

# **UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS**

## **Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água**



**Tese**

**Espaçamentos entrelinhas em cultivo de cana-de-açúcar:  
parâmetros físicos do solo e componentes de rendimento**

**Wildon Panziera**

Pelotas, 2018

**WILDON PANZIERA**

**Espaçamentos entrelinhas em cultivo de cana-de-açúcar:  
parâmetros físicos do solo e componentes de rendimento**

Tese 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 Doutor em Ciências.

Orientadora: Profa. Dr<sup>a</sup>.Cláudia Liane Rodrigues de Lima

Co-Orientadores: Prof. Dr. Eloy Antonio Pauletto  
Pesq. Dr. Sergio Delmar dos Anjos e Silva

Pelotas, fevereiro de 2018.

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas  
Catalogação na Publicação

P199e Panziera, Wildon

Espaçamentos entrelinhas em cultivo de cana-d-  
-açúcar: parâmetros físicos do solo e componentes de  
rendimento / Wildon Panziera ; Cláudia Liane Rodrigues de  
Lima, orientadora. — Pelotas, 2018.

172 f.

Tese (Doutorado) — Programa de Pós-Graduação em  
Manejo e Conservação do Solo e da Água, Faculdade de  
Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas,  
2018.

1. Saccharum spp. 2. Espaçamentos entrelinhas  
alternativos. 3. Variabilidade espacial do solo. 4. Relação  
solo-planta. 5. Física do solo. I. Lima, Cláudia Liane  
Rodrigues de, orient. II. Título.

CDD : 633.61

Elaborada por Gabriela Machado Lopes CRB: 10/1842

Wildon Panziera

Espaçamentos entrelinhas em cultivo de cana-de-açúcar: parâmetros físicos do solo e componentes de rendimento

Tese aprovada, como requisito parcial, para obtenção do grau de Doutor em Ciências, Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas.

Data da Defesa: 23 de março de 2018

Banca examinadora:

.....  
Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Cláudia Liane Rodrigues de Lima (Orientador).  
Doutora em Solos e Nutrição de Plantas pela Universidade de São Paulo.

.....  
Prof. Dr. Álvaro Luiz Carvalho Nebel.  
Doutor em Ciências na Área de Concentração em Solos pela Universidade Federal de Pelotas.

.....  
Pesq. Dr. Adilson Luis Bamberg.  
Doutor em Ciências na Área de Concentração em Solos pela Universidade Federal de Pelotas.

.....  
Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Marla de Oliveira Farias.  
Doutora em Ciências na Área de Concentração em Solos pela Universidade Federal de Pelotas.

## Resumo

PANZIERA, Wildon. **Espaçamentos entrelinhas em cultivo de cana-de-açúcar: parâmetros físicos do solo e componentes de rendimento.** 2018. 172f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas - Brasil.

A compactação do solo tem causado declínio na produtividade dos canaviais brasileiros, consequência do tráfego de máquinas da colheita mecanizada. O uso de espaçamentos combinados é citado para controle deste problema. Poucos estudos foram realizados quanto ao comportamento espacial dos atributos físicos do solo e a relação destes com os atributos de planta. Os objetivos deste estudo foram: i) avaliar e relacionar parâmetros de solo e componentes de produção da cana-de-açúcar em três configurações de espaçamentos entrelinhas em dois ciclos de cultivo e ii) verificar a distribuição espacial da compactação do solo em dois tipos de espaçamento entrelinhas no ciclo de segunda soca. Para atender o primeiro objetivo, foram avaliados três tipos de espaçamentos entrelinhas da cultura: simples – 1,5 m (LS), combinado duplo – 0,4 x 1,7 m (LD) e combinado triplo - 0,3 x 0,3 x 1,5 m (LT). Foram coletadas amostras de solo na camada de 0,00-0,10 m em 2013 e 2014, durante os ciclos de primeira e segunda soca, respectivamente, ao longo de uma transeção de 50 m na linha da cultura. Foram determinados a densidade do solo (Ds), a porosidade total do solo (Pt), a macro (Ma) e a microporosidade do solo (Mi), a resistência à penetração do solo (RP), a umidade à base de volume na capacidade de campo ( $\theta_{CC}$ ), a umidade à base de volume no ponto de murcha permanente ( $\theta_{PMP}$ ) e a capacidade de água disponível (CAD). Em cada ponto da transeção avaliou-se: a altura do colmo (HC), o diâmetro do colmo (DC), sólidos solúveis totais ( $^{\circ}$ Brix), número de colmos por metro quadrado (NCM2) e massa do colmo (MC). Realizou-se a análise exploratória, a autocorrelação espacial, a crosscorrelação e a aplicação dos modelos de espaço de estados. Quanto ao segundo objetivo deste estudo, em 2016, durante o ciclo de cana de segunda soca, em dois tipos de espaçamentos (linha simples - 1,5 m e combinado duplo – 0,4 x 1,5 m), foram coletadas amostras com estrutura preservada na camada de solo de 0,00-0,10 m em uma grade amostral de 0,5 x 1 m, totalizando 100 pontos de amostragem para cada tipo de espaçamento. Foram determinados os atributos densidade do solo (Ds), porosidade total (Pt), macro (Ma) e microporosidade do solo (Mi) e resistência à penetração (RP). Realizou-se uma análise exploratória, análise de semivariância, confecção dos semivariogramas, ajuste dos modelos dos semivariogramas, krigagem e confecção dos mapas de cada variável para os dois espaçamentos. Os atributos físicos do solo explicaram de forma satisfatória a variabilidade espacial dos componentes de produção da cana-de-açúcar nos espaçamentos entrelinhas simples e triplo em ciclo de segunda soca por meio da abordagem de espaço de estados. Já em ciclo de cana de primeira soca a variabilidade dos componentes de produção da cana-de-açúcar não foi explicada pelos atributos físicos do solo. O espaçamento linha dupla apresentou a menor degradação da qualidade física do solo após dois ciclos de soqueira, indicando um controle da compactação do solo. A produtividade nos espaçamentos linha simples e linha dupla foram semelhantes com menor produtividade no espaçamento linha tripla nos dois ciclos de cultivo.

