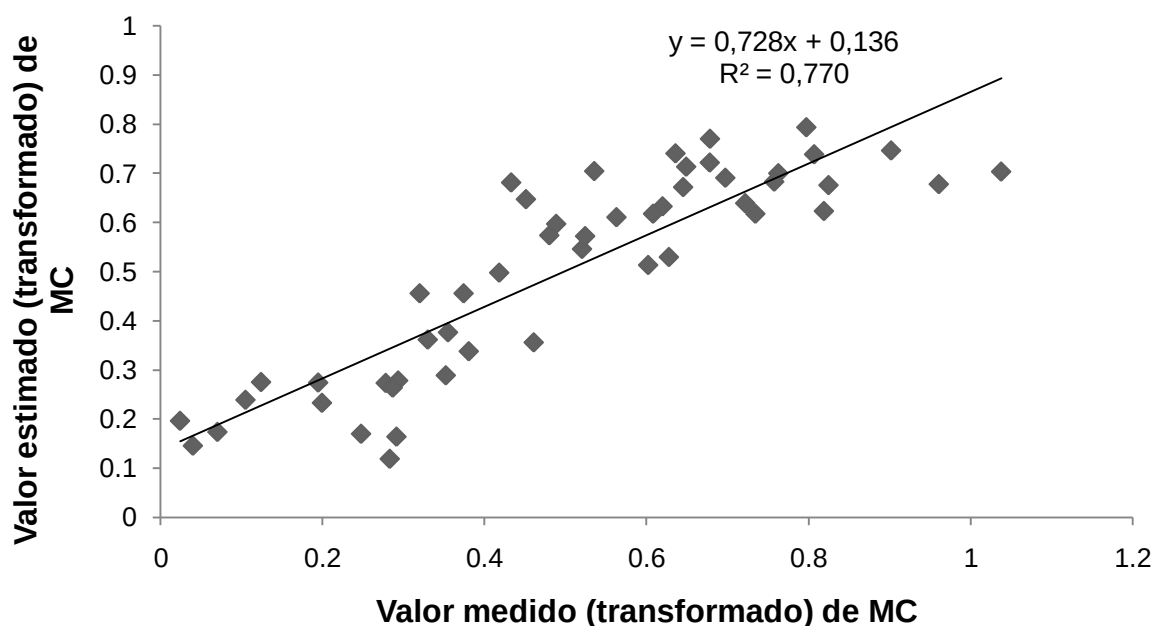


Figura 37 - Regressão linear entre os valores transformados observados e estimados de massa do colmo (MC) para o segundo modelo de estimativa de MC no espaçamento LD.

Nota-se que a MC foi negativamente afetada pela Pt tanto no modelo composto pela MC, areia, Pt e CAD, como no modelo composto pela MC, argila, Pt e CAD. Essa relação negativa da Pt está associada ao comportamento da Ma e Mi nesse espaçamento. Se for observada a equação da análise de regressão múltipla entre a MC e as variáveis de solo (item 5.4.2), é possível notar que a relação entre a MC com a Ma é positiva e com a Mi é negativa neste espaçamento. O comportamento da Pt em relação a MC no espaçamento LD é então devido ao comportamento da Mi que também se relacionou negativamente com a MC. Esta relação negativa até então pode parecer errônea, mas se for considerado que o solo foi revolvido para a implantação do canavial e a coleta foi realizada 5 meses após esse evento, a quantidade de macroporos é maior e a de microporos é menor do que em um solo que não houve revolvimento (STONE; SILVEIRA, 2001; SECCO et al., 2005). Se há um aumento da Mi ao longo da transeção, pode ser devido à alguma modificação na estrutura do solo possivelmente relacionada a um aumento da densidade do solo e aumento da resistência à penetração o que pode vir a causar efeitos negativos na MC, gerando a relação negativa. Em solo compactado, o número de macroporos é reduzido, os microporos e a densidade apresentam-se em maior quantidade (JIMENEZ et al., 2008). Então, se há um aumento da Mi que

ocasionara um aumento na Pt, poderá haver uma redução da MC, em condições de solo revolvido.

Observa-se nas equações das Fig. 34 e 36 que a CAD se relacionou positivamente com a MC, indicando uma influencia deste atributo na produtividade de cana-de-açúcar no espaçamento LD. Essa relação é devido à disponibilidade de água as plantas, quanto maior, menor as limitações por déficit hídrico ao crescimento. Wiedenfeld (2000) observou que a cana submetida ao estresse por déficit hídrico em dois períodos do seu ciclo (257 a 272 e 302 a 347 dias após o plantio) teve redução de 8,3 a 15% no rendimento.

Assim, as Fig. 34, 35, 36 e 37 revelam que as variações espaciais da MC apresentam contribuições importantes das variações de argila, Pt e CAD e menos das variações da areia na transeção amostral estabelecida no espaçamento LD

Quanto à avaliação da massa do colmo por meio da abordagem de espaço de estados no espaçamento LT, observa-se que esta variável foi espacialmente relacionada com a macroporosidade (Ma), como pode ser observado na equação da Fig. 38. Nota-se que a variável MC medida no ponto i-1 contribui com aproximadamente 49% na estimativa do ponto i (Fig. 38). A Ma apresentou uma contribuição de 45,5% para a estimativa da MC no ponto vizinho. Analisando a dispersão dos dados ao longo da transeção, verifica-se que não há a ocorrência de valores observados fora dos limites de confiança calculados para cada estimativa, fato este corroborado pelo valor alto do coeficiente de determinação ($R^2 = 0,92$) da regressão entre os valores observados e estimados pela equação de estado (Fig. 39). As Fig. 38 e 39 revelam que as variações espaciais da MC apresentam variações devido às variações da Ma na transeção estabelecida no espaçamento LT. Percebe-se na Fig. 38 que a Ma foi relacionada positivamente com a MC, isto pode ser explicado, pois conforme Beutler e Centurion (2003) a quantidade de macroporos influencia no crescimento das raízes e na absorção de água e nutrientes. Assim, com o aumento da Ma há o favorecimento desses processos, ocasionando uma influencia positiva na MC.

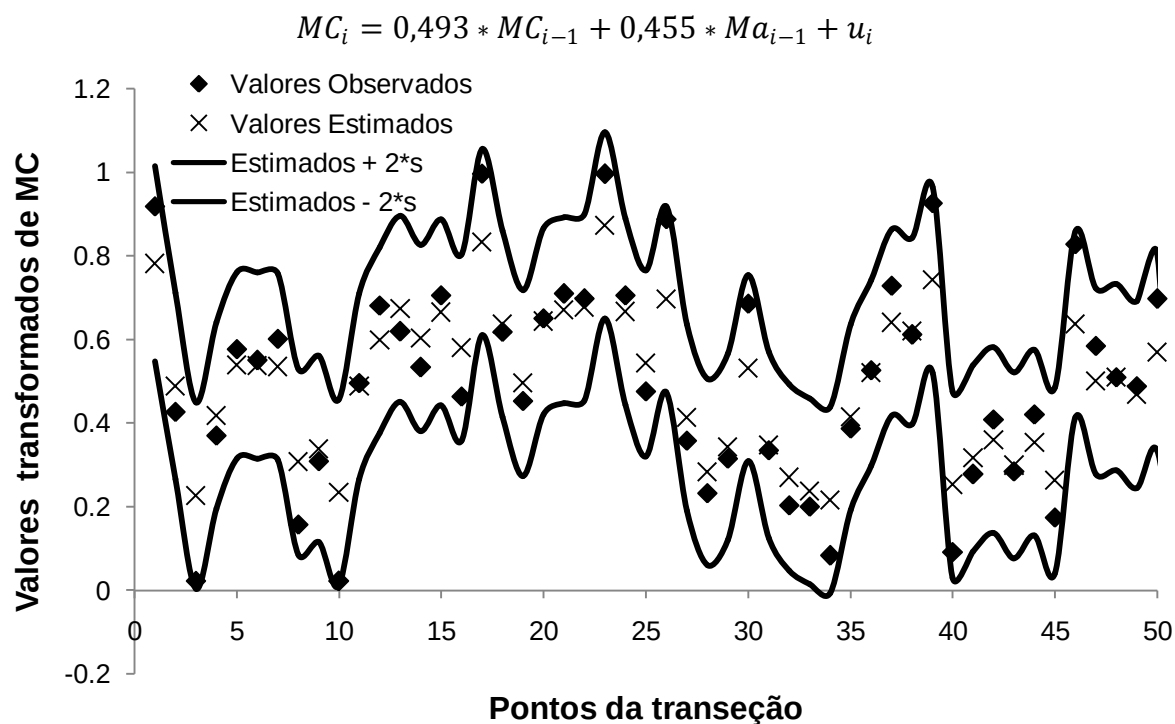


Figura 38 - Análise de espaço de estados aplicada a variável massa do colmo na posição i em função da macroporosidade na posição $i-1$, no espaçamento LT.

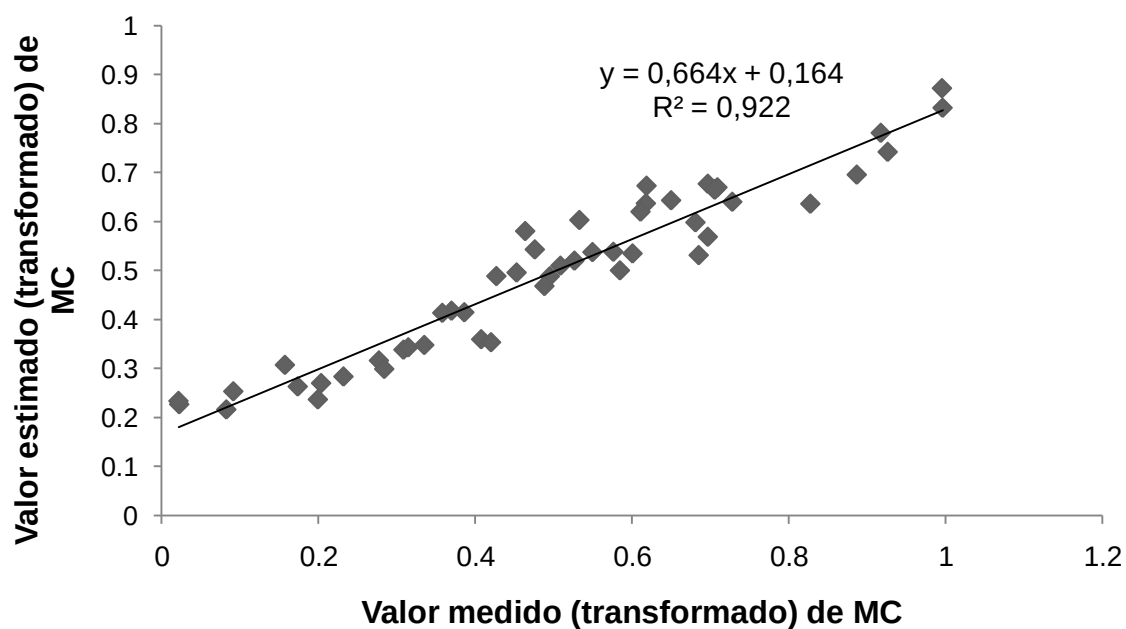


Figura 39 - Regressão linear entre os valores transformados observados e estimados de massa do colmo (MC) no espaçamento LT.

5.4.2 Análise de regressão linear múltipla

Foi realizada a análise de regressão linear múltipla da massa do colmo (MC) com as variáveis de planta (HC, DC e NCM) e variáveis de solo (RP, COT, argila, areia, Pt, Ma, Ds, θ_{CC} , θ_{PMP}) nos três espaçamentos (LS, LD e LT). Não foram utilizadas como variáveis explicativas para estimar a MC as variáveis °Brix, a Dp, AN e Silte. As três primeiras foram excluídas da análise devido a sua natureza, que provavelmente não causam variação na MC. O silte não foi utilizado pois é uma fração obtida por diferença, sendo mais conveniente utilizar a quantidade de argila e de areia.

A equação da regressão linear múltipla para a avaliação da relação entre a MC e as variáveis de planta no espaçamento LS é apresentada na tab. 6. Observa-se que a equação foi altamente significativa ($p < 0,001$) indicando uma relação entre as variáveis HC, DC e NCM com a MC, que pode ser confirmada pelos coeficientes da regressão, os quais são significativos a 5% (tab. 7). Nota-se na tab. 7 que todos os coeficientes da regressão foram significativos, mostrando que dentre as variáveis de planta avaliadas as que influenciaram na MC no espaçamento LS foram HC, DC e NCM.

Tabela 6 – Equação da estimativa da massa do colmo (MC) pelos atributos da planta no espaçamento LS e suas medidas de qualidade de ajuste e valor de probabilidade.

Equação*	R ²	Erro padrão	p**
MC = 0,0143 + (0,00325*HC) + (0,0201*DC) - (0,0146*NCM)	0,355	0,108	<0,001

*MC – massa do colmo; HC – altura do colmo; DC - diâmetro do colmo; NCM – número de colmos por metro. **Valor de probabilidade associada ao teste t.

Tabela 7 – Coeficientes da regressão da estimativa da massa do colmo (MC) pelos atributos da planta no espaçamento LS e o valor de probabilidade.

Variável explicativa*	Coeficiente da regressão (β)	p**
HC	0,00325	0,004
DC	0,0201	0,009
NCM	-0,0146	0,009

* HC – altura do colmo; DC - diâmetro do colmo; NCM – número de colmos por metro. **Valor de probabilidade associada ao teste t.

Como as variáveis de planta HC, DC e NCM influenciaram significativamente na estimativa da MC no espaçamento LS, foi feita uma regressão múltipla, com os valores das variáveis padronizados, para que os coeficientes da regressão obtidos para cada variável explicativa fossem comparados entre si e observados qual ou quais tiveram maior contribuição na estimativa da MC no espaçamento LS. Observa-se na tab. 8 que o maior coeficiente da regressão foi obtido pela variável HC (0,390), seguido pelo NCM (-0,360) e DC (0,334), indicando que a variável de planta que mais contribuiu na estimativa da MC no espaçamento LT foi a variável HC. A relação positiva entre HC e DC com a MC foi devido a esses dois parâmetros biométricos da cana-de-açúcar serem os principais componentes da MC. Quanto mais alto o colmo e maior o seu diâmetro, maior será a MC. Ferreira et al. 2006, estudaram as relações fenotípicas e genotípicas entre componentes de produção em cana-de-açúcar através da análise estatística de trilha em espaçamento entre linhas convencional (simples) e observaram que a altura do colmo teve a maior contribuição na MC, corroborando com os resultados obtidos no presente estudo para o espaçamento LS. Quanto a relação negativa do NCM com a MC, isto pode ser explicado pela interceptação da radiação solar pelas folhas da cultura, pois se não há limitações hídricas e minerais, a relação entre acúmulo de matéria seca e quantidade de radiação interceptada é linear (MONTEITH, 1977). Com o aumento do NCM há um aumento da densidade populacional, o que reduz a interceptação da radiação solar por colmo devido ao menor índice de área foliar por colmo, reduzindo a fitomassa do colmo. Com maior quantidade de colmos por metro, há maior quantidade de colmos por m² para um mesmo espaçamento entre linhas, havendo aumento da competição por espaço, reduzindo a interceptação da radiação solar por colmo e reduzindo por consequência a MC, explicando a relação negativa entre NCM e MC no espaçamento LS.

Tabela 8 – Equação da estimativa da massa do colmo (MC) pelos atributos da planta no espaçamento LS com os valores padronizados e suas medidas de qualidade de ajuste e valor de probabilidade.

Equação*	R ²	Erro padrão	p**
MC = 0,318 + (0,390*HC) + (0,334*DC) - (0,360*NCM)	0,355	0,108	<0,001

*MC – massa do colmo; HC – altura do colmo; DC - diâmetro do colmo; NCM – número de colmos por metro. **Valor de probabilidade associada ao teste t.

Embora altamente significativa a equação que descreve a relação entre a MC com os atributos de planta no espaçamento LS, indicou-se um R^2 baixo. A explicação provável é pelo grande número de amostras ($n=50$). Charnet et al. (1999) afirma que com o aumento do número de observações existe uma tendência ao aumento da significância do R^2 , no entanto com base no valor absoluto do R^2 pode-se observar uma baixa relação entre as variáveis.

A tab. 9 apresenta a equação de regressão linear múltipla obtida para a estimativa da MC a partir de variáveis explicativas de solo no espaçamento LS. Foram utilizadas as variáveis RP, COT, argila, areia, Pt, Ma, Ds, θ_{CC} , θ_{PMP} , na regressão, sendo as variáveis CAD e Mi eliminadas devido a colinearidade, pois apresentaram um valor de inflação da variância elevado. Nota-se pelo valor de p da equação que não houve uma relação significativa entre MC com nenhuma variável de solo a 5% de probabilidade. Essa ausência de relação significativa entre MC e variáveis do solo pode ser melhor visualizada na tab. 10, onde são apresentados os coeficientes da regressão e respectiva probabilidade. Nota-se que os valores de probabilidades foram todos superiores a 5%, evidenciando que nenhuma variável de solo se relacionou significativamente com a MC, sem contribuir na variabilidade deste atributo de planta no espaçamento LS.