**Palavras-chave:** *saccharum spp.*; espaçamentos entrelinhas alternativos; variabilidade espacial do solo; relação solo-planta; física do solo.

## Abstract

PANZIERA, Wildon. **Combined spacing between rows: strategy to control the compaction of an Oxisol under sugarcane cultivation.** 2018. 172f. Thesis (doctorate degree) – Post-Graduation Program of Conservation and Management of Soil and Water. Federal University of Pelotas, Pelotas - Brazil.

Soil compaction has caused a decline in the productivity of Brazilian sugarcane plantations, a consequence of machine traffic in the mechanized harvest. The use of combined spacings is cited to control this problem. But few studies have been carried out regarding the spatial behavior of soil physical attributes and their relation to the plant attributes. The objectives of this study were: i) Evaluate and relate soil parameters and sugarcane production components in three configurations of spacing between rows in two crop cycles; and ii) To verify the spatial distribution of soil compaction in two configurations of spacing between rows in the third cycle after planting. To meet the first objective, three types of spacing between lines of the culture were evaluated: the row spacing single – 1.5 m (LS), double combined – 0.4 x 1.7 m (LD) and triple combined – 0.3 x 0.3 x 1.5 m (LT). Soil samples were collected in the 0.00-0.10 m layer in 2013 and 2014, during the second and third cycle after planting, respectively, along a 50 m transect in the culture rows. Were determined Bulk density (Ds), total soil porosity (Pt), macro (Ma) and microporosity of the soil (Mi), soil penetration resistance (RP), soil water contents at field capacity ( $\theta_{CC}$ ) and permanent wilting point ( $\theta_{PMP}$ ) and available water capacity (CAD). At each point of the transect was also evaluated attributes of plant: stalk height (H), stalk diameter (DC), total soluble solids (Brix), the number of stalk per square meter (NCM2) and stalk mass (MC). An exploratory analysis, a spatial autocorrelation, a cross-correlation and an application of state space models were performed. As for the second objective of this study, in 2016, during the third cycle after planting, in two types of spacing between rows (single – 1,5 m and double combined – 0,4 x 1,5 m), samples with a preserved structure were collected in the soil layer of 0.00 - 0.10m in a sample grid of 0.5m x 1m, totaling 100 sampling points for each type of spacing. Were determined Bulk density (Ds), total soil porosity (Pt), macro (Ma) and microporosity of the soil (Mi) and soil penetration resistance (RP). An exploratory analysis, semivariance analysis, semivariograms preparation, adjustment of semivariograms models, kriging and mapping of each variable for the two spacing were performed. The soil physical attributes satisfactorily explained the spatial variability of the components of sugarcane production in row spacing single and triple combined in the third cycle after planting through the state-space approach. In the second cycle after planting, the variability of the components of sugarcane production was not explained by the physical attributes of the soil. The double row spacing showed the lowest degradation of soil physical quality after two crop cycles, indicating a soil compaction control. The productivity in the single row spacing and double row spacing were similar with lower productivity in the triple row spacing in the two crop cycles.