Tabela 9 – Equação da estimativa da massa do colmo (MC) pelos atributos do solo no espaçamento LS e suas medidas de qualidade de ajuste e valor de probabilidade.

Equação*	R^2	Erro padrão	p**
$MC = 0,212 - (0,147 \cdot RP) - (0,0222 \cdot COT) - (0,000266 \cdot Arg) + (0,000769 \cdot Are) + (0,0238 \cdot Pt) + (0,571 \cdot Ma) + (0,578 \cdot Ds) + (0,264 \cdot \theta_{CC}) + (0,112 \cdot \theta_{PMP})$	0,0805	0,138	0,933

*MC – massa do colmo; RP – resistência a penetração; COT – carbono orgânico total; Arg – argila; Are – areia; Pt – porosidade total; Ma – macroporosidade; Ds – densidade do solo; θ_{CC} – umidade na capacidade de campo; θ_{PMP} – umidade no ponto de murcha permanente.

**Valor de probabilidade associada ao teste t.

Tabela 10 – Coeficientes da regressão da massa do colmo (MC) com atributos do solo no espaçamento LS e o valor de probabilidade.

Variável explicativa*	Coeficiente da regressão (β)	p**
RP	-0,147	0,363
COT	-0,0222	0,943
Arg	-0,000266	0,885
Are	0,000769	0,632
Pt	0,0238	0,991
Ma	0,571	0,718
Ds	0,578	0,450
θ_{CC}	0,264	0,904
θ_{PMP}	0,112	0,969

*RP – resistência a penetração; COT – carbono orgânico total; Arg – argila; Are – areia; Pt – porosidade total; Ma – macroporosidade; Ds – densidade do solo; θ_{CC} – umidade na capacidade de campo; θ_{PMP} – umidade no ponto de murcha permanente.

**Valor de probabilidade associada ao teste t.

Com relação a regressão linear múltipla entre a MC e as variáveis de planta (HC, DC e NCM) no espaçamento LD, observa-se na tab. 11 a equação para a estimativa da MC. Nota-se que a regressão não foi significativa a 5% de probabilidade, indicando que não houve influência significativa das variáveis de planta (HC, DC e NCM) na estimativa da MC (Tab. 11). A ausência de significância da regressão pode ser evidenciada na tab. 12, que apresenta os coeficientes da regressão de cada variável explicativa e seus valores de probabilidade.

Tabela 11 – Equação da estimativa da massa do colmo (MC) pelos atributos da planta no espaçamento LD e suas medidas de qualidade de ajuste e valor de probabilidade.

Equação*	R ²	Erro padrão	P**
MC = 0,534 + (0,000237*HC) + (0,0249*DC) - (0,0269*NCM)	0,104	0,212	0,164

*MC – massa do colmo; HC – altura do colmo; DC - diâmetro do colmo; NCM – número de colmos por metro. **Valor de probabilidade associada ao teste t.

Tabela 12 – Coeficientes da regressão da massa do colmo (MC) com atributos da planta no espaçamento LD e o valor de probabilidade.

Variável explicativa	Coeficiente da regressão (β)	p
HC	0,000237	0,874
DC	0,0249	0,081
NCM	-0,0269	0,091

*HC – altura do colmo; DC - diâmetro do colmo; NCM – número de colmos por metro. **Valor de probabilidade associada ao teste t.

A equação da análise de regressão múltipla entre MC e os atributos do solo (RP, COT, Ma, Mi, Ds, θ_{CC} , θ_{PMP}) no espaçamento LD, é apresentada na tab. 13. Não foram utilizados para a análise as variáveis argila, areia, Pt e CAD, pois essas apresentaram crosscorrelação espacial com a MC, sendo avaliadas por meio da abordagem de espaço de estados, discutido no item 5.4.1. Nota-se que a equação da estimativa da MC pelos atributos do solo no espaçamento LD foi significativa, indicando que há relação significativa de algumas das variáveis explicativas com a MC. A tab. 14 evidencia quais variáveis explicativas apresentaram relação com a MC. Nota-se que as variáveis Ma e θ_{PMP} apresentaram relação significativa ao nível de 5% de probabilidade, de acordo com o valor de p do teste t.

Tabela 13 – Equação da análise de regressão múltipla entre a massa do colmo (MC) e os atributos do solo no espaçamento LD e suas medidas de qualidade de ajuste e valor de probabilidade.

Equação	R ²	Erro padrão	p
MC = -1,783 - (0,0471*RP) + (0,402*COT) + (3,546*Ma) - (3,120*Mi) - (0,760*Ds) + (4,797* θ_{CC}) + (6,277* θ_{PMP})	0,484	0,168	<0,001

*MC – massa do colmo; RP – resistência a penetração; COT – carbono orgânico total; Ma – macroporosidade; Mi – Microporosidade; Ds – densidade do solo; θ_{CC} – umidade na capacidade de campo; θ_{PMP} – umidade no ponto de murcha permanente.

**Valor de probabilidade associada ao teste t.

Tabela 14 – Coeficientes da regressão múltipla entre massa do colmo (MC) e atributos do solo no espaçamento LD e o valor de probabilidade.

Variável explicativa*	Coeficiente da regressão (β)	p**
RP	-0,0471	0,694
COT	0,402	0,218
Ma	3,546	0,004
Mi	-3,12	0,406
Ds	-0,76	0,401
θ_{PMP}	4,797	0,009
θ_{CC}	6,277	0,110

*RP – resistência a penetração; COT – carbono orgânico total; Ma – macroporosidade; Mi – Microporosidade; Ds – densidade do solo; θ_{CC} – umidade na capacidade de campo; θ_{PMP} – umidade no ponto de murcha permanente.

**Valor de probabilidade associada ao teste t.

Assim, como houve relação somente entre MC e Ma e θ_{PMP} foi realizada novamente uma análise de regressão, mas utilizando como variável explicativa somente a Ma e o θ_{PMP} . Os valores das variáveis foram padronizados através de uma transformação, com o intuito de visualizar através dos coeficientes da regressão múltipla qual das duas variáveis de solo apresentou maior contribuição na estimativa da MC no espaçamento LD. Observa-se na tab. 15 que entre as variáveis de solo utilizadas na regressão múltipla a Ma foi a que apresentou maior contribuição na estimativa da MC no espaçamento LD, apresentando uma relação altamente significativa ($p < 0,001$). A Ma apresentou o maior coeficiente da regressão múltipla (0,745) seguida pela θ_{PMP} com 0,662, sendo a contribuição da Ma maior que a da θ_{PMP} na estimativa da MC no espaçamento LD.

A relação positiva e significativa da Ma com a MC, pode ser explicada, pois conforme Beutler e Centurion (2003), a quantidade de macroporos influencia no crescimento das raízes e na absorção de água e nutrientes. Assim, com o aumento da Ma pode haver o favorecimento desses processos, ocasionando uma influência positiva na MC. Essa relação positiva e significativa entre MC e Ma foi observada também na LT por meio da abordagem de espaço de estados. A relação significativa entre MC e θ_{PMP} pode ser explicada, pois o valor de θ_{PMP} refere-se a quantidade de água retida a tensão correspondente ao ponto murcha permanente (1,5 MPa) inferindo em um deslocamento da curva de retenção de água no solo para valores maiores de umidade em cada tensão, podendo haver maior quantidade de água retida na tensão correspondente a capacidade de campo também. Assim, com maiores valores de θ_{PMP} pode haver maior quantidade de água retida em tensões mais baixas, havendo maior quantidade de água para absorção das plantas nessas tensões. Nota-se na tab.14 que a θ_{CC} não apresentou relação significativa com a MC, porém apresentou uma relação positiva. Inman-Bamber, (2004) observaram redução de 35% na fitomassa de cana-de-açúcar em consequência da restrição hídrica, em um período de alta demanda evaporativa.

A contribuição significativa das variáveis Ma e θ_{PMP} na MC no espaçamento LD e a ausência de relação das variáveis de solo com a MC no espaçamento LS pode ser devido a maior densidade de plantas que proporcionou maior competição por água e nutriente entre elas no espaçamento LD. Com isso, pode ter ocorrido uma maior influência das variáveis de solo relacionadas a disponibilidade de água na estimativa da MC no espaçamento com maior densidade.

Tabela 15 – Equação da regressão múltipla com os valores padronizados entre massa do colmo (MC) e atributos do solo no espaçamento LD e suas medidas de qualidade de ajuste e valor de probabilidade.

Equação*	R ²	Erro padrão	p**
MC = - 0.204 + (0,745*Ma) + (0,662* θ_{PMP})	0,399	0,198	<0,001

*MC – massa do colmo; Ma – macroporosidade; e θ_{PMP} – umidade no ponto de murcha permanente.

**Valor de probabilidade associada ao teste t.

Tabela 16 – Coeficientes da regressão múltipla com os valores padronizados entre massa do colmo (MC) e atributos do solo no espaçamento LD e o valor de probabilidade.

Variável explicativa*	Coeficiente da regressão (β)	p**
Ma	0,745	<0,001
θ_{PMP}	0,662	<0,001

* Ma – macroporosidade; θ_{PMP} – umidade no ponto de murcha permanente. **Valor de probabilidade associada ao teste t.

Percebe-se que embora altamente significativa a equação que descreve a relação entre a MC com Ma e θ_{PMP} , o R² foi baixo. Charnet et al. (1999) afirma que com o aumento do número de observações existe uma tendência ao aumento da significância do R² no entanto com base no valor absoluto do R² não observa-se uma relação entre as variáveis.

A equação da regressão linear múltipla da relação entre a MC e as variáveis de planta no espaçamento LT é apresentada na tab. 17. Observa-se que a equação foi altamente significativa ($p < 0,001$), indicando uma relação entre as variáveis HC, DC e NCM com a MC. Para verificar qual ou quais variáveis estão influenciando significativamente na variabilidade da MC, na tab. 7 apresentam-se todos os coeficientes da regressão múltipla e os respectivos valores de probabilidade. Nota-se que os coeficientes das variáveis HC e NCM foram significativos, indicando que entre as variáveis de planta há contribuição significativa na estimativa da MC somente pelas variáveis HC e NCM no espaçamento LT.

Tabela 17 – Equação da estimativa da massa do colmo (MC) pelos atributos da planta no espaçamento LT e suas medidas de qualidade de ajuste e valor de probabilidade.

Equação*	R ²	Erro padrão	p**
MC = 0,450 + (0,00317*HC) - (0,000149*DC) - (0,0257*NCM)	0,318	0,087	<0,001

*MC – massa do colmo; HC – altura do colmo; DC - diâmetro do colmo; NCM – número de colmos por metro. **Valor de probabilidade associada ao teste t.

Tabela 18 – Coeficientes da regressão da massa do colmo (MC) com atributos da planta no espaçamento LT e o valor de probabilidade.

Variável explicativa*	Coeficiente da regressão (β)	p**
HC	0,00317	0,002
DC	- 0,000149	0,983
NCM	- 0,0257	0,002

*HC – altura do colmo; DC - diâmetro do colmo; NCM – número de colmos por metro. **Valor de probabilidade associada ao teste t.

Foi realizada novamente uma análise de regressão, mas somente entre a MC e as duas variáveis que apresentaram contribuições significativas (HC e NCM). Os valores das variáveis MC, HC e NCM foram padronizados para que os coeficientes da regressão obtidos para cada variável explicativa fossem comparados entre si e observados qual variável de planta teve a maior contribuição na estimativa da MC no espaçamento LT. Na tab. 19 é apresentada a equação da análise de regressão com os valores dos atributos da planta padronizados e nota-se que a equação foi altamente significativa pelo teste t com $p < 0,001$.

Tabela 19 – Equação da regressão múltipla com os valores padronizados entre massa do colmo (MC) e atributos da planta no espaçamento LT e suas medidas de qualidade de ajuste e valor de probabilidade.

Equação*	R ²	Erro padrão	p**
MC = 0.505 + (0.399 * HC) - (0.410 * NCM)	0,318	0,211	<0,001

*MC – massa do colmo; HC – altura do colmo; NCM – número de colmos por metro. **Valor de probabilidade associada ao teste t.

A relação significativa entre MC com HC e NCM é evidenciada pelos valores de p dos coeficientes da regressão apresentados na tab. 20. Comparando os

coeficientes da regressão obtidos pelos valores das variáveis padronizadas percebe-se que o NCM teve maior contribuição na estimativa da MC no espaçamento LT, com $\beta = -0.410$. (tab. 20) A variável HC também apresentou contribuição não menos expressiva, com $\beta = 0.399$. A relação negativa entre NCM é devido a interceptação da radiação solar pelas folhas da cultura. Conforme Monteith (1977) se não haver limitações hídricas e minerais, a relação entre acúmulo de matéria seca e quantidade de radiação interceptada é linear. Com o aumento do NCM há um aumento da densidade populacional, o que reduz a interceptação da radiação solar por colmo devido ao menor índice de área foliar por colmo, reduzindo a fitomassa do colmo. Com maior quantidade de colmos por metro linear, há também maior quantidade de colmos por m^2 para um mesmo espaçamento entre linhas, havendo aumento da competição por espaço, reduzindo a interceptação da radiação solar por colmo e reduzindo por consequência a MC. Quanto à maior contribuição do NCM na MC em relação a HC, é devido ao espaçamento LT ser o com maior população de colmos por m^2 dos três, havendo maior competição, interferindo mais nos parâmetros biométricos da cana-de-açúcar, que vão influenciar a MC, explicando a relação negativa entre NCM e MC no espaçamento LT. A HC foi positivamente relacionada com a MC, como já se esperava, pois este é um dos componentes da MC, sendo que quanto mais alto o colmo mais pesado é.

Percebe-se que embora altamente significativa a equação, o R^2 foi baixo (0,318). Isto pode ter ocorrido devido ao grande número de amostras (50), o que já foi observado na análise de regressão múltipla nos outros espaçamentos.

Tabela 20 – Coeficientes da regressão múltipla com os valores padronizados entre massa do colmo (MC) e atributos da planta no espaçamento LT e o valor de probabilidade.

Variável explicativa*	Coeficiente da regressão (β)	p**
HC	0.399	0,002
NCM	- 0.410	0,001

*HC – altura do colmo; NCM – número de colmos por metro. **Valor de probabilidade associada ao teste t.

A tab. 21 apresenta a equação de regressão linear múltipla obtida para a estimativa da MC a partir de variáveis explicativas de solo no espaçamento LT. Foram utilizadas as variáveis RP, COT, argila, areia, Pt, Mi, Ds, θ_{CC} e θ_{PMP} na análise

de regressão, sendo a CAD eliminada devido a colinearidade. A Ma não foi considerada, pois apresentou crosscorrelação espacial com a MC, sendo avaliada por meio da abordagem de espaço de estados, cuja discussão encontra-se no item 5.4.1. Nota-se pelo valor de probabilidade do teste t da equação de regressão múltipla que não houve uma relação significativa entre MC com nenhuma variável de solo a 5% de probabilidade. Essa ausência de relação significativa entre MC e variáveis do solo pode ser mais bem visualizada na tab. 22, onde são apresentados os coeficientes da regressão e seus respectivos valores de probabilidade. Nota-se que os valores de probabilidades foram todos acima de 5%, evidenciando que nenhuma variável de solo se relacionou com a MC, não contribuindo significativamente na variabilidade deste atributo de planta no espaçamento LT.

Tabela 21 – Equação da análise de regressão múltipla entre a massa do colmo (MC) e os atributos do solo no espaçamento LT e suas medidas de qualidade de ajuste e valor de probabilidade.

Equação*	R ²	Erro padrão	p**
MC = 2,211 - (0,0177*RP) - (0,0956*COT) - (0,00163*Arg) - (0,00210*Are) + (0,638*Pt) - (0,808*Mi) - (0,0230*Ds) - (1,459*θ _{CC}) + (1,891*θ _{PMP})	0,484	0,168	0,53

*MC – massa do colmo; RP – resistência a penetração; COT – carbono orgânico total; Arg – argila; Are – areia; Pt – porosidade total; Mi – microporosidade; Ds – densidade do solo; θ_{CC} – umidade na capacidade de campo; θ_{PMP} – umidade no ponto de murcha permanente. **Valor de probabilidade associada ao teste t.

Tabela 22 – Coeficientes da regressão múltipla entre massa do colmo (MC) e atributos do solo no espaçamento LT e o valor de probabilidade.

Variável explicativa*	Coeficiente da regressão (β)	p**
RP	- 0,0177	0,723
COT	- 0,0956	0,633
Arg	- 0,00163	0,306
Are	- 0,00210	0,218
Pt	0,638	0,416
Mi	- 0,808	0,708
Ds	- 0,0230	0,976
θ _{CC}	- 1,459	0,446
θ _{PMP}	1,891	0,249

*RP – resistência a penetração; COT – carbono orgânico total; Arg – argila; Are – areia; Pt – porosidade total; Ma – macroporosidade; Ds – densidade do solo; θ_{CC} – umidade na capacidade de campo; θ_{PMP} – umidade no ponto de murcha permanente.

**Valor de probabilidade associada ao teste t.

5.5 Relação entre °Brix e variáveis de planta e de solo nos três tipos de espaçamentos entre linhas da cultura da cana-de-açúcar

5.5.1 Abordagem de espaço de estados

Não houve dependência cruzada entre a variável °Brix com nenhuma das variáveis de planta e de solo no espaçamento LS, como foi discutido no item 5.3. Um dos requisitos para avaliação das variáveis do sistema solo-planta pela abordagem de espaço de estados é a presença de autocorrelação e crosscorrelação espacial. Como esses critérios não foram atingidos, não pode ser utilizada a abordagem de espaço de estados para avaliação da relação entre a variável °Brix e as variáveis de planta e de solo. Assim, foi utilizada uma análise estatística alternativa à abordagem de espaço de estados a análise de regressão linear múltipla (item 5.5.2).

Quanto à avaliação do °Brix por meio da abordagem de espaço de estados no espaçamento LD, observa-se que esta variável foi espacialmente relacionada com a capacidade de água disponível (CAD), como pode ser observado na equação da Fig. 40. Nota-se que a variável °Brix medida no ponto $i-1$ contribui com aproximadamente 94% na estimativa do ponto i (Fig. 40). A CAD apresentou uma contribuição de 6,6% na variabilidade do °Brix no ponto vizinho. Analisando a dispersão dos dados ao longo da transeção, observam-se na Fig. 40 os valores estimados mais e menos o desvio padrão da estimativa em cada posição i representados pelas linhas superior e inferior. Verifica-se que há a ocorrência de valores observados fora dos limites de confiança calculados para cada estimativa, fato este que pode ser explicado pelo baixo valor do coeficiente de determinação ($R^2 = 0,41$) da regressão entre os valores observados e estimados pela equação de estado, inferindo em um baixo desempenho desta equação na estimativa do °Brix (Fig. 41). No entanto, os resultados das Fig. 40 e 41 revelam que as variações espaciais do °Brix estão relacionadas positivamente com variações da CAD em toda a transeção medida no espaçamento LD. Isto pode estar associado a disponibilidade de água para a planta, pois a deficiência hídrica na fase de alongamento dos colmos causa sérios prejuízos na produção de fitomassa e no rendimento de sacarose (ROBERTSON et al., 1999; SILVA; COSTA, 2004).

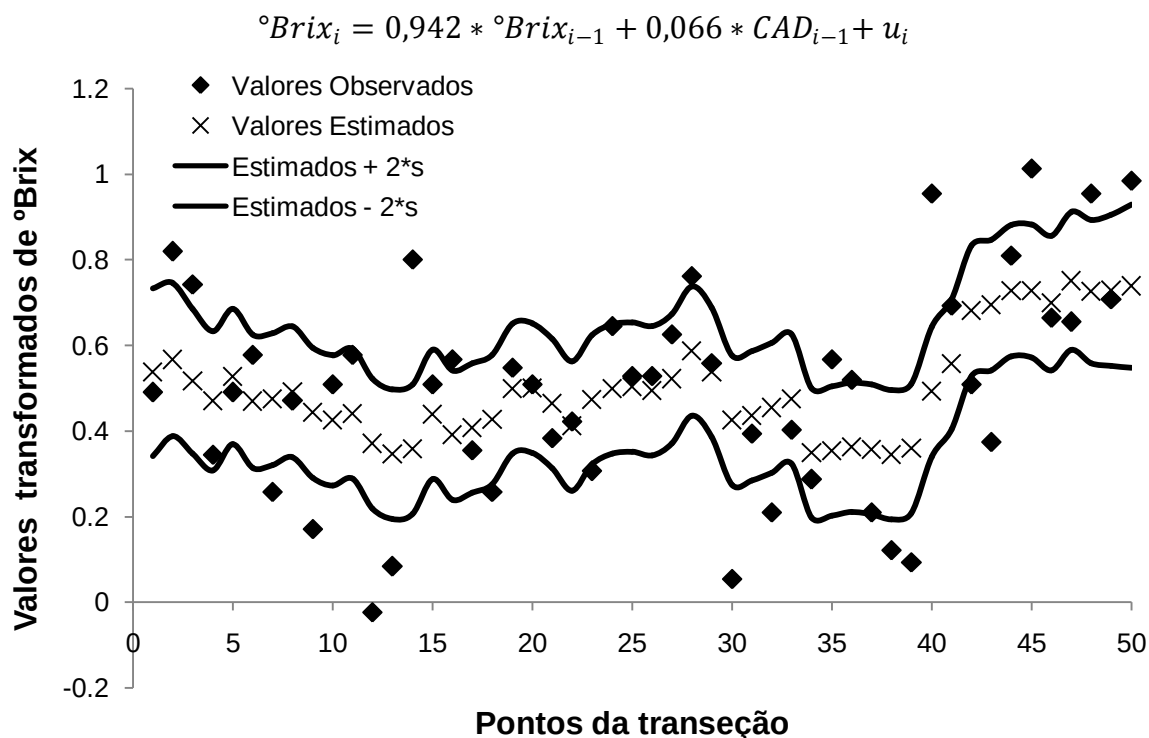


Figura 40 - Análise de espaço de estados aplicada a variável °Brix na posição i em função da capacidade de água disponível na posição $i-1$, no espaçamento LD.

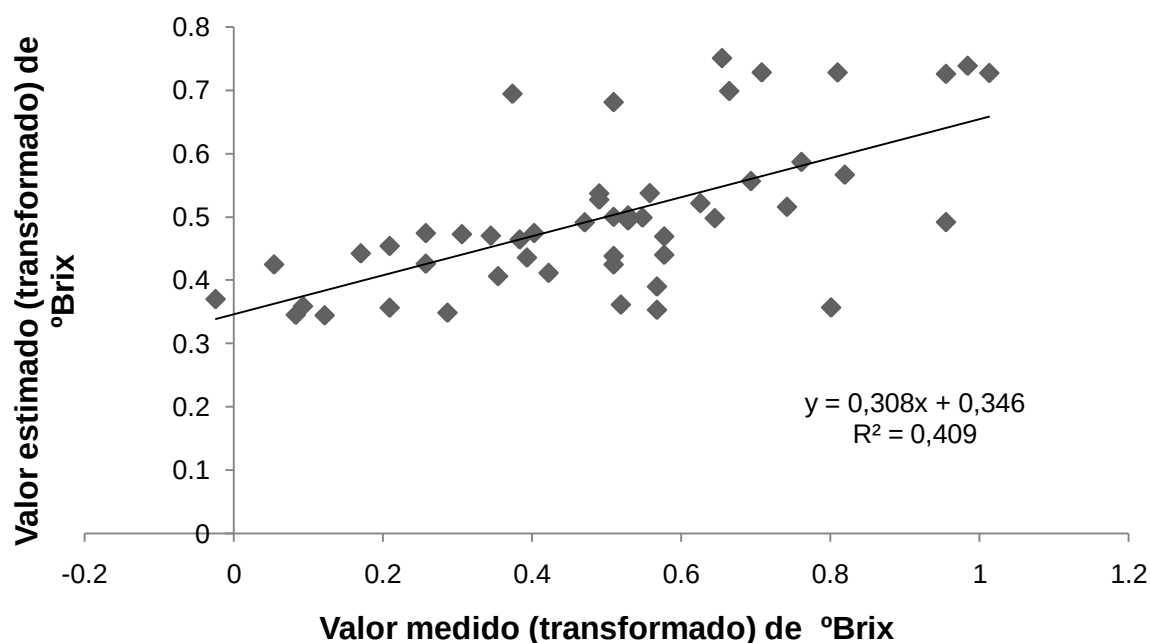


Figura 41 - Regressão linear entre os valores transformados observados e estimados de °Brix no espaçamento LD.

Houve algumas variáveis no espaçamento LD que não apresentaram correlação cruzada e que não puderam ser avaliadas por meio da abordagem de espaço de estados. Essas variáveis são importantes nas relações entre variáveis de

planta e de solo e por isso realizou-se uma análise de regressão múltipla para avaliar essa relação no espaçamento LD, que será discutida no item 5.5.2.

Não houve dependência cruzada entre a variável °Brix com as variáveis de planta e de solo no espaçamento LT, (item 5.3). Assim, para estes parâmetros e nesse espaçamento foi utilizada a análise de regressão linear múltipla.

5.5.2 Análise de regressão linear múltipla

Foi realizada a análise de regressão linear múltipla para relacionar a variável teor de sólidos solúveis totais do caldo (°Brix) com as variáveis de planta (HC, DC, NCM e MC) e com as variáveis de solo (RP, COT, argila, areia, Pt, Ma, Mi, Ds, θ_{CC} , θ_{PMP} e CAD) nos três espaçamentos (LS, LD e LT). Não foram utilizadas como variáveis explicativas para estimar o °Brix as variáveis Dp, AN e Silte.

Com relação a análise de regressão linear múltipla entre a °Brix e as variáveis de planta (HC, DC, NCM e MC) no espaçamento LS, observa-se na tab. 23 a equação para a estimativa do °Brix nesse espaçamento. Nota-se que a regressão não foi significativa a 5% de probabilidade, indicando que não houve influência significativa das variáveis de planta (HC, DC, NCM e MC) na estimativa do °Brix.

Tabela 23 – Equação da regressão múltipla entre °Brix e atributos da planta no espaçamento LS e suas medidas de qualidade de ajuste e valor de probabilidade.

Equação*	R ²	Erro padrão	p**
°Brix = 20,449 - (0,00688*HC) + (0,0698*DC) - (0,0116*NCM) - (0,00591*MC)	0,0565	0,825	0,614

* °Brix – teor de sólidos solúveis totais do caldo; HC – altura do colmo; DC - diâmetro do colmo; NCM – número de colmos por metro; MC – massa do colmo.**Valor de probabilidade associada ao teste t.

A ausência de significância da análise de regressão pode ser evidenciada na tab. 24, a qual apresenta os coeficientes da regressão de cada variável explicativa e seus respectivos valores de probabilidade. Nota-se que em todos os β o valor de probabilidade no teste t foi maior que 0,05, indicando que não houve influência significativa dessas variáveis de planta sobre o °Brix.

Tabela 24 – Coeficientes da regressão múltipla entre °Brix e atributos da planta no espaçamento LS e o valor de probabilidade.

Variável explicativa*	Coeficiente da regressão (β)	p**
HC	- 0,00688	0,452
DC	0,0698	0,259
NCM	- 0,0116	0,794
MC	- 0,00591	0,996

*HC – altura do colmo; DC - diâmetro do colmo; NCM – número de colmos por metro; MC – massa do colmo. **Valor de probabilidade associada ao teste t.

A tab. 25 apresenta a equação de regressão linear múltipla obtida para a estimativa do °Brix a partir de variáveis explicativas de solo no espaçamento LS. Foram utilizadas as variáveis RP, COT, argila, areia, Pt, Ma, Ds, θ_{CC} e θ_{PMP} na análise de regressão, sendo as variáveis CAD e Mi eliminadas devido a colinearidade, pois apresentaram um valor de inflação da variância elevado, critério adotado para avaliação da colinearidade. Nota-se pelo valor de probabilidade da equação de regressão múltipla que não houve uma relação significativa entre °Brix com nenhuma variável de solo a 5% de probabilidade.

Tabela 25 – Equação da regressão múltipla entre °Brix e atributos do solo no espaçamento LS e suas medidas de qualidade de ajuste e valor de probabilidade.

Equação*	R ²	Erro padrão	p**
°Brix = 19,504 + (0,262 * RP) + (3,167 * COT) + (0,000988*Arg) + (0,000355*Are) + (3,435*Pt) - (9,949*Ma) - (2,597*Ds) - (2,237* θ_{CC}) + (5,565* θ_{PMP})	0,143	0,834	0,671

* °Brix – teor de sólidos solúveis totais do caldo; RP – resistência a penetração; COT – carbono orgânico total; Arg – argila; Are – areia; Pt – porosidade total; Ma – macroporosidade; Ds – densidade do solo; θ_{CC} – umidade na capacidade de campo; θ_{PMP} – umidade no ponto de murcha permanente.

**Valor de probabilidade associada ao teste t.

Essa ausência de relação significativa entre °Brix e as variáveis do solo podem ser visualizadas na tab. 26, onde são apresentados os coeficientes da regressão e seus respectivos valores de probabilidade. Nota-se que os valores de probabilidades foram todos acima de 5% evidenciando que nenhuma variável de solo se relacionou com o °Brix, não contribuindo significativamente na variabilidade deste atributo de planta no espaçamento LS. A falta de relação significativa entre o

°Brix e as variáveis de solo pode ser explicada pela característica desta variável, pois conforme Bressiani (2001) o teor de açúcar da cana é uma característica de alta herdabilidade o que pode configurar em uma baixa relação com o ambiente e maior relação com o genótipo da planta.

Tabela 26 – Coeficientes da regressão múltipla entre °Brix e atributos do solo no espaçamento LS e o valor de probabilidade.

Variável explicativa*	Coeficiente da regressão (β)	p**
RP	0,262	0,788
COT	3,167	0,098
Arg	0,000988	0,929
Are	0,000355	0,971
Pt	3,435	0,784
Ma	-9,949	0,302
Ds	-2,597	0,575
θ_{CC}	-2,237	0,867
θ_{PMP}	5,565	0,754

*RP – resistência a penetração; COT – carbono orgânico total; Arg – argila; Are – areia; Pt – porosidade total; Ma – macroporosidade; Ds – densidade do solo; θ_{CC} – umidade na capacidade de campo; θ_{PMP} – umidade no ponto de murcha permanente. **Valor de probabilidade associada ao teste t.

A tab. 27 apresenta a equação da análise de regressão linear múltipla entre o °Brix e as variáveis de planta (HC, DC, NCM e MC) no espaçamento LD. Nota-se que a regressão foi altamente significativa ($< 0,001$), indicando que houve influência significativa de algumas das variáveis de planta (HC, DC, NCM e MC) na estimativa do °Brix. Para verificar qual ou quais variáveis influenciaram significativamente no °Brix deve-se observar a tab. 28, a qual apresenta os coeficientes da regressão com seus respectivos valores de probabilidades pelo teste t. Percebe-se que a HC e o DC se relacionaram significativamente com o °Brix, contribuindo para a sua estimativa no espaçamento LD.

Tabela 27 – Equação da regressão múltipla entre °Brix e atributos da planta no espaçamento LD e suas medidas de qualidade de ajuste e valor de probabilidade.

Equação*	R ²	Erro padrão	p**
°Brix = 21,334 - (0,0233*HC) + (0,125*DC) + (0,0433*NCM) - (0,190 * MC)	0,373	0,711	<0,001

* °Brix – teor de sólidos solúveis totais do caldo; HC – altura do colmo; DC - diâmetro do colmo; NCM – número de colmos por metro; MC – massa do colmo. **Valor de probabilidade associada ao teste t.

Tabela 28 – Coeficientes da regressão múltipla entre °Brix e atributos da planta no espaçamento LD e o valor de probabilidade.

Variável explicativa*	Coeficiente da regressão (β)	p**
HC	- 0,0233	<0,001
DC	0,125	0,013
NCM	0,0433	0,427
MC	- 0,190	0,703

*HC – altura do colmo; DC - diâmetro do colmo; NCM – número de colmos por metro; MC – massa do colmo. **Valor de probabilidade associada ao teste t.

Como a HC e a DC apresentaram significância ao nível de 5% de probabilidade na estimativa do °Brix foi realizada uma análise de regressão múltipla novamente, mas considerando como variável explicativa somente as duas variáveis que apresentaram significância (tab. 29). Percebe-se que embora a equação foi significativa, mas o R^2 foi muito baixo. Isto pode ter ocorrido devido ao grande número de amostras (CHARNET et al. 1999).

Tabela 29 – Equação da regressão múltipla com os valores padronizados entre °Brix e atributos da planta no espaçamento LD e suas medidas de qualidade de ajuste e valor de probabilidade.

Equação*	R^2	Erro padrão	p**
°Brix = 0,610 - (0,544 * HC) + (0,325 * DC)	0,359	0,204	<0,001

* °Brix – teor de sólidos solúveis totais do caldo; HC – altura do colmo; DC - diâmetro do colmo.