**Keywords:** *Saccharum spp.*; alternative spacing between rows; soil spatial variability; soil-plant relationship; soil physics.

**Dedico:**

**À Deus**

**Aos meus pais Helvio e Maria**

**Aos meus irmãos Welden e Thales**

**À minha esposa 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.

Aos meus sogros Maria e Armando e meus cunhados Ana e Charles pelo apoio ao longo desse período do doutorado, pois nunca mediram esforços para ajudar a superar os desafios ao longo dessa caminhada.

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

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 seis anos de pós-graduação, pois a sua felicidade e alegria em trabalhar e querer fazer o bem 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 Professor Luís Carlos Timm, pela contribuição significativa no planejamento do projeto.

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

Ao pessoal do laboratório de física do solo e amigos que ajudaram na realização deste projeto com empenho, pela ajuda nas coletas de campo e nas análises laboratoriais das amostras, pois sem o apoio deles tudo seria mais difícil, em especial ao Leonir, João, Eduardo, Luciana, Thais Brod, Roger, Paulo, Sergio e Dona Ana.

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



Aos amigos Márcio e Mário pela amizade e conselhos ao longo dessa caminhada.  
À EMBRAPA – CPACT pela disposição de recursos para a elaboração do estudo.  
Ao PPG MACSA, 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 PETROBRAS pelo auxílio financeiro através da concessão da bolsa de estudo e recursos para desenvolver o projeto.

## Lista de Figuras

Figura 1 – Ciclos de cultivo da cana-de-açúcar (Adaptado de Syngenta®, 2013). ...	26
Figura 2 – Espaçamento duplo entrelinhas em cultivo mínimo de cana-de-açúcar, exemplificado por Naseri et al. (2007).....	31
Figura 3 – Localização da área experimental pertencente a Coopercana, em Porto Xavier, RS. ....	45
Figura 4 – Precipitação média mensal na região de Porto Xavier, RS.....	46
Figura 5 - Temperaturas mínima, máxima e média da região de Porto Xavier, RS. .	47
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 fertilizante (B); distribuição das mudas no sulco (C) e cobertura das mudas (D).....	48
Figura 7 – Espaçamentos entrelinhas de cultivo da cana-de-açúcar adotados no presente estudo.....	49
Figura 8 – A) Adubador sulcador; B) Área de cana antes (direita), e após o manejo (esquerda).....	50
Figura 9 – Colheita mecanizada das parcelas experimentais: A) Colhedora; e B) Transbordo utilizados na colheita do experimento. ....	51
Figura 10 – Esquema do posicionamento da amostragem no perfil do solo para cada espaçamento entrelinhas em projeção de um corte transversal a linha de cultivo. ....	52
Figura 11 – Delineamento experimental e localização das transeções utilizadas para a coleta de amostras de solo.....	53
Figura 12 – Localização dos pontos de amostragem de solo com estrutura preservada .....	54
Figura 13 - Fluxograma dos procedimentos realizados em amostras de estrutura preservada para a determinação dos atributos físicos do solo.....	55
Figura 14 – 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.....	57
Figura 15 – Determinação do diâmetro do colmo (A), extração do caldo (B) e determinação do °Brix com refratômetro digital portátil (C).....	58

Figura 16 – 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).....	59
Figura 17 – Localização da área em estudo.....	62
Figura 18 - Configurações de espaçamentos entrelinhas de cultivo da cana-de- açúcar avaliadas neste estudo.....	62
Figura 19 - Posição da amostragem no perfil do solo. ....	63
Figura 20 – Grade amostral utilizada na coleta de amostras de solo em cada espaçamento e coordenadas espaciais dos pontos de amostragem em metros. ....	64
Figura 21 – Localização dos pontos de amostragem das amostras de estrutura preservada. ....	64
Figura 22 – Autocorrelogramas amostrais da massa do colmo (A), sólidos solúveis totais (B), número de colmos por metro quadrado (C) e altura do colmo (D) obtido nos três espaçamentos (Linha simples – LS; Linha Dupla – LD; Linha tripla - LT) em ciclo de primeira soca. ....	89
Figura 23 – Autocorrelogramas amostrais do diâmetro do colmo (A), tonelada de colmos por hectare (B) e tonelada de brix por hectare (C) obtido nos três espaçamentos (Linha simples – LS; Linha Dupla – LD; Linha tripla - LT) em ciclo de primeira soca.....	90
Figura 24 – Autocorrelogramas amostrais da densidade do solo (A), da resistência a penetração (B), da macroporosidade (C) e da microporosidade (D) obtido nos três espaçamentos (Linha simples – LS; Linha Dupla – LD; Linha tripla - LT) em ciclo de primeira soca.....	91
Figura 25 – Autocorrelogramas amostrais da porosidade total (A), do conteúdo de água a base de volume na capacidade de campo (B) do conteúdo de água a base de volume no ponto de murcha permanente (C) e da água disponível (E) obtido nos três espaçamentos (Linha simples – LS; Linha Dupla – LD; Linha tripla - LT) em ciclo de primeira soca.....	92
Figura 26 – Autocorrelogramas amostrais da massa do colmo (A), de sólidos solúveis totais (B), do número de colmos por metro quadrado (C) e da altura do colmo (D) obtido nos três espaçamentos (Linha simples – LS; Linha Dupla – LD; Linha tripla - LT) em ciclo de segunda soca. ....	93

- Figura 27 – Autocorrelogramas amostrais da massa do diâmetro do colmo (A), tonelada de colmo por hectare (B) e tonelada de brix por hectare (C) obtido nos três espaçamentos (Linha simples – LS; Linha Dupla – LD; Linha tripla - LT) em ciclo de segunda soca.....94
- Figura 28 – Autocorrelogramas amostrais da densidade do solo (A), da resistência a penetração (B) e da macroporosidade (C) obtido nos três espaçamentos (Linha simples – LS; Linha Dupla – LD; Linha tripla - LT) em ciclo de segunda soca.....95
- Figura 29 – Autocorrelogramas amostrais da microporosidade (A), da porosidade total (B) e do conteúdo de água a base de volume na capacidade de campo (C) obtido nos três espaçamentos (Linha simples – LS; Linha Dupla – LD; Linha tripla - LT) em ciclo de segunda soca.....96
- Figura 30 – Crosscorrelograma amostral entre massa do colmo e teor de argila no espaçamento simples em ciclo de cana de primeira soca. ....99
- Figura 31 – Crosscorrelograma amostral entre sólidos solúveis totais (brix) e: A) conteúdo de água a base de volume na capacidade de campo ( $\Theta_{CC}$ ); B) conteúdo de água a base de volume no ponto de murcha permanente ( $\Theta_{PMP}$ ); e C) Água disponível (AD) no espaçamento duplo em ciclo de cana de primeira soca. .... 100
- Figura 32 – Crosscorrelograma amostral entre sólidos solúveis totais (brix) e: A) Densidade do solo (Ds); B) resistência a penetração (RP); e C) teor de argila no espaçamento duplo em ciclo de cana de primeira soca. .... 101
- Figura 33 – Crosscorrelograma amostral entre sólidos solúveis totais (brix) e: A) macroporosidade (Ma); B) microporosidade (Mi); C) porosidade total (Pt); e D) altura do colmo (HC) no espaçamento duplo em ciclo de cana de primeira soca..... 102
- Figura 34 – Crosscorrelograma amostral entre altura do colmo (HC) e: A) densidade do solo (Ds); B) resistência a penetração (RP); e C) teor de argila (Argila) no espaçamento duplo em ciclo de cana de primeira soca. .... 103
- Figura 35 – Crosscorrelograma amostral entre altura do colmo (HC) e: A) Macroporosidade (Ma); B) microporosidade (Mi); e C) porosidade total (Pt) no espaçamento duplo em ciclo de cana de primeira soca. .... 104
- Figura 36 – Crosscorrelograma amostral entre altura do colmo (HC) e: A) conteúdo de água a base de volume na capacidade de campo ( $\Theta_{CC}$ ); B) conteúdo