**Valor de probabilidade associada ao teste t.

Para verificar qual das duas variáveis de planta se relacionaram significativamente e apresentaram maior influência no °Brix, os valores das variáveis foram padronizados através de uma transformação dos dados, possibilitando a comparação entre os coeficientes da regressão, pois apresentam-se na mesma magnitude. A tab. 30 apresenta os coeficientes da regressão múltipla dos valores padronizados e é possível notar que a maior contribuição foi da HC, cujo β foi de - 0,544, seguido do DC com $\beta=0,325$. Nota-se pelo coeficiente de regressão que a influência da HC sobre o °Brix foi forte em comparação com o DC no espaçamento LD. O acúmulo de sacarose no colmo é determinado pela capacidade de armazenamento (morfologia/anatomia dos colmos) e pelo metabolismo e transporte

de açúcar tanto nos tecidos-fonte (folhas) quanto nos drenos (folhas, colmos, raízes e inflorescências). Nesse sentido, características morfológicas como área foliar, número de perfilhos, altura da planta e diâmetro dos entrenós, podem estar diretamente relacionadas ao acúmulo de sacarose, sendo determinantes da sua capacidade de armazenamento nas células do parênquima do colmo (MARAFON, 2012).

Tabela 30 – Coeficientes da regressão múltipla com os valores padronizados entre °Brix e atributos da planta no espaçamento LD e o valor de probabilidade.

Variável explicativa*	Coeficiente da regressão (β)	p**
HC	- 0,544	<0,001
DC	0,325	0,008

*HC – altura do colmo; DC - diâmetro do colmo. **Valor de probabilidade associada ao teste t.

A tab. 31 apresenta a equação de regressão linear múltipla obtida para a estimativa do °Brix a partir de variáveis explicativas de solo no espaçamento LD. Foram utilizadas as variáveis RP, COT, argila, areia, Pt, Ma, Ds, θ_{CC} e θ_{PMP} na análise de regressão, sendo a variável Mi eliminada devido a colinearidade. A CAD também não foi utilizada na análise de regressão múltipla, pois foi crosscorrelacionada espacialmente com o °Brix, sendo avaliada por meio da abordagem de espaço de estados, no item 5.5.1. Nota-se pelo valor de probabilidade do teste t da equação de regressão múltipla que houve uma relação significativa entre °Brix com uma ou mais variáveis de solo a 5% de probabilidade (tab. 31).

Tabela 31 – Equação da regressão múltipla entre °Brix e atributos do solo no espaçamento LD e suas medidas de qualidade de ajuste e valor de probabilidade.

Equação*	R ²	Erro padrão	p**
°Brix = 20,698 + (0,0895*RP) + (2,775*COT) - (0,0128*Arg) - (0,000161*Are) - (0,633*Pt) + (4,803*Ma) + (1,957*Ds) - (9,738* θ_{CC}) + (18,202* θ_{PMP})	0,333	0,777	0,041

* °Brix – teor de sólidos solúveis totais do caldo; RP – resistência a penetração; COT – carbono orgânico total; Arg – argila; Are – areia; Pt – porosidade total; Ma – macroporosidade; Ds – densidade do solo; θ_{CC} – umidade na capacidade de campo; θ_{PMP} – umidade no ponto de murcha permanente.

**Valor de probabilidade associada ao teste t.

Para verificar qual ou quais variáveis apresentaram relação significativa com o °Brix foram avaliados os coeficientes da regressão múltipla e de acordo com o valor de probabilidade verificaram-se qual ou quais variáveis de solo apresentaram relação significativa com o °Brix no espaçamento LD. Na tab. 32 observa-se os valores de p para cada β e nota-se que a única variável de solo que apresentou relação significativa a 5% de probabilidade pelo teste t foi a θ_{PMP} , cujo valor de p foi de 0,034. Assim, foi realizada uma análise de regressão considerando-se somente essa variável como explicativa da variável resposta °Brix.

Tabela 32 – Coeficientes da regressão múltipla entre °Brix e atributos do solo no espaçamento LD e o valor de probabilidade.

Variável explicativa*	Coeficiente da regressão (β)	p**
RP	0,0895	0,876
COT	2,775	0,081
Arg	-0,0128	0,368
Are	-0,00016	0,983
Pt	-0,633	0,971
Ma	4,803	0,763
Ds	1,957	0,673
θ_{CC}	-9,738	0,592
θ_{PMP}	18,202	0,034

*RP – resistência a penetração; COT – carbono orgânico total; Arg – argila; Are – areia; Pt – porosidade total; Ma – macroporosidade; Ds – densidade do solo; θ_{CC} – umidade na capacidade de campo; θ_{PMP} – umidade no ponto de murcha permanente.

**Valor de probabilidade associada ao teste t.

A tab. 33 apresenta a equação entre a variável resposta °Brix e a variável explicativa θ_{PMP} , a qual foi a única entre as variáveis de solo que apresentaram relação significativa com o °Brix no espaçamento LD. Sendo assim, não foi necessário realizar a transformação dos dados, pois a relação entre o °Brix e θ_{PMP} pode ser descrita por uma equação de regressão linear simples. A relação positiva pode estar associada ao valor de θ_{PMP} corresponder ao conteúdo de água no solo, sendo que quanto maior for o seu valor maior a quantidade de água retida no solo podendo inferir em uma condição de maior quantidade de água disponível. Machado et al. (2009) observaram que o deficit hídrico na fase de crescimento inicial do genótipo IACSP 96-2042 causou redução na produção de fitomassa e de sólidos solúveis.

Tabela 33 – Equação da regressão entre °Brix e θ_{PMP} no espaçamento LD e suas medidas de qualidade de ajuste e valor de probabilidade.

Equação*	R ²	Erro padrão	p**
$^{\circ}\text{Brix} = 16,742 + (12,241 \cdot \theta_{PMP})$	0,173	0,791	0,003

*°Brix – sólidos solúveis totais do caldo; θ_{PMP} – umidade no ponto de murcha permanente.

**Valor de probabilidade associada ao teste t.

Com relação a análise de regressão linear múltipla entre a °Brix e as variáveis de planta (HC, DC, NCM e MC) no espaçamento LT, observa-se na tab. 34 a equação para a estimativa do °Brix. Nota-se que a regressão não foi significativa a 5% de probabilidade, indicando que não houve influência das variáveis de planta (HC, DC, NCM e MC) na estimativa do °Brix.

Tabela 34 – Equação da regressão múltipla entre °Brix e atributos da planta no espaçamento LT e suas medidas de qualidade de ajuste e valor de probabilidade.

Equação*	R ²	Erro padrão	p**
$^{\circ}\text{Brix} = 24,186 + (0,0154 \cdot \text{HC}) - (0,116 \cdot \text{DC}) - (0,105 \cdot \text{NCM}) - (3,640 \cdot \text{MC})$	0,123	1,041	0,195

* °Brix – teor de sólidos solúveis totais do caldo; HC – altura do colmo; DC - diâmetro do colmo; NCM – número de colmos por metro; MC – massa do colmo. **Valor de probabilidade associada ao teste t.

Essa ausência de relação significativa entre °Brix e as variáveis de planta no espaçamento LT pode ser melhor visualizada na tab. 35, pelos coeficientes de regressão e respectivos valores de probabilidade. Nota-se que os valores de probabilidades foram superiores a 5%, evidenciando que nenhuma variável de planta se relacionou com o °Brix, não havendo contribuição significativa na variabilidade deste atributo de planta.

Tabela 35 – Coeficientes da regressão múltipla entre °Brix e atributos da planta no espaçamento LT e o valor de probabilidade.

Variável explicativa*	Coeficiente da regressão (β)	p**
HC	0,0154	0,238
DC	- 0,116	0,168
NCM	- 0,105	0,312
MC	- 3,640	0,055

*HC – altura do colmo; DC - diâmetro do colmo; NCM – número de colmos por metro; MC – massa do colmo. **Valor de probabilidade associada ao teste t.

A tab. 36 apresenta a equação de regressão linear múltipla obtida para a estimativa do °Brix a partir de variáveis explicativas de solo no espaçamento LT. Foram utilizadas como variáveis explicativas a RP, o COT, a argila, a areia, a Pt, a Ma, a Ds, a θ_{CC} e a θ_{PMP} na análise de regressão, sendo as variáveis Mi e CAD eliminadas devido a colinearidade. Nota-se na tab. 36 que o valor de probabilidade do teste t da equação de regressão múltipla foi próximo a 0,05, o que pode indicar a presença de variáveis de solo relacionadas significativamente com o °Brix.

Tabela 36 – Equação da regressão múltipla entre °Brix e atributos do solo no espaçamento LT e suas medidas de qualidade de ajuste e valor de probabilidade.

Equação*	R ²	Erro padrão	p**
°Brix = 2.889 - (0.158*RP) + (5.622*COT) + (0.0231*Arg) + (0.0397*Are) - (9.528*Pt) - (6.783*Ma) - (1.204*Ds) + (6.371* θ_{PMP}) - (3.353* θ_{CC})	0.313	0.978	0.062

* °Brix – teor de sólidos solúveis totais do caldo; RP – resistência a penetração; COT – carbono orgânico total; Arg – argila; Are – areia; Pt – porosidade total; Ma – macroporosidade; Ds – densidade do solo; θ_{CC} – umidade na capacidade de campo; θ_{PMP} – umidade no ponto de murcha permanente.

**Valor de probabilidade associada ao teste t.

Para melhor visualizar se houve ou não a presença de variáveis do solo com relação significativa com o °Brix no espaçamento LT, pode-se observar os valores de probabilidade apresentados na tab. 37 para cada β da equação de regressão múltipla. Nota-se que o coeficiente da regressão para a variável COT apresentou probabilidade inferior a 5%, se relacionando significativamente com o °Brix. Como essa foi a única variável do solo no espaçamento LT que apresentou significância, não foi necessário realizar a transformação dos dados, pois a relação entre o °Brix e COT pode ser descrita por uma equação de regressão linear simples.

Tabela 37 – Coeficientes da regressão múltipla entre °Brix e atributos do solo no espaçamento LT e o valor de probabilidade

Variável explicativa*	Coeficiente da regressão (β)	p**
RP	-0,158	0,739
COT	5,622	0,005
Arg	0,0231	0,131
Are	0,0397	0,107
Pt	-9,528	0,625
Ma	-6,783	0,741
Ds	-1,204	0,871
θ_{CC}	6,371	0,725
θ_{PMP}	-3,353	0,829

*RP – resistência a penetração; COT – carbono orgânico total; Arg – argila; Are – areia; Pt – porosidade total; Ma – macroporosidade; Ds – densidade do solo; θ_{CC} – umidade na capacidade de campo; θ_{PMP} – umidade no ponto de murcha permanente.

**Valor de probabilidade associada ao teste t.

A tab. 38 apresenta a equação entre o °Brix e o COT que descreve linearmente a relação significativa e positiva entre essas duas variáveis. Varella et al. (2012) afirma que o °Brix pode ser dependente da adubação, do controle de pragas e doenças, da umidade, grau de compactação do solo, entre outros. Conforme Silva et al. (2012) o carbono orgânico é um atributo dinâmico e tem grande influência sobre as condições químicas, físicas e biológicas do solo. O carbono orgânico confere melhor estrutura ao solo e por consequência pode favorecer o desenvolvimento da cana-de-açúcar e o acúmulo de açúcares, se relacionando positivamente com o °Brix. Percebe-se na tab. 38 que embora significativa a equação, o R^2 foi muito baixo. Isto pode ter ocorrido devido ao grande número de amostras (CHARNET et al., 1999)

Tabela 38 – Equação da regressão entre °Brix e COT no espaçamento LT e suas medidas de qualidade de ajuste e valor de probabilidade.

Equação*	R^2	Erro padrão	p**
°Brix = 17,319 + (3,536*COT)	0,0969	1,023	0,028

* °Brix – teor de sólidos solúveis totais do caldo; COT – carbono orgânico total. **Valor de probabilidade associada ao teste t.

6. Conclusões

As variáveis de planta e de solo apresentaram diferenças na estrutura de dependência espacial em cada espaçamento entre linha, avaliadas pelo autocorrelograma.

As variáveis massa do colmo e °Brix apresentaram diferentes estruturas de crosscorrelações em cada espaçamento entre linhas, sendo a variável massa do colmo no espaçamento LD com maior número de relações espaciais com os atributos do solo.

A contribuição das variáveis do solo na massa do colmo e no °Brix é mais expressiva nas maiores densidade de plantio (espaçamento combinado duplo e triplo), principalmente as variáveis relacionadas à disponibilidade de água.

O espaçamento combinado duplo proporcionou o maior rendimento em toneladas de colmos por hectare. No entanto, há necessidade de continuar com o experimento por pelo menos mais dois anos para indicar a melhor estratégia de manejo para cultivo da cana-de-açúcar neste tipo de solo no RS.

7. Referências Bibliográficas

AHUJA, L. R. & NIELSEN, D. R. Field soil-water relations. In: STEWART, B. A.; NIELSEN, D. R. (eds.). **Irrigation of agricultural crops**. Madison: American Society of Agronomy, 1990. p.143-190.

ALEXANDER, A. G. **Sugarcane physiology**. Amsterdam: Elsevier, 1973. 152p.

ALMEIDA, C. X.; CENTURION, J. F.; FREDDI, O. S.; JORGE, R. F.; BARBOSA, J. C. Funções de pedotransferência para a curva de resistência do solo à penetração. **R. Bras. Ci. Solo**, v.32, n.6, 2008b.

ALMEIDA, I. R. de.; SILVA, S. D. dos A. e.; STEINMETZ, S. Aspectos gerais e específicos do zoneamento agroclimático para a cultura da cana-de-açúcar no estado do Rio Grande do Sul. In: SIMPÓSIO ESTADUAL DE AGROENERGIA, 2.; REUNIÃO TÉCNICA ANUAL DE AGROENERGIA, 2., 2008, Porto Alegre. **Anais...** Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2008b.

ALMEIDA, I. R. de; SILVA, S. D. dos A. e. Paralelo 30: futuro eixo para produção de etanol no RS? 2011. Artigo em Hypertexto. Disponível em: <http://www.cpact.embrapa.br/imprensa/artigos/2011/35_etanol_Ivan_Sergio.pdf> Acesso em 18 Jun. 2012.

ANP - AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO. Anuário Estatístico Brasileiro de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis de 2010. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/?pg=31286#Se__o_4>. Acesso em: 4 Ago. 2012.

BAQUERO, J. E.; RALISCH, R.; MEDINA, C. C.; FILHO, J. T.; GUIMARÃES, M. F. Soil Physical Properties and Sugarcane Root Growth in a Red Oxisol. **R. Bras. Ci. Solo**, v.36, p.63-70, 2012.

BAYER, C. & MIELNICZUL, J. Conteúdo de nitrogênio total num solo submetido a diferentes métodos de preparo e sistemas de cultura. **R. Bras. Ci. Solo**, v.21, p.235-239, 1997.

BAVER, L.D.; GARDNER, W.H. & GARDNER, W.R. **Soil physics**. New York, J. Wiley, 1972. 498p.

BEAUCLAIR, E. G. F.; SCARPARI, M. S. Noções Fitotécnicas. In: RIPOLI, T. C. C.; RIPOLI, M. L. C.; CASAGRANDE, D. V.; IDE, B. Y. (Org.). **Plantio de cana-de-açúcar: estado da arte**. Piracicaba: Livrocere, 2006. p.80-91.

BELL, M. J. & GARSIDE, A. L. Shoot and stalk dynamics and the yield of sugarcane crops in tropical and subtropical Queensland, Australia. **Field Crop. Res.**, Amsterdam, v.92, n.2, p.231-248, 2005.

BEUTLER A. N. & CENTURION, J. F. Efeito do conteúdo de água e da compactação do solo na produção de soja. **Pesq. Agropec. Bras.**, Brasília, v.38, n.7, p.849-856, 2003.

BEUTLER, A. N.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; FERREIRA, M. M.; CRUZ, J. C.; PEREIRA FILHO, I. A. Resistência à penetração e permeabilidade de Latossolo Vermelho distrófico Típico sob Sistemas de Manejo na Região dos Cerrados. **R. Bras. Ci. Solo**, v.25, p.167-177, 2001.

BLAIR, G. J.; CHAPMAN, L.; WHITBREAD, A. M.; BALLCOELHO, B.; LARSEN, P.; TIESSEN, H. Soil carbon changes resulting from sugarcane trash management at two locations in Queensland, Australia, and in North-East Brazil. **Austr. J. Soil Res.**, v. 36, p.873-882, 1998.

BLAIR, N. Impact of cultivation and sugar-cane green trash management on carbon fractions and aggregate stability for a Chromic Luvisol in Queensland, Australia. **Soil Till. Res.**, v.55, p.183-191, 2000.

BOYCE, J. P. Plant crop results of row spacing experiment at Pongola. In: ANUAL CONGRESS OF THE SOUTH AFRICAN SUGAR ASSOCIATION, 42., Durban, 1968. **Proceedings**. Durban: South African Sugar Association. 1968. p.136-141.

BRADFORD, J. M.; GUPTA, S. C. Compressibility, In: KLUTE, A., ed. **Methods of soil analysis**. Part 1. 2 ed. Madison, American Society of Agronomy, 1986. p.279-492.

BRAUNACK, M. V.; ARVIDSSON, J.; HÅKANSSON, I. Effect of harvest traffic position on soil conditions and sugarcane (*Saccharum officinarum*) response to environmental conditions in Queensland, Australia. **Soil Till. Res.**, v.89, p.103-121, 2006.

BRAUNACK, M. V. & MCGARRY, D. Traffic control and tillage strategies for harvesting and planting of sugarcane (*Saccharum officinarum*) in Australia. **Soil Till. Res.**, v.89, n.1, p.86-102, 2006.

BRAUNACK, M. V. & PEATEY, T.C. Changes in soil physical properties after one pass of a sugarcane haulout unit. **Aust. J. Exp. Agric.** v.39, p.733-742, 1999.

BRESSIANI, José Antonio. **Seleção sequencial em cana-de-açúcar**. 2001. 159f. Tese (Doutorado em Agronomia)-Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

BULL, TA & BULL, JK. Increasing sugarcane yields through higher planting density – preliminary results. pp 166-168 In: Wilson, JR., Hogarth, DM, Campbell, JA and Garside, AL (Eds). **Sugarcane: Research Towards Efficient and Sustainable**

Production. CSIRO Div of Tropical Crops and Pastures, Brisbane, Australia, 1996. p. 166-168.

CÂMARA, G. M. S. Ecofisiologia da cultura da cana-de-açúcar. In: CÂMARA, G.M.S. **Produção de cana de açúcar**. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 1993. p.31-64.

CAMARGO, O. A. & ALLEONI, L. R. F. **Compactação do solo e desenvolvimento das plantas**. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 1997. 132p.

CAMARGO, O. A. **Compactação do solo e desenvolvimento de plantas**. Campinas, Fundação Cargill, 1983. 44p.

CAMBARDELLA, C. A. et al. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa Soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v.58, n.5, p.1501-1511, 1994.

CANELLAS, L. P.; VELLOSO, A. C. X.; MARCIANO, C. R.; RAMALHO, J. F. G. P.; RUMJANEK, V. M.; REZENDE, C. E.; SANTOS, G. A. Propriedades químicas de um Cambissolo cultivado com cana-de-açúcar, com preservação do palhço e adição de vinhaça por longo tempo. **R. Bras. Ci. Solo**, v.27, p.935-944, 2003.

CARVALHO, S.R. et al. Tassement des sols ferrallitiques Podzólico Vermelho Amarelo sous culture de canne à sucre (état de Rio de Janeiro, Brésil): apport d'une analyse de la porosité associée a une connaissance détaillée de la phase minérale. **Série Pedologie, Cahiers Orstom**, v.26, n.1, p.195-212, 1991.

CASSEL, D. K.; WENDROTH, O.; NIELSEN, D. R. Assessing spatial variability in an agricultural experiment station field: opportunities arising from spatial dependence. **Agron J.**, v.92, p.706-714, 2000.

CASTRO, P. R. C. & CHRISTOFFOLETI, P. J. Fisiologia da cana-de-açúcar In: MENDONÇA, A. F. In. **Cigarrinha da cana-de-açúcar: Controle biológico**. 1.ed. Maceió: Insecta, 2005. p.3-48.

CAVALCANTE, E.G.S. **Variabilidade espacial de atributos físicos e químicos de um Latossolo Vermelho-Escuro sob diferentes condições de uso e manejo**. 1999. 199f. Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual Paulista de São Paulo.

CERVIGNI, S. A. P. **Comportamento da cana-de-açúcar variedade de RB72 454 em diversos espaçamentos**. Tese (graduação)-Faculdade de Engenharia Campus de Ilha Solteira. 2005.

CGEE - CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. **Bioetanol combustível: uma oportunidade para o Brasil**. Brasília: 2009. p.536.

CHARNET, R.; FREIRE, C. D. L.; CHARNET, E. M.; BONVINO, H. **Análise de modelos de regressão linear com aplicações**. Campinas: Unicamp, 1999. 356p.

CLEMENTS, H. F. Factors affecting the germination of sugar cane. **Hawaiian Planters Record**. v.44, p.117-146, 1940.

CLEMENTS, H. F.; SHIGUERA, G.; AKAMINE, E. K. **Factors affecting the grow of sugarcane**. Honolulu: University of Hawaii, 1962. 90 p.

CONSECANA-SP - Conselho dos Produtores de Cana-de-açúcar, Açúcar e Alcool do Estado de São Paulo. **Manual de Instruções**. Piracicaba: CONSECANA-SP, 2006.

COUTO, E.G.; KLAMT, E.; STEIN, A. Variabilidade espacial de propriedades do solo influenciadas pela agricultura, em escala regional. In: MEIRELLES, M. S. P.; CAMARA, G.; ALMEIDA, C. M. (Eds). **Geomática, modelos e aplicações ambientais**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2007. p.409-443.

DAVIS, J. C. **Statistics and data analysis in geology**. 2.ed. New York: John Wiley & Sons, 1986. 646p.

DIAS JÚNIOR, M. S. Compactação do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. V. H.; SHAEFER, C. E. G. R. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v.1, p.55-94.

DILLEWIJN, C. V. **Botany of sugarcane**. Waltham: Chonica Botanica, 1952.

DOURADO NETO, D.; TIMM, L. C.; OLIVEIRA, J. C. M.; REICHARDT, K.; BACCHI, O. O. S.; TOMINAGA, T. T.; CASSARO, F. A. M. State-space approach for the analysis of soil water content and temperature in a sugarcane crop. **Sci. Agric.**, v.56, p.1215-1221, 1999.

ELY, L. Quebra na soja provocada pela seca tende a frear economia no Rio Grande do Sul. Disponível em: < <http://agricultura.ruralbr.com.br/noticia/2012/04/quebra-na-soja-provocada-pela-seca-tende-a-frear-economia-no-rio-grande-do-sul-3723443.html>> Acesso em: 7 Jan. 2013.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3.ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 2013. 374p.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 2.ed. (Documento 132). Rio de Janeiro, RJ: Embrapa Solos, 2011.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Zoneamento agroecológico da cana-de-açúcar: expandir a produção, preservar a vida, garantir o futuro**. (Documento 110). Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2009.

FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. **El Estado Mundial de la Agricultura y la Alimentación. Biocombustibles: perspectivas, riesgos y oportunidades**. Roma: 2008, 162p.

FARONI, C. E. **Sistemas radiculares de cana-de-açúcar e identificação de raízes metabolicamente ativas**. 2004. 68p. Dissertação (Mestrado)-Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

FERNANDES, A. C. Autorização da colheita da cana-de-açúcar. In: SEMANA DE FERMENTAÇÃO ALCÓOLICA "JAIME ROCHA DE ALMEIDA", 4., 1985, Piracicaba. Anais...Piracicaba: Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", USP, 1985. p.12-21.

FERNANDES, A. C. **Cálculos na agroindústria da cana-de-açúcar**. 2.ed. Piracicaba: STAB, 2003. 240p.

FERREIRA, F. M.; BARROS, W. S.; SILVA, F. L.; BARBOSA, M. H. P.; CRUZ, C. D.; BASTOS, I. T. Relações fenotípicas e genotípicas entre componentes de produção em cana-de-açúcar. **Bragantia**, v.66, n.4, p.605-610. 2007.

FERREIRA, M. M. Caracterização física do solo. In: JONG VAN LIER, Q. (Org.). **Física do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. p.1-27.

FILHO, J. T.; BARBOSA, G. M. C.; RIBON, A. A. Physical properties of dystrophic red latosol (oxisol) under different agricultural uses. **R. Bras. Ci. Solo**, v.34, p.925-933, 2010.

FISHER, R. A. **The Design of Experiments**. Edinburgh: Oliver and Boyd, 1942.

GÉRIK, T. J.; MORRISON Jr. J. E.; CHICHESTER, F. W. Effects of controlled traffic on soil physical properties and crop rooting. **Agron. J.** v.79, p.434-438, 1987.

GOMES, F.P. **Curso de estatística experimental**. 13.ed. Piracicaba: USP, 1990. 467p.

GOOVAERTS, P. **Geostatistics for natural resources evaluation**. New York: Oxford University Press, 1997. 476p.

GOTWAY, C. A. & HARTFORD, A. H. Geostatistical methods for incorporating auxiliary information in the prediction of spatial variables. **J. Agric. Biol. Environ. Statis.** v.1, p.17-39, 1996.

GRANDESPE. Histórico da Destilaria. Disponível em: <<http://www.grandespe.com.br>>. Acesso em: 20 dez. 2011.

GREGO, C. R.; VIEIRA, S. R.; XAVIER, M. A. Spatial variability of some biometric attributes of sugarcane plants (variety IACSP93-3046) and its relation to physical and chemical soil attributes. **Bragantia**, v.69, p.107-119, 2010.

HAMMAD, E. A. & DAWELBEIT, M. I. Effect of tillage and field condition on soil physical properties, cane and sugar yields in Vertisols of Kenana Sugar Estate, Sudan. **Soil Till. Res.**, v.62, p.101-109, 2001.

HILLEL, D. **Fundamentals of soil physics**. Amherst, University of Massachusetts, Academic Press: 1982. 413p.

HILLEL, D. **Introduction to Environmental Soil Physics**. New York: Academic Press, 2003, 494p.

HILLEL, D. **Introduction to soil physics**. San Diego: Academic Press, 1982, 264p.

HORII, J. **A cana-de-açúcar como matéria-prima**. Piracicaba: Visão Agrícola, p.88-93, 2004.

HUI, S.; WENDROTH, O.; PARLANGE, M. B.; NIELSEN, D. R. Soil variability: Infiltration relationships of agroecosystems. **J. Balkan Eco.**, v.1, n.2, p. 21-40, 1998.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Confronto das Safras de 2012 e 2013 - Brasil – Setembro 2013, Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/agropecuaria/lspa/lspa_201309_5.shtm> Acesso em: 28/10/2013

INMAN-BAMBER, N. G. Sugarcane water stress criteria for irrigation and drying off. **Field Crop. Res.**, v.89, p.107-122, 2004.

JIMENEZ, R. L.; GONÇALVES, W. G.; ARAÚJO FILHO, J. V.; ASSIS, R. L.; PIRES, F. R.; SILVA, G. P. Crescimento de plantas de cobertura sob diferentes níveis de compactação em um latossolo vermelho. **Rev. Bras. Eng. Agríc. Ambient.**, v.12, n.2, p.116-121, 2008.

JORGE, J. A.; CAMARGO, O. A.; VALADARES, J. M. A. S. Condições físicas de um Latossolo Vermelho Escuro quatro anos após a aplicação de lodo de esgoto e calcário. **R. Bras. Ci. Solo**, v.15, n.3, p.237–240, 1991.

KIEHL, E. J. Manual de edafologia. São Paulo, Agronômica Ceres, 1979. 262p

KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. In: BLACK, C. A., ed. **Methods of Soil Analysis. I. Physical and mineralogical methods**. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986. p.635-662.

KRIGE, D. G. A statistical approach to some basic mine evaluation problems on the Witwatersrand. **Johannesburg Chemistry Metallurgy Mining Society South African**. v.52, n.6, p.119-139, 1951.

KUINCHTNER, A. & BURIOL, G. A. Clima do Estado do Rio Grande do Sul segundo a classificação climática de Köppen e Thornthwaite. **Disciplinarum Scientia**, v.2, p.171-182, 2001.

LAMERS, J. G.; PERDOCK, U.D.; LUMKES, L. M.; KLOUSTER, J. J. Controlled traffic farming systems in the Netherlands. **Soil Till. Res.**, v.8, p.65–76, 1986.

LLANILLO, R. F.; RICHART, A.; TAVARES FILHO, J.; GUIMARÃES, M. F.; FERREIRA, R. R. M. Evolução de Propriedades Físicas do solo em função dos Sistemas de Manejo com Culturas Anuais. Semina: **Ci. Agr.**, v.27, p.205-220, 2006.

MACHADO, E. C.; PEREIRA, A. R.; CAMARGO, M. B. P. D.; FAHL, J. I. Relações radiométricas de uma cultura de cana-de-açúcar. **Bragantia**, v.44, n.1, p.229-238, 1985.

MACHADO, R. S.; RIBEIRO, R. V.; MARCHIORI, P. E. R.; MACHADO, D. F. S. P.; MACHADO, E. C.; LANDELL, M. D. A. Respostas biométricas e fisiológicas ao déficit hídrico em cana-de-açúcar em diferentes fases fenológicas. **Pesq. Agropec. Bras.**, v.44, n.12, p.1575-1582, 2009.

MAGRO, J. A. (Coord.) Necessidades para colher cana mecanicamente. In: SEMINÁRIO DE MECANIZAÇÃO AGRÍCOLA: PERDA DE PRODUTIVIDADE, Sociedade dos Técnicos Açucareiros e Alcooleiros do Brasil, STAB, Ribeirão Preto. 2002. CD-ROOM.

MARAFON, A. C. **Análise quantitativa de crescimento em cana-de-açúcar: Uma introdução ao procedimento prático.** (Documentos/Embrapa Tabuleiros Costeiros)-Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2012. 29 p.

MATHERNE, R. J. Influence of interrow spacing and planting rate on stalk population and cane yield in Louisiana. In: **Congress of The International Society of Sugar Cane Technologists**. p. 640-645. 1972.

MATHERON, G. Principles of geostatistics. **Econ Geol**, v.58, n.8, p.1246-1266, 1963.

MATHERON, G. **The theory of regionalized variables and its applications**, Paris, Les Cahiers du Centre de Morphologie Mathématique de Fontainebleau. 1971. 211p.

MATSUOKA, S.; GARCIA, A. A. F.; ARIZONO, H. Melhoramento da cana-de-açúcar. In: BORÉM, A. (Org.). **Melhoramento de espécies cultivadas**. Viçosa: MG: UFV, 2005. p.225-274.

CEMETRS – Centro Estadual de Meteorologia. Atlas Climático do Rio Grande do Sul. Disponível em: <
http://www.cemet.rs.gov.br/lista/676/Atlas_Clim%C3%A1tico_do_Rio_Grande_do_Sul
> Acesso em: 06 Jan. 2014.

MCGRAW, T. Soil test level variability in south ern Minnesota. Better crops. **Potash & Phosphate Institute**, v.78, n.4, p.24-25, 1994.

MERCANTE, E. et al. Variabilidade espacial e temporal da resistência mecânica do solo à penetração em áreas com e sem manejo químico localizado. **R. Bras. Ci. Solo**, v.27, p.1149-1159, 2003.

MONTEITH, J. L. & MOSS C. J. Climate and the efficiency of crop production in Britain. **Philos. T. Roy. Soc. B.**, v.281, p.277-294, 1977.

MORAES NETO, L. Aumento do espaçamento de plantio de cana e o reflexo na colheita mecanizada. In: MAGRO, J. A. (Coord.) SEMINÁRIO DE MECANIZAÇÃO AGRÍCOLA: PERDA DE PRODUTIVIDADE, Sociedade dos Técnicos Açucareiros e Alcooleiros do Brasil, STAB, Ribeirão Preto. 2002. CD-ROOM.

MORKOC, F.; BIGGAR, J. W.; NIELSEN, D. R.; ROLSTON, D. E. Analysis of soil water content and temperature using state-space approach. **Soil Sci. Soc. Am. J.** v.49, p.798–803, 1985.

MULLINS, J. A.; SEWELL, J. I.; JABLONSKI, J. S. **Controlled traffic, seedbed tillage practices and cotton yield.** Tennessee Agricultural Experiment. Station Bulletin 566, 1977.

NASERI, A. A.; JAFARI S.; ALIMOHAMMADI, M. Soil Compaction Due to Sugarcane (*Saccharum officinarum*) Mechanical Harvesting and the Effects of Subsoiling on the Improvement of Soil Physical Properties. **J. Appl. Sci.**, v.7, p.3639-3648, 2007.

NETER, J.; KUTNER, M.H.; NACHTSHEIM, C.J.; LI, W. **Applied Linear Statistical Models.** 5 ed. New York: McGraw-Hill, 2004.

NIELSEN, D. R.; ALEMI, M. H. Statistical opportunities for analyzing spatial and temporal heterogeneity of field soils. **Plant Soil**, v.115, p.285–296, 1989.

OLIVEIRA, J.; VIDIGAL FILHO, P. S.; TORMENA, C. A.; PEQUENO, M. G.; SCAPIM, C. A.; MUNIZ A. S.; SAGRILO, E. Influência de Sistemas de preparo do solo na Produtividade da mandioca (*Manihot esculenta* , Crantz), **R. Bras. Ci. Solo**, v.25, p.443-450, 2001.

OLIVEIRA, M. P.; TAVARES, M. H. F.; URIBE-OPAZO, M. A.; TIMM, L. C. Selecting statistical models to study the relationship between soybean yield and soil physical properties. **R. Bras. Ci. Solo**, v.35, n.1, 2011.