de água a base de volume no ponto de murcha permanente ( $\Theta$ PMP); e C) água disponível (AD) no espaçamento duplo em ciclo de cana de primeira soca.....	105
Figura 37 – Crosscorrelograma amostral entre Sólidos solúveis Totais (brix) e: A) conteúdo de água a base de volume na capacidade de campo ( $\Theta$ CC); B) conteúdo de água a base de volume no ponto de murcha permanente ( $\Theta$ PMP); e C) Água disponível (AD) no espaçamento triplo em ciclo de cana de primeira soca. ....	106
Figura 38 – Crosscorrelograma amostral entre Sólidos solúveis Totais (brix) e: A) altura do colmo (HC); B) teor de argila (Argila); e C) macroporosidade (Ma) no espaçamento triplo em ciclo de cana de primeira soca.....	107
Figura 39 – Crosscorrelograma amostral entre altura do colmo (HC) e: A) conteúdo de água a base de volume na capacidade de campo ( $\Theta$ CC); B) conteúdo de água a base de volume no ponto de murcha permanente ( $\Theta$ PMP); e C) Água disponível (AD) no espaçamento triplo em ciclo de cana de primeira soca.....	108
Figura 40 – Crosscorrelograma amostral entre altura do colmo (HC) e: A) teor de argila (Argila); e B) macroporosidade (Ma) no espaçamento triplo em ciclo de cana de primeira soca.....	109
Figura 41 – Crosscorrelograma amostral entre Sólidos solúveis Totais (brix) e: A) teor de argila (Argila); B) densidade do solo (Ds) e C) resistência à penetração (RP) no espaçamento simples em ciclo de cana de segunda soca.....	110
Figura 42 – Crosscorrelograma amostral entre Sólidos solúveis Totais (brix) e: A) porosidade total (Pt); B) macroporosidade (Ma); e C) conteúdo de água a base de volume na capacidade de campo ( $\Theta$ CC) no espaçamento simples em ciclo de cana de segunda soca. ....	111
Figura 43 – Crosscorrelograma amostral entre massa do colmo (MC) e : A) teor de argila (Argila); B) sólidos solúveis totais (Brix); e C) altura do colmo (HC) no espaçamento simples em ciclo de cana de segunda soca.....	112
Figura 44 – Crosscorrelograma amostral entre massa do colmo (MC) e: A) teor de argila (Argila); B) porosidade total (Pt); C) macroporosidade (Ma); e D) conteúdo de água a base de volume na capacidade de campo ( $\Theta$ CC) no espaçamento simples em ciclo de cana de segunda soca.....	113

- Figura 45 – Crosscorrelograma amostral entre massa do colmo (MC) e: A) teor de argila (Argila); B) densidade do solo (Ds); C) resistência à penetração (RP); e D) conteúdo de água a base de volume na capacidade de campo ( $\Theta_{CC}$ ) no espaçamento duplo em ciclo de cana de segunda soca..... 114
- Figura 46 – Crosscorrelograma amostral entre Sólidos solúveis Totais (Brix) e: A) macroporosidade (Ma); B) microporosidade (Mi); e C) porosidade total (Pt) no espaçamento duplo em ciclo de cana de segunda soca. .... 115
- Figura 47 – Crosscorrelograma amostral entre massa do colmo (MC) e: A) sólidos solúveis totais (Brix); B) teor de argila (Argila); C) densidade do solo (Ds); e D) resistência à penetração (RP) no espaçamento duplo em ciclo de cana de segunda soca. .... 116
- Figura 48 – Crosscorrelograma amostral entre massa do colmo (MC) e: A) macroporosidade (Ma); B) microporosidade (Mi); C) porosidade total (Pt); e D) conteúdo de água a base de volume na capacidade de campo ( $\Theta_{CC}$ ) no espaçamento duplo em ciclo de cana de segunda soca..... 117
- Figura 49 – Crosscorrelograma amostral entre sólidos solúveis totais (brix) e: A) macroporosidade (Ma); B) microporosidade (Mi); e C) conteúdo de água a base de volume na capacidade de campo ( $\Theta_{CC}$ ) no espaçamento triplo em ciclo de cana de segunda soca. .... 118
- Figura 50 – Crosscorrelograma amostral entre sólidos solúveis totais (brix) e: A) teor de argila (Argila); e B) resistência à penetração (RP) no espaçamento triplo em ciclo de cana de segunda soca. .... 119
- Figura 51 – Crosscorrelograma amostral entre número de colmos por metro quadrado (NCM<sup>2</sup>) e: A) teor de argila (Argila); B) sólidos solúveis totais (Brix); e C) resistência à penetração (RP) no espaçamento triplo em ciclo de cana de segunda soca. .... 120
- Figura 52 – Crosscorrelograma amostral entre número de colmos por metro quadrado (NCM<sup>2</sup>) e: A) macroporosidade (Ma); B) microporosidade (Mi); e C) conteúdo de água em base de volume na capacidade de campo ( $\Theta_{CC}$ ) no espaçamento triplo em ciclo de cana de segunda soca..... 121
- Figura 53 - Análise de espaço de estados aplicada a variável massa do colmo na posição i em função da altura do colmo e porosidade na posição i-1, no espaçamento LS em ciclo de segunda soca. .... 126