OLIVEIRA, M. P.; TAVARES, M. H. F.; NIEDZIALKOSKI, R. K.; TIMM, L. C. Modelo em espaço de estados para o relacionamento entre atributos do solo e produtividade da soja. **Millenium**, v.44, p.41-53, 2013.

PACHECO, E. P. **Estudo da compressibilidade e qualidade de um Argissolo amarelo cultivado com cana-de-açúcar nos tabuleiros costeiros de Alagoas.** 2010. 106 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Departamento de Agronomia, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife. 2010.

PANKHURST, C. E.; MAGAREY, R. C.; STIRLING, G. R.; BLAIR, B. L.; BELL, M. J.; GARSIDE, A. L. Management practices to improve soil health and reduce the effects of detrimental soil biota associated with yield decline of sugarcane in Queensland, Australia. **Soil Till. Res.**, v.72, n.2, p.125-137, 2003.

PARANHOS, S. B. **Espaçamentos e densidades de plantio em cana-de-açúcar.** Piracicaba, 1972. 109p. Tese (Doutorado)-Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

R CORE TEAM R: A language and environment for statistical computing, R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria, (2013).URL [http://www,R-project.org/](http://www.R-project.org/).

REICHARDT, K. & TIMM, L. C. **Solo, Planta e Atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. 1.ed. São Paulo: Manole, 2004. 478p.

REICHARDT, K. & TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. 2.ed. São Paulo: Manole, 2012. 500 p.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Revista Ciência & Ambiente**. v.27, p.29-48, 2003.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J.; HORN, R.; HÅKANSSON, I. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil Till. Res.**, v.102, n.2, p.242-254, 2009.

RICHARDS, L. A. Physical conditions of water in soil. In: BLACK, C. A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: American Society for Testing and Materials, 1965. p.128-152.

RICHART, A.; TAVARES FILHO, J.; BRITO, O. R.; LLANILLO, R. F.; FERREIRA, R. Compactação do solo: causas e efeitos. **Semina: Ciências Agrárias**. Londrina. v.26, n.3, p.321-344, 2005.

ROBERTSON, M. J.; MUCHOW, R. C.; DONALDSON, R. A.; INMAN-BAMBER, N. G.; WOOD, A. W. Estimating the risk associated with drying-off strategies for irrigated sugarcane before harvest. **Aust. J. Agr. Res.**, v.50, p.65-77, 1999.

ROQUE, A. A. de O.; SOUZA, Z. M. de; BARBOSA, R. S.; SOUZA, G. S. de. Controle de tráfego agrícola e atributos físicos do solo em área cultivada com cana-de-açúcar. **Pesq. Agropec. Bras.**, v.45, n.7, p.744-750, 2010.

SANTI, L. A. **Relações entre indicadores de qualidade do solo e a produtividade das culturas em áreas com agricultura de precisão**. 2007. 175p. Tese (Doutorado em Ciência do solo)-Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

SECCO, D.; ROS, C. O. da.; SECCO, J. K.; FIORIN, J. E. Atributos físicos e produtividade de culturas em um Latossolo Vermelho Agiloso sob diferentes sistemas de manejo. **R. Bras. Ci. Solo**, v.29, p.407-414, 2005.

SEVERIANO, E. C.; OLIVEIRA, G. C.; CURI, N.; DIAS JUNIOR, M. S. Potencial de uso e qualidade estrutural de dois solos cultivados com cana-de-açúcar em Goianésia (GO). **R. Bras. Ci. Solo**, v.33, p.159-168, 2009.

SEVERO, Jr. & CARDOSO, L. Cana-de-açúcar: Lei ambiental impõe mecanização da lavoura da cana: Confederação Nacional de Agricultura, 2009. Disponível em:

<http://www.cna.org.br/site/down_anexo.php?q=e22_20341mecanizaçãodacana.pdf
> Acesso em 16 janeiro 2012.

SHIH, S. F. et al. Sugarcane stalk distribution in two row spacings. In: **Seventeenth Congress of the International Society of Sugar Cane Technologists**. Vol. I. ISSCT, p.38-51, 1980b.

SHIH, S. F.; GASCHO, G. J. Relationships among stalk length, leaf area, and dry biomass of sugarcane. **Agron. J.**, v.72, n.2, p.309-313, 1980a.

SHUMWAY, R. H. **Applied statistical time series analyses**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1988. 379p.

SHUMWAY, R. H.; BIGGAR, J. W.; MORKOC, F.; BAZZA, M.; NIELSEN, D. R.; Time and frequency domain analyses of field observations. **Soil Sci. Soc. Am. J.** v.147, p. 286–299, 1989.

SILVA, A. P. & KAY, B. D. Estimating the least limiting water range of soils from properties and management. **Soil Sci. Soc. Am. J.** v.61, p.877-883, 1997.

SILVA, A. L. C. da & COSTA, W. A. J. M. de. Varietal variation in growth, physiology and yield of sugarcane under two contrasting water regimes. **Trop. Agr. Res.**, v.16, p.1-12, 2004.

SILVA, L. S.; CAMARGO, F. A. O.; CERETTA, C. A. Composição da fase sólida orgânica do solo. In: MEURER, E.J. (Ed). **Fundamentos de química do solo**. Porto Alegre: Genesis. 2012. p.61-86.

SILVA, S. D. dos A. e; VERISSIMO, M. A. A.; EICHOLZ, E. D.; DAROS, E.; BESPALHOK FILHO, J. C.; OLIVEIRA, R. A. de. Avaliação de genótipos de cana-de-açúcar no Rio Grande do Sul, ciclo de cana planta, safra 2008/2009. In: SIMPÓSIO ESTADUAL DE AGROENERGIA, 3.; REUNIÃO TÉCNICA ANUAL DE AGROENERGIA, 3., Pelotas, 2010. **Anais do...** Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2010.

SILVA, S. D. dos A.; UENO, B.; DAROS, E.; ZAMBON, J. L. C.; FILHO, J. C. B. OLIVEIRA, R. A.; CASAGRANDE Jr. J. G. Ensaio de variedades de cana-de-açúcar Pelotas/RS, safra 2007/08, In: SIMPÓSIO ESTADUAL DE AGROENERGIA; REUNIÃO TÉCNICA ANUAL DE AGROENERGIA-RS, 2008, 2, Porto Alegre, **Anais do...**, Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2008.

SILVA, V. R.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em plantio direto. **Cienc. Rural**, v.34, n.2, p.399-406, 2004.

SINGELS, A. & SMIT, M. A. The effect of row spacing on an irrigated plant crop of sugarcane variety NCo376. **Proc S Afr Sug Technol Ass.** v.76, p.94-105, 2002.

SOUZA, G. S. de et al. Compressibilidade do solo e sistema radicular da cana-de-açúcar em manejo com e sem controle de tráfego. **Pesq. Agropec. Bras.**, v.47, n.4, p.603-612, ISSN 0100-204X, 2012.

SOUZA, Z. M. de.; BEUTLER, A. N.; PRADO, R. M.; BENTO, M. J. C. Efeito de sistemas de colheita de cana-de-açúcar nos atributos físicos de um Latossolo Vermelho. **Científica**, v.34, n.1, p.31-38, 2006a.

SOUZA, Z. M. de.; CAMPOS, M. C. C.; CAVALCANTE, I. H. L.; MARQUES Jr., J.; CESARIN, L. G.; SOUZA, S. R. de. Dependência espacial da resistência do solo à penetração e do teor de água do solo sob cultivo contínuo de cana-de-açúcar. **Cienc. Rural**, v.36, n.1, p.128-134, 2006.

SOUZA, Z. M. de.; PEREIRA, G. T.; BARBIERI, D. M. Variabilidade espacial da textura de um latossolo vermelho eutroférico sob cultivo de cana-de-açúcar. **Eng. Agríc.** v.24, n.2, 2004c.

SOUZA, Z. M.; JÚNIOR, J. M.; PEREIRA, G. T.; BENTO, M. J. Variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho sob cultivo de cana-de-açúcar. **Rev. Bras. Eng. Agric. Ambient.**, v.8, n.1, p.51-58, 2004a.

SOUZA, Z. M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T. Geoestatística e atributos do solo em áreas cultivadas com cana-de-açúcar. **Cienc. Rural**, v.40, n.1, p.48-56, 2010.

SOUZA, Z. M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo em diferentes formas do relevo sob cultivo de cana-de-açúcar. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 28, 2004b.

SOUZA, Z. M.; PRADO, R. M.; PAIXÃO, A. C. S.; CESARIN, L. G. Sistemas de colheita e manejo da palhada de cana-de-açúcar. **Pesq. Agropec. Bras.**, v.40, p.271-278, 2005.

SOUZA, Z. M.; SILVA, M. L. S.; GUIMARÃES, G. L.; CAMPOS, D. T. S.; CARVALHO, M. P.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial de atributos físicos em um Latossolo Vermelho distrófico sob semeadura direta em Selvíria (MS). **R. Bras. Ci. Solo**, v.25, p.699-707, 2001.

STOLF, R.; FERNANDES, J.; FURLANI NETO, V. L. **Recomendação para uso do penetrômetro do impacto, modelo IAA/PLANALSUCAR – Stolf**. São Paulo: MIC/IAA/PNMCA – PLANALSUCAR, 1983. 8p. (Série penetrômetro de impacto – Boletim, 1)

STOLF, R.; THURLER, A. M.; BACCHI, O. O. S.; REICHARDT, K. Method to estimate soil macroporosity and microporosity based on sand content and bulk density. **R. Bras. Ci. Solo**, v.35, p.447-459, 2011.

STONE L. F. & SILVEIRA, P. M. Efeitos do sistema de preparo e da rotação de culturas na porosidade e densidade do solo. **R. Bras. Ci. Solo**, v.25, p.395-401, 2001.

STONE, L. F.; GUIMARÃES, C. M.; MOREIRA, J. A. A. Compactação do solo na cultura do feijoeiro. I: Efeitos nas propriedades físico-hídricas do solo. **R. Bras. Eng. Agric. Ambient.** v.6, p.207-212, 2002.

STEVENSON, F.J. **Humus chemistry: Genesis, Composition, Reactions**. 2.ed. New York: John Wiley & Sons, 1994. 496p.

SYNGENTA®. Tecnologias Syngenta®. Revista Canavieiros, edição de fevereiro de 2013. Disponível em: <http://www.revistacanavieiros.com.br/imagens/pdf/3eb4a7a3785c1bee706afc9ffb1615a0.pdf>. Acesso em: 13 nov. 2013.

TAVARES FILHO, J. & RIBON, A. A. Resistência do solo à penetração em resposta ao número de amostras e tipo de amostragem. **R. Bras. Ci. Solo**, v.32, p.487-494, 2008.

TAYLOR, H. M.; ROBERSON, G. M.; PARKER Jr., J. J. Soil strength-root penetration relations to medium to coarse-textured soil materials. **Soil Sci.**, v.102, p.18-22, 1966.

TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A. **Análises de solos, plantas e outros materiais**, Porto Alegre: UFRGS, 1995, 174 p.

TIMM, L. C. **Efeito do manejo da palhada da cana-de-açúcar nas propriedades físico-hídricas de um solo**. 2002. 115 p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura Luis de Queiroz, Piracicaba.

TIMM, L. C.; REICHARDT, K.; OLIVEIRA, J. C. M.; CASSARO, F. A. M.; TOMINAGA, T. T.; BACCHI, O. O. S.; DOURADO-NETO, D. Sugarcane production evaluated by the state-space approach. **J. Hydrol.** v.272, n.1, p.226-237, 2003.

TIMM, L.C.; REICHARDT, K.; OLIVEIRA, J.C.M.; CASSARO, F.A.M.; TOMINAGA T.T.; BACCHI, O.O.S.; DOURADO-NETO, D.; NIELSEN, D.R. State-space approach to evaluate the relation between soil physical and chemical properties. **R. Bras. Ci. Solo**, v.28, p.49-58, 2004.

TORMENA, C. A. & ROLOFF, G. Dinâmica da resistência à penetração de um solo sob plantio direto. **R. Bras. Ci. Solo**, v.20, p.333-339, 1996.

TORMENA, C. A.; ROLOFF, G.; SÁ, J. C. M. Propriedades físicas do solo sob plantio direto influenciadas por calagem, preparo inicial e tráfego. **R. Bras. Ci. Solo**, v.22, p.301-309, 1998.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. Soil physical quality of a Brazilian Oxisol under two tillage systems using the least limiting water range approach. **Soil Till. Res.**, v.52, p.223-232, 1999.

TOWNSEND, C. R. Recomendações técnicas para o cultivo da cana-de-açúcar forrageira em Rondônia. Embrapa. Rondônia, n.21, p.1-5, 2000.

TULLBERG, J. N. Tractor-based systems for traffic control in Australia. **Landwards**. v.52, p.12-15, 1997.

TULLBERG, J. N.; ZIEBARTH, P. J.; LI YUXIA. Tillage and traffic effects on runoff. **Austr. J. Soil Res.**, v.39, p.249-257, 2001.

UNICA - UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR. Dados e Cotações – Estatística (2009). Disponível em <<http://www.unica.com.br/dadosCotacao/estatistica/>>. Acesso em 4 Ago. 2012.

UNICA – União da Indústria de Cana-de-açúcar. Relatório Final Safra 2012/2013 - Região Centro-Sul do Brasil. Disponível em: <<http://www.unicadata.com.br/listagem.php?idMn=83>>. Acesso em: 28 Out. 2013b

UNICA – União da Indústria de Cana-de-açúcar. Área Cultivada Com Cana-De-Açúcar - Área Total por Estado (2011). Disponível em: <<http://www.unicadata.com.br/historico-de-area-ibge.php?idMn=33&tipoHistorico=5&acao=visualizar&idTabela=1360&produto=%C3%81rea+colhida&anoIni=2011&anoFim=2011&estado=RS>>. Acesso em: 28 Out. 2013c

UNICA – União da Indústria de Cana-de-açúcar. Setor Sucroenergético - Mapa de Produção (2013). Disponível em: <http://www.unica.com.br/mapa-da-producao/>. Acesso em: 28 Out. 2013a

VAN LIER, Q. DE JONG. Oxigenação do sistema radicular: Uma abordagem física. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 25, n. 1, p. 233-238, 2001.

VARELLA, C. A. A.; BARROS, V. R.; BAESSO, M. M.. Mapeamento da variabilidade espacial do brix em cana-de-açúcar. (Nota técnica) Engenharia na agricultura, Viçosa - MG, v.20, n.2, p.112-117, 2012.

VASCONCELOS, A. C. M. **Desenvolvimento do sistema radicular da parte aérea de socas de cana-de-açúcar sob dois sistemas de colheita: crua mecanizada e queimada manual**. 2002. 140p. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal.

VERISSIMO, M. A. A. **Desempenho de genótipos de cana-de-açúcar no Rio Grande do Sul**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Produção Agrícola Familiar. Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel. Universidade Federal de Pelotas. Pelotas, 2011.

VERISSIMO, M. A. A.; SILVA, S. D. DOS A.; AIRES, R. F.; DAROS, E; PANZIERA, W. Adaptabilidade e estabilidade de genótipos precoces de cana-de-açúcar no Rio Grande do Sul. **Pesq. Agropec. Bras.**, Brasília, v.47, n.4, 2012.

VERMA, R. S. Ratoon decline in sugar cane. **Coop. Sugar**. v.26, p.349-351, 1995.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo, In: Novais, R. F. et al. (Ed.) **Tópicos em ciência do solo**, Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. v.1, p.1-53, 2000.

VIEIRA, S. R.; MILLETE, J. A.; TOPP, G. C.; REYNOLDS, W.D. Handbook for Geostatistical analysis of variability in soil and meteorological parameters, In: ALVAREZ, V. H. (Ed.) **Tópicos em Ciência do Solo 2**, Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p.1-45, 2002.

WARRICK, A. W.; MYERS, D. E.; NIELSEN, D. R. Geostatistical methods applied to soil science. In: KLUTE, A. (ed.). **Methods of Soil Analysis**. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy; Soil Science Society of America, cap. 3, p.53-82, 1986.

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field, In: HILLEL, D. (Ed.) **Applications of soil physics**. New York: Academic Press, p.319-344, 1980.

WENDROTH, O. et al. Predicting yield of barley across a landscape: a state-space modeling approach. **J. of Hydrol.**, v.272, p.250–263, 2003.

WENDROTH, O.; KOSZINSKI, S.; PENA-YEWTUKHIV, E. Spatial Association among Soil Hydraulic Properties, Soil Texture, and Geoelectrical Resistivity. **Vadose Zone Journal**, v.5, p.341–355, 2006.

WESLEY, R. A.; SMITH, L. A. Response of soybean to deep tillage with controlled traffic on clay soil. **Trans. ASAE**, v.34, n.1, p.113 –119, 1991.

WIEDENFELD, R. P. Water stress during different sugarcane growth periods on yield and response to N fertilization. **Agr. Water Manage.**, v. 43, n. 2, p. 173-182, 2000.

WILLIFORD, J. R.; A controlled traffic cropping system for the Mississippi delta. **Int. Conf. Soil Dynamics**. v.5, p.1132–1138, 1985.

YATES, E. The comparative advantages of systematic and randomized arrangements in the design of agricultural and biological experiments, **Biometrika**. v.30, p.444-466, 1938.

ZIMBACK, C. R. L. **Análise especial de atributos químicos de solo para o mapeamento da fertilidade do solo**. 2001. 114p. Tese (Livre Docência)-UNESP/FCA, Botucatu.

8. Apêndices

Apêndice 1

Tabela 1 – Valores dos atributos de planta em cada ponto de observação no espaçamento entre linhas simples.

Ponto/Estaca	Atributos de Planta				
	Brix ^o médio	Altura média (mm)	Diâmetro do colmo médio (mm)	Número de colmos no ponto	Massa do colmo (Kg)
1	22.133	186.667	24.453	8.000	0.881
2	21.133	201.667	26.033	12.000	1.067
3	21.567	175.000	28.367	10.000	0.970
4	20.867	208.333	25.733	7.000	1.050
5	21.400	220.000	24.000	17.000	1.000
6	20.700	216.667	25.667	6.000	1.275
7	20.133	210.000	24.400	10.000	1.105
8	19.667	198.333	24.617	11.000	0.977
9	20.167	201.667	24.567	12.000	0.979
10	20.933	198.333	23.833	10.000	1.125
11	21.300	206.667	23.520	11.000	1.000
12	20.267	180.000	22.000	15.000	0.900
13	20.700	203.333	26.500	12.000	0.860
14	19.100	206.667	29.403	13.000	0.958
15	19.333	221.667	25.233	15.000	0.827
16	20.233	218.333	25.400	15.000	1.050
17	21.467	173.333	25.480	5.000	0.920
18	21.133	200.000	25.557	8.000	1.190
19	20.800	185.000	26.367	6.000	1.040
20	20.000	223.333	30.283	12.000	1.192
21	20.367	213.333	28.587	10.000	1.380
22	20.700	205.000	26.090	5.000	1.320
23	21.300	161.667	27.550	7.000	1.020
24	21.367	191.667	30.267	8.000	1.000
25	21.350	166.667	28.750	9.500	1.060
26	21.500	190.000	27.000	11.000	1.105
27	19.433	205.000	21.133	16.000	0.791
28	21.200	186.667	23.867	9.000	0.744
29	21.733	223.333	29.767	9.000	1.110
30	20.233	190.000	27.920	11.000	1.068
31	20.300	188.333	25.800	5.000	1.190
32	22.133	210.000	27.433	8.000	1.131
33	20.567	213.333	27.233	6.000	1.133
34	21.167	206.667	23.833	10.000	1.020
35	19.967	200.000	24.783	11.000	1.127
36	20.833	186.667	25.883	8.000	1.181
37	20.000	186.667	25.567	6.000	1.075
38	20.733	206.667	25.067	15.000	1.093
39	19.433	183.333	24.120	3.000	0.883
40	20.267	176.667	23.167	10.000	0.865
41	20.500	210.000	26.567	9.000	1.106
42	20.000	208.333	24.867	11.000	1.150
43	20.767	218.333	22.967	10.000	1.010
44	21.200	226.667	28.050	10.000	1.090
45	19.967	200.000	26.690	7.000	0.971
46	20.000	193.333	29.400	6.000	1.200
47	21.733	200.000	25.200	6.000	0.975
48	22.833	183.333	25.933	9.000	1.044
49	22.200	220.000	30.033	14.000	1.104
50	21.667	203.333	24.853	12.000	0.930

Apêndice 2

Tabela 2 – Valores dos atributos de solo em cada ponto de observação no espaçamento entre linhas simples.

Ponto/Estaca	Atributos do solo													
	RP(MPa)	COT	Silte	Argila	Areia	Argila natural	Pt média (m³.m3)	Ma média (m³.m3)	Mi média (m³.m3)	Ds média (g.cm-3)	θCC média (m³.m-3)	θPMP média (m³.m-3)	AD média (mm)	Dp (g.cm-3)
1	1.238	0.875	241.093	553.907	205.000	171.65	0.5568	0.1383	0.4185	1.29	0.4044	0.2852	23.85	2.86
2	1.383	0.999	252.333	545.667	202.000	171.00	0.6067	0.1995	0.4072	1.28	0.3845	0.2930	18.30	2.84
3	1.178	0.992	214.813	559.520	225.667	173.30	0.6021	0.1851	0.4170	1.28	0.3803	0.3025	15.58	2.89
4	0.976	0.858	212.827	565.840	221.333	180.20	0.5783	0.1482	0.4301	1.27	0.3977	0.2891	21.73	2.93
5	0.845	0.920	217.080	559.920	223.000	171.60	0.6126	0.2279	0.3847	1.16	0.3476	0.2584	17.85	2.89
6	0.675	0.823	193.727	552.607	253.667	172.90	0.5991	0.2220	0.3772	1.17	0.3403	0.2563	16.80	2.95
7	1.108	0.798	212.053	567.280	220.667	180.75	0.5643	0.1559	0.4084	1.26	0.3813	0.2887	18.51	2.91
8	0.758	0.789	208.307	575.360	216.333	179.35	0.5747	0.1653	0.4094	1.24	0.3861	0.2744	22.35	2.93
9	0.759	0.813	223.707	572.960	203.333	180.55	0.5551	0.1516	0.4035	1.18	0.3658	0.2564	21.88	2.89
10	0.690	0.777	196.187	598.480	205.333	188.95	0.5985	0.2130	0.3854	1.18	0.3658	0.2572	21.71	2.91
11	0.967	0.756	247.907	593.760	175.00	184.65	0.5841	0.1674	0.4167	1.18	0.3862	0.2832	20.60	2.87
12	0.962	0.793	253.307	603.360	170.00	166.80	0.5729	0.1660	0.4069	1.22	0.3977	0.2846	22.63	2.86
13	0.870	0.802	257.680	596.653	169.00	156.90	0.5850	0.2011	0.3839	1.19	0.3638	0.2640	19.96	2.88
14	0.568	0.859	205.707	588.960	205.333	175.80	0.5943	0.2308	0.3635	1.14	0.3362	0.2496	17.32	2.89
15	0.635	0.839	265.453	555.213	179.333	176.45	0.6136	0.2131	0.4005	1.16	0.3852	0.2732	22.40	2.81
16	0.717	0.904	212.160	575.840	212.000	174.45	0.6065	0.2184	0.3881	1.18	0.3637	0.2760	17.55	2.9
17	0.799	0.901	208.173	564.160	227.667	180.40	0.5619	0.1551	0.4068	1.21	0.3844	0.2760	21.67	2.93
18	0.739	0.857	239.307	562.360	198.333	178.00	0.6062	0.1941	0.4120	1.24	0.4041	0.2931	22.20	2.85
19	0.575	0.932	258.067	573.600	168.333	179.40	0.6198	0.2151	0.4047	1.23	0.3877	0.2833	20.88	2.88
20	0.875	0.953	201.560	567.440	231.000	173.80	0.5783	0.1821	0.3962	1.22	0.3679	0.2833	16.93	2.93
21	0.646	0.894	240.013	561.987	198.000	170.30	0.6058	0.2061	0.3997	1.20	0.3840	0.2672	23.36	2.88
22	0.656	0.872	251.233	561.433	187.333	175.95	0.6164	0.1964	0.4200	1.19	0.3959	0.2765	23.87	2.88
23	0.991	0.938	238.607	546.393	215.000	163.30	0.6260	0.2031	0.4230	1.19	0.3887	0.3172	14.30	2.87
24	0.889	0.918	233.093	557.573	209.333	167.70	0.6226	0.1865	0.4361	1.18	0.3994	0.3094	18.00	2.89
25	1.041	0.885	251.253	554.080	194.667	173.80	0.5792	0.1512	0.4279	1.22	0.3906	0.2997	18.17	2.91
26	0.736	0.802	211.553	568.780	219.667	181.00	0.6245	0.2161	0.4084	1.21	0.3849	0.2942	18.13	2.93
27	0.688	0.812	234.493	554.840	210.667	181.90	0.6172	0.1819	0.4353	1.21	0.3966	0.2869	21.95	2.95
28	0.732	0.868	237.853	546.480	215.667	172.20	0.6187	0.2010	0.4177	1.22	0.3851	0.2851	20.00	2.9
29	0.853	0.832	238.307	565.360	196.333	180.15	0.6252	0.2458	0.3794	1.19	0.3536	0.2722	16.29	2.93
30	0.892	0.780	229.567	569.433	201.000	187.70	0.6331	0.2306	0.4025	1.21	0.3686	0.2886	16.01	2.91
31	0.959	0.828	243.267	536.733	220.000	187.40	0.6427	0.1765	0.4661	1.25	0.4309	0.3229	21.61	2.85
32	0.777	0.804	251.067	548.600	200.333	188.45	0.6178	0.2016	0.4162	1.18	0.3817	0.2940	17.53	2.82
33	0.665	0.764	227.220	541.447	231.333	187.65	0.5914	0.1689	0.4225	1.23	0.3912	0.2899	20.26	2.86
34	0.919	0.694	222.907	548.093	229.000	191.80	0.6092	0.1653	0.4439	1.20	0.4025	0.3169	17.12	2.91
35	0.865	0.828	226.287	528.047	245.667	183.40	0.6108	0.2226	0.3882	1.20	0.3481	0.2781	14.00	2.89
36	0.982	0.798	226.693	523.973	249.333	181.20	0.5956	0.1929	0.4027	1.25	0.3648	0.2928	14.41	2.87
37	1.071	0.806	227.400	529.600	243.000	185.20	0.6232	0.2203	0.4029	1.26	0.3692	0.3012	13.60	2.9
38	0.677	0.838	214.673	532.327	253.000	185.40	0.6262	0.2198	0.4064	1.27	0.3728	0.2981	14.94	2.88
39	1.316	0.805	214.087	530.913	255.000	177.20	0.6000	0.2272	0.3727	1.24	0.3454	0.2887	11.32	2.9
40	1.075	0.855	233.653	539.680	226.667	178.35	0.6361	0.2319	0.4041	1.21	0.3662	0.2901	15.24	2.93
41	0.727	0.842	234.667	525.333	240.000	179.90	0.6269	0.2516	0.3753	1.21	0.3554	0.2779	15.50	2.9
42	0.687	0.889	227.600	522.400	250.000	171.65	0.6306	0.2551	0.3756	1.16	0.3582	0.2816	15.31	2.92
43	1.009	0.940	217.093	532.240	250.667	176.45	0.5981	0.1469	0.4512	1.31	0.3539	0.2848	13.82	2.91
44	1.157	0.885	239.373	528.960	231.667	176.50	0.5913	0.2042	0.3871	1.29	0.3497	0.2881	12.32	2.87
45	0.779	0.899	218.813	543.520	237.667	182.85	0.6032	0.2438	0.3594	1.18	0.3223	0.2586	12.75	2.89
46	1.145	0.907	232.280	536.720	231.000	177.25	0.5854	0.1953	0.3901	1.23	0.3546	0.2902	12.87	2.91
47	1.151	0.806	218.720	545.280	236.000	185.95	0.5867	0.1702	0.4165	1.23	0.3931	0.2985	18.92	2.9
48	0.652	0.889	214.440	552.560	233.000	188.00	0.5814	0.2005	0.3809	1.18	0.3505	0.2632	17.48	2.89
49	1.127	0.921	202.133	547.200	250.667	179.80	0.5846	0.1631	0.4215	1.25	0.3330	0.2686	12.89	2.99
50	0.570	1.016	215.287	551.713	233.000	170.95	0.5928	0.2035	0.3893	1.17	0.3738	0.2786	19.04	2.89

Apêndice 3

Tabela 3 – Valores dos atributos de planta em cada ponto de observação no espaçamento entre linhas combinado duplo.

Ponto/Estaca	Atributos de Planta				
	Brixº médio	Altura média (mm)	Diâmetro do colmo (mm)	Número de colmos no ponto	Massa do colmo (Kg)
1	20.500	136.667	19.067	7.500	0.580
2	21.633	176.667	28.000	11.500	0.804
3	21.367	173.333	22.933	4.000	0.594
4	20.000	200.000	25.393	9.500	0.774
5	20.500	176.667	24.833	6.500	0.812
6	20.800	183.333	25.383	8.000	0.800
7	19.700	193.333	27.767	5.500	0.732
8	20.433	186.667	22.233	9.000	0.889
9	19.400	201.667	22.483	10.000	0.845
10	20.567	203.333	25.100	6.000	0.958
11	20.800	153.333	24.143	9.000	0.728
12	18.730	203.333	23.407	10.500	0.864
13	19.100	180.000	26.067	7.500	0.813
14	21.570	140.000	21.700	7.500	0.620
15	20.567	163.333	24.367	6.000	0.650
16	20.767	200.000	25.100	10.000	0.808
17	20.033	183.333	19.700	7.500	0.667
18	19.700	168.333	23.400	4.500	0.867
19	20.700	166.667	27.567	5.500	0.836
20	20.567	180.000	25.400	7.500	0.883
21	20.133	156.667	19.700	7.000	0.921
22	20.267	180.000	24.933	10.000	1.010
23	19.867	193.333	25.633	6.500	1.185
24	21.033	180.000	27.633	9.500	1.274
25	20.633	160.000	22.883	3.000	1.392
26	20.633	206.667	25.567	8.000	1.047
27	20.967	170.000	25.000	6.500	1.096
28	21.433	190.000	26.167	8.500	1.103
29	20.733	190.000	28.533	6.500	1.081
30	19.000	190.000	22.697	5.500	1.195
31	20.167	196.667	26.333	10.000	0.975
32	19.533	173.333	26.283	8.500	0.982
33	20.200	150.000	25.293	7.500	1.013
34	19.800	183.333	24.833	6.000	1.258
35	20.767	156.667	24.400	9.500	0.934
36	20.600	153.333	26.167	8.000	1.341
37	19.533	186.667	20.700	6.000	1.458
38	19.233	161.667	23.267	7.500	1.147
39	19.133	193.333	26.933	7.500	1.220
40	22.100	163.333	23.550	8.000	1.147
41	21.200	163.333	24.000	7.000	1.121
42	20.567	170.000	22.533	7.500	1.110
43	20.100	153.333	24.033	3.500	1.250
44	21.600	183.333	27.050	7.500	1.163
45	22.300	146.667	25.600	5.500	1.118
46	21.100	140.000	25.600	6.500	1.023
47	21.067	173.333	26.767	8.000	1.216
48	22.100	113.333	26.667	6.500	0.950
49	21.250	156.667	26.100	4.000	1.269
50	22.200	136.667	27.367	12.500	1.086

Apêndice 4

Tabela 4 – Valores dos atributos de solo em cada ponto de observação no espaçamento entre linhas combinado duplo.