Figura 54 - Regressão linear entre os valores transformados observados e estimados de massa do colmo (MC) para o modelo de estimativa de MC no espaçamento LS em ciclo de segunda soca. ....	126
Figura 55 - Análise de espaço de estados aplicada a variável massa do colmo na posição i em função da altura do colmo na posição i-1, no espaçamento LS em ciclo de segunda soca.....	127
Figura 56 - Regressão linear entre os valores transformados observados e estimados de massa do colmo (MC) para o modelo de estimativa de MC considerando só a HC como variável preditora no espaçamento LS em ciclo de segunda soca. ....	128
Figura 57 - Análise de espaço de estados aplicada a variável massa do colmo na posição i em função da porosidade total na posição i-1, no espaçamento LS em ciclo de segunda soca.....	129
Figura 58 - Regressão linear entre os valores transformados observados e estimados de massa do colmo (MC) para o modelo de estimativa de MC considerando só a Pt como variável preditora no espaçamento LS em ciclo de segunda soca. ....	129
Figura 59 - Análise de espaço de estados aplicada a variável Sólidos solúveis totais (Brix) na posição i em função do teor de argila na posição i-1, no espaçamento LT em ciclo de segunda soca. ....	131
Figura 60 - Regressão linear entre os valores transformados observados e estimados de Sólidos solúveis totais (Brix) para o modelo de estimativa de Brix considerando a argila como variável preditora no espaçamento LT em ciclo de segunda soca.....	132
Figura 61 - Análise de espaço de estados aplicada a variável número de colmos por metro quadrado (NCM <sup>2</sup> ) na posição i em função do teor de argila (Argila), resistência a penetração (RP), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi) e conteúdo de água a base de volume na capacidade de campo (ΘCC) na posição i-1, no espaçamento LT em ciclo de segunda soca. ....	133
Figura 62 - Regressão linear entre os valores transformados observados e estimados de número de colmos por metro quadrado (NCM <sup>2</sup> ) para o modelo de estimativa de NCM <sup>2</sup> considerando o teor de argila (Argila), a resistência a penetração (RP), a macroporosidade (Ma), a	

	microporosidade ( $M_i$ ) e o conteúdo de água a base de volume na capacidade de campo ( $\Theta_{CC}$ ) como variáveis preditoras no espaçamento LT em ciclo de segunda soca.....	134
Figura 63 -	Análise de espaço de estados aplicada a variável número de colmos por metro quadrado ( $NCM^2$ ) na posição $i$ em função do teor de argila (Argila), na posição $i-1$ , no espaçamento LT em ciclo de segunda soca. ....	135
Figura 64 -	Regressão linear entre os valores transformados observados e estimados de número de colmos por metro quadrado ( $NCM^2$ ) para o modelo de estimativa de $NCM^2$ considerando o teor de argila Argila como variável preditora no espaçamento LT em ciclo de segunda soca. ....	136
Figura 65 -	Análise de espaço de estados aplicada a variável número de colmos por metro quadrado ( $NCM^2$ ) na posição $i$ em função da resistência à penetração (RP), na posição $i-1$ , no espaçamento LT em ciclo de segunda soca.....	137
Figura 66 -	Regressão linear entre os valores transformados observados e estimados de número de colmos por metro quadrado ( $NCM^2$ ) para o modelo de estimativa de $NCM^2$ considerando a resistência à penetração como variável preditora no espaçamento LT em ciclo de segunda soca. ....	138
Figura 67 -	Análise de espaço de estados aplicada a variável número de colmos por metro quadrado ( $NCM^2$ ) na posição $i$ em função da macroporosidade ( $Ma$ ), na posição $i-1$ , no espaçamento LT em ciclo de segunda soca..	139
Figura 68 -	Regressão linear entre os valores transformados observados e estimados de número de colmos por metro quadrado ( $NCM^2$ ) para o modelo de estimativa de $NCM^2$ considerando a macroporosidade como variável preditora no espaçamento LT em ciclo de segunda soca. ....	140
Figura 69 -	Análise de espaço de estados aplicada a variável número de colmos por metro quadrado ( $NCM^2$ ) na posição $i$ em função da microporosidade ( $M_i$ ), na posição $i-1$ , no espaçamento LT em ciclo de segunda soca. ...	141
Figura 70 -	Análise de espaço de estados aplicada a variável número de colmos por e metro quadrado ( $