Ponto/Estaca	Atributos do solo													
	RP(MPa)	COT (%)	Silte (g.Kg-1)	Argila (g.Kg-1)	Areia (g.Kg-1)	Argila natural (g.Kg-1)	Pt (m³.m3)	Ma (m³.m3)	Mi (m³.m3)	Ds (g.cm-3)	θCC (m³.m-3)	θPMP (m³.m-3)	AD média (mm)	Dp (g.cm-3)
1	0.75	0.98	212.52	571.8	215.7	175.9	0.63	0.26	0.36	1.09	0.34	0.25	17.51	2.93
2	1.25	0.99	197.60	572.4	230.0	191.9	0.57	0.14	0.43	1.29	0.41	0.33	15.95	2.95
3	1.65	0.87	212.53	592.8	194.7	200.0	0.59	0.16	0.43	1.26	0.40	0.31	18.19	2.88
4	1.43	0.92	227.03	584.6	188.3	196.2	0.58	0.15	0.43	1.31	0.41	0.32	19.45	2.88
5	1.11	0.97	203.29	585.0	211.7	183.0	0.54	0.12	0.42	1.36	0.40	0.33	14.63	2.93
6	0.79	0.99	213.27	582.7	204.0	186.0	0.59	0.20	0.39	1.16	0.38	0.29	18.08	2.92
7	2.37	0.96	210.92	592.7	196.3	186.8	0.55	0.11	0.43	1.37	0.42	0.34	16.05	2.89
8	1.17	0.98	199.01	600.0	201.0	187.3	0.60	0.20	0.40	1.25	0.39	0.32	14.47	2.96
9	0.80	1.02	208.91	585.8	205.3	177.6	0.62	0.21	0.41	1.18	0.39	0.30	16.46	2.86
10	0.63	0.95	206.92	596.1	197.0	175.3	0.63	0.24	0.39	1.09	0.36	0.27	17.89	2.91
11	0.76	0.98	242.90	591.4	165.7	194.9	0.60	0.21	0.40	1.16	0.37	0.29	16.29	2.93
12	1.16	0.90	236.30	596.4	167.3	196.9	0.63	0.22	0.40	1.18	0.38	0.28	19.19	2.90
13	0.83	0.93	239.63	598.0	162.3	196.0	0.64	0.23	0.41	1.18	0.38	0.28	20.92	2.93
14	0.90	1.07	240.97	607.0	152.0	191.8	0.57	0.13	0.44	1.23	0.42	0.30	23.14	2.96
15	0.60	1.01	240.10	604.2	155.7	198.2	0.60	0.21	0.39	1.15	0.37	0.28	17.87	2.94
16	1.04	1.17	226.00	609.0	165.0	187.6	0.58	0.12	0.46	1.28	0.42	0.32	21.71	2.94
17	0.88	1.07	229.03	613.6	157.3	193.5	0.56	0.12	0.43	1.21	0.41	0.31	19.81	2.93
18	0.96	0.98	241.57	606.4	152.0	191.1	0.59	0.17	0.42	1.18	0.39	0.29	19.02	2.97
19	1.07	1.13	238.93	613.1	148.0	187.8	0.63	0.24	0.39	1.14	0.35	0.28	15.29	2.92
20	0.86	1.03	254.60	608.7	136.7	197.0	0.62	0.23	0.39	1.15	0.35	0.28	15.26	2.90
21	0.66	1.16	237.92	596.1	166.0	181.0	0.60	0.23	0.38	1.10	0.35	0.27	16.38	2.83
22	0.69	1.09	214.51	599.8	185.7	196.1	0.58	0.14	0.44	1.17	0.41	0.31	19.73	2.88
23	0.99	0.94	218.68	632.3	149.0	209.8	0.62	0.22	0.39	1.18	0.38	0.30	15.67	2.89
24	0.74	0.97	252.07	623.9	124.0	205.1	0.64	0.24	0.40	1.11	0.37	0.29	15.50	2.91
25	0.68	1.09	235.19	618.1	146.7	196.1	0.64	0.27	0.37	1.07	0.34	0.26	15.09	2.94
26	0.82	1.18	230.37	609.0	160.7	194.5	0.60	0.18	0.42	1.15	0.39	0.31	15.67	2.86
27	0.48	1.13	223.32	595.7	181.0	191.6	0.63	0.25	0.38	1.08	0.35	0.28	14.47	2.84
28	1.45	0.97	261.05	603.6	135.3	177.2	0.58	0.16	0.42	1.25	0.39	0.34	10.01	2.99
29	1.77	1.09	258.63	610.0	131.3	190.1	0.56	0.14	0.42	1.26	0.40	0.35	11.06	2.92
30	0.75	0.91	251.10	619.6	129.3	197.1	0.63	0.22	0.41	1.15	0.39	0.31	15.58	2.99
31	1.07	0.86	243.17	603.2	153.7	196.7	0.61	0.21	0.40	1.16	0.38	0.31	14.45	2.87
32	0.83	0.81	204.33	628.0	167.7	211.6	0.63	0.24	0.39	1.11	0.36	0.30	13.39	2.91
33	1.58	0.83	222.72	625.3	152.0	200.9	0.60	0.19	0.41	1.25	0.39	0.33	11.93	2.92
34	0.56	0.84	225.17	616.2	158.7	201.5	0.69	0.30	0.38	1.11	0.38	0.28	20.13	2.92
35	0.76	0.81	211.01	616.3	172.7	197.7	0.65	0.23	0.42	1.22	0.41	0.31	20.20	2.89
36	0.64	0.94	211.27	592.1	196.7	191.7	0.67	0.26	0.40	1.18	0.39	0.29	20.22	2.86
37	0.71	0.92	215.09	602.2	182.7	197.3	0.62	0.21	0.41	1.20	0.40	0.30	20.20	2.94
38	0.69	1.01	248.07	597.3	154.7	191.6	0.63	0.16	0.47	1.26	0.43	0.32	21.39	2.93
39	1.07	0.96	242.76	612.2	145.0	199.5	0.60	0.17	0.42	1.22	0.41	0.30	22.65	2.95
40	0.89	1.07	233.12	594.9	172.0	187.4	0.63	0.23	0.41	1.20	0.39	0.30	18.38	2.91
41	1.12	1.03	240.35	590.3	169.3	177.8	0.59	0.16	0.43	1.30	0.42	0.33	17.00	2.96
42	1.29	0.98	250.83	606.7	142.5	190.4	0.61	0.20	0.41	1.23	0.39	0.34	10.04	2.98
43	0.83	1.03	239.77	607.2	153.0	189.5	0.66	0.25	0.41	1.19	0.39	0.34	10.70	2.88
44	1.31	1.02	238.40	607.6	154.0	188.2	0.61	0.21	0.40	1.20	0.38	0.33	10.35	2.96
45	1.98	0.99	245.87	608.8	145.3	185.8	0.61	0.15	0.46	1.37	0.45	0.39	11.47	2.87
46	0.90	0.96	218.97	595.4	185.7	187.7	0.63	0.20	0.44	1.25	0.42	0.35	13.34	2.88
47	1.23	1.01	229.65	585.7	184.7	185.9	0.63	0.22	0.41	1.23	0.39	0.34	10.04	2.86
48	1.16	0.93	252.73	593.6	153.7	189.2	0.63	0.19	0.44	1.27	0.42	0.35	12.96	2.94
49	1.34	1.01	240.47	597.9	161.7	192.4	0.61	0.14	0.46	1.33	0.45	0.38	12.41	2.83
50	1.71	0.92	229.56	589.4	181.0	191.8	0.61	0.17	0.44	1.32	0.40	0.34	12.10	2.89

Apêndice 5

Tabela 5 – Valores dos atributos de planta em cada ponto de observação no espaçamento entre linhas combinado triplo.

Ponto/Estaca	Atributos de Planta				
	Brix ^º médio	H (mm)	DC (mm)	NCM	Peso do colmo
1	20.533	183.333	20.667	4.667	1.000
2	19.633	166.667	24.317	9.000	0.800
3	20.967	180.000	24.967	10.000	0.635
4	21.300	166.667	23.467	5.000	0.777
5	21.200	173.333	24.920	7.667	0.861
6	21.167	173.333	24.733	3.000	0.850
7	20.567	166.667	26.160	4.000	0.871
8	21.133	170.000	21.260	5.000	0.690
9	19.900	163.333	21.900	10.000	0.752
10	20.733	123.333	22.050	4.333	0.635
11	20.167	170.000	21.677	9.000	0.828
12	20.467	156.667	24.360	4.667	0.904
13	22.000	173.333	22.597	5.333	0.878
14	17.933	180.000	22.250	7.333	0.843
15	17.900	176.667	25.407	3.667	0.914
16	20.333	163.333	25.030	6.667	0.815
17	20.433	183.333	18.707	4.667	1.032
18	19.633	173.333	24.170	6.000	0.878
19	19.400	146.667	22.057	6.333	0.811
20	20.800	163.333	23.633	3.667	0.891
21	21.100	180.000	23.500	6.667	0.915
22	21.200	193.333	21.533	5.000	0.910
23	19.367	170.000	26.067	3.667	1.032
24	19.600	163.333	22.200	5.000	0.913
25	18.700	153.333	23.433	5.000	0.820
26	18.233	180.000	26.290	4.000	0.988
27	19.500	150.000	24.923	5.333	0.772
28	19.167	146.667	23.637	7.333	0.720
29	21.900	160.000	22.533	4.000	0.754
30	22.567	166.667	22.990	6.333	0.905
31	21.767	166.667	22.437	6.667	0.763
32	20.333	160.000	20.777	5.667	0.709
33	21.767	146.667	23.267	4.667	0.707
34	20.467	156.667	21.783	7.000	0.660
35	22.000	173.333	25.233	5.000	0.783
36	19.767	133.333	24.807	5.333	0.841
37	20.967	176.667	25.733	3.667	0.923
38	20.467	156.667	22.357	4.000	0.875
39	20.500	160.000	23.833	4.667	1.004
40	20.833	163.333	22.753	6.333	0.663
41	22.033	156.667	25.183	6.000	0.739
42	21.433	173.333	19.567	6.333	0.792
43	19.667	170.000	26.977	6.000	0.742
44	21.233	163.333	22.520	6.000	0.797
45	20.733	180.000	23.633	5.000	0.697
46	20.067	163.333	22.317	5.000	0.963
47	21.233	176.667	20.640	4.667	0.864
48	19.033	170.000	23.800	4.000	0.833
49	19.833	166.667	22.783	3.333	0.825
50	20.100	156.667	21.207	5.000	0.910

Apêndice 6

Tabela 6 – Valores dos atributos de solo em cada ponto de observação no espaçamento entre linhas combinado triplo.

Ponto/Estaca	Atributos do solo													Dp (g.cm-3)
	RP(MPa)	COT	Silte (g.Kg-1)	Argila (g.Kg-1)	Areia (g.Kg-1)	Argila natural	Pt (m³.m3)	Ma (m³.m3)	Mi (m³.m3)	Ds (g.cm-3)	θCC (m³.m-3)	θPMP (m³.m-3)	AD média (mm)	
1	0.874	0.866	227.1	605.5	167.3	182.2	0.6489	0.2085	0.4404	1.19	0.3903	0.2959	18.89	2.97
2	1.665	0.878	235.8	603.2	161.0	179.6	0.6061	0.1692	0.4369	1.28	0.3924	0.3297	12.53	2.98
3	1.438	0.889	230.9	607.1	162.0	191.1	0.6128	0.1783	0.4345	1.27	0.3933	0.3017	18.32	2.97
4	1.620	0.841	218.6	608.4	173.0	193.6	0.5926	0.1491	0.4436	1.28	0.4073	0.3427	12.92	2.95
5	1.808	0.844	220.3	609.7	170.0	191.9	0.6190	0.1835	0.4355	1.26	0.3974	0.3352	12.43	2.98
6	0.943	0.828	212.9	632.7	154.3	197.7	0.6381	0.2170	0.4212	1.20	0.3912	0.3137	15.50	2.97
7	1.366	0.850	220.4	621.9	157.7	192.3	0.6413	0.2143	0.4269	1.23	0.3891	0.3164	14.54	2.99
8	0.956	0.751	214.2	632.2	153.7	185.4	0.6161	0.1808	0.4354	1.25	0.4171	0.3365	16.12	2.95
9	0.876	0.732	216.9	625.8	157.3	177.3	0.6121	0.1529	0.4592	1.28	0.4464	0.3547	18.34	2.98
10	0.888	0.797	242.4	613.6	144.0	201.8	0.6186	0.1526	0.4659	1.27	0.4537	0.3589	18.96	2.95
11	0.932	0.708	233.1	625.9	141.0	197.1	0.6355	0.1920	0.4436	1.20	0.4292	0.3396	17.91	2.97
12	0.574	0.885	234.6	617.4	148.0	192.5	0.6652	0.2492	0.4160	1.11	0.4009	0.3202	16.14	2.97
13	0.841	0.915	231.4	635.0	133.7	184.9	0.6132	0.1684	0.4448	1.22	0.4333	0.3435	17.96	2.91
14	0.773	0.805	217.9	655.8	126.3	198.9	0.6519	0.2283	0.4236	1.17	0.4031	0.3189	16.84	2.92
15	0.685	0.864	223.4	634.6	142.0	195.7	0.6806	0.2651	0.4154	1.13	0.3984	0.3050	18.68	2.92
16	0.752	0.913	225.9	640.7	133.3	203.0	0.6449	0.2366	0.4083	1.15	0.3964	0.3250	14.28	2.89
17	1.082	0.873	233.4	629.3	137.3	196.1	0.6110	0.1639	0.4470	1.26	0.4325	0.3541	15.67	2.91
18	1.542	0.958	263.5	617.1	119.3	192.5	0.5996	0.1431	0.4565	1.31	0.4427	0.3779	12.96	2.95
19	1.029	0.898	244.5	629.5	126.0	195.7	0.6048	0.1880	0.4167	1.17	0.3991	0.3332	13.17	2.92
20	1.658	0.803	249.5	613.8	136.7	193.6	0.5941	0.1496	0.4445	1.29	0.4345	0.3773	11.44	2.96
21	0.776	0.979	253.5	615.5	131.0	193.3	0.6297	0.2012	0.4285	1.21	0.4131	0.3434	13.94	2.89
22	0.808	0.821	252.2	620.5	127.3	180.2	0.6321	0.2317	0.4004	1.18	0.3847	0.3247	12.00	2.91
23	1.028	0.859	251.8	639.5	108.7	194.1	0.5974	0.1613	0.4361	1.23	0.4198	0.3472	14.50	2.9
24	1.026	0.914	243.6	631.7	124.7	197.0	0.6390	0.2054	0.4336	1.18	0.4136	0.3339	15.95	2.86
25	1.472	0.869	247.4	635.6	117.0	196.7	0.6366	0.1849	0.4517	1.27	0.4309	0.3554	15.09	2.94
26	1.435	0.851	244.9	637.4	117.7	186.0	0.6302	0.1500	0.4802	1.32	0.4598	0.3651	18.94	2.93
27	1.718	0.763	241.8	652.2	106.0	190.8	0.6049	0.1339	0.4710	1.32	0.4496	0.3602	17.87	2.96
28	1.187	0.803	232.4	654.6	113.0	195.7	0.6178	0.1565	0.4613	1.24	0.4400	0.3470	18.60	2.92
29	2.227	1.291	248.0	653.7	98.3	188.5	0.6100	0.1345	0.4755	1.33	0.4577	0.3677	17.98	2.9
30	2.761	0.844	227.8	658.2	114.0	182.4	0.6169	0.1160	0.5009	1.42	0.4824	0.3850	19.49	2.93
31	1.763	0.975	224.7	641.9	133.3	176.3	0.6217	0.1459	0.4758	1.28	0.4533	0.3661	17.44	2.94
32	0.950	0.947	238.0	638.3	123.7	169.2	0.5963	0.1603	0.4360	1.17	0.4231	0.3230	20.03	2.9
33	0.704	0.884	224.6	645.1	130.3	192.8	0.6059	0.1953	0.4105	1.12	0.3977	0.3013	19.26	2.93
34	0.982	0.860	226.5	646.8	126.7	194.2	0.5983	0.1739	0.4244	1.22	0.4101	0.3219	17.63	2.96
35	0.964	0.798	219.4	650.6	130.0	171.6	0.5806	0.1403	0.4403	1.21	0.4281	0.3241	20.80	2.94
36	0.805	0.908	230.7	647.3	122.0	191.5	0.6034	0.1719	0.4315	1.18	0.4150	0.3126	20.47	2.9
37	1.324	0.945	239.3	642.4	118.3	176.2	0.6051	0.2026	0.4025	1.17	0.3882	0.3144	14.75	2.95
38	0.782	0.901	219.0	647.3	133.7	191.2	0.6245	0.2003	0.4242	1.15	0.4050	0.2930	22.40	2.98
39	0.890	0.881	236.4	641.0	122.7	194.8	0.5773	0.1730	0.4043	1.14	0.3934	0.3080	17.08	2.95
40	1.094	0.907	233.0	640.0	127.0	190.7	0.6669	0.2226	0.4443	1.19	0.4054	0.3107	18.94	2.91
41	0.776	0.994	235.6	661.7	102.7	181.9	0.6150	0.1460	0.4690	1.19	0.4220	0.3148	21.44	2.93
42	3.639	1.092	242.2	663.1	94.7	183.0	0.5748	0.1000	0.4748	1.43	0.4498	0.3894	12.08	2.97
43	4.315	0.944	243.7	666.3	90.0	200.5	0.5549	0.0855	0.4694	1.42	0.4455	0.3810	12.90	2.96
44	2.691	0.979	237.4	662.0	100.7	200.2	0.5623	0.1088	0.4535	1.34	0.4264	0.3636	12.57	2.96
45	1.854	0.946	228.1	665.9	106.0	188.4	0.6114	0.1600	0.4515	1.30	0.4188	0.3437	15.03	2.92
46	1.823	0.853	241.5	657.8	100.7	190.4	0.5812	0.1293	0.4518	1.31	0.4166	0.3501	13.30	2.9
47	1.034	0.915	238.7	666.3	95.0	191.7	0.6200	0.1818	0.4382	1.23	0.4116	0.3349	15.33	2.9
48	2.119	0.869	238.9	675.1	86.0	195.4	0.5786	0.1088	0.4698	1.39	0.4423	0.3932	9.82	2.97
49	0.976	0.759	225.7	689.6	84.7	193.2	0.5958	0.1417	0.4541	1.20	0.4254	0.3537	14.33	2.89
50	1.289	0.817	212.6	702.4	85.0	192.5	0.5862	0.1431	0.4432	1.27	0.4114	0.3555	11.17	2.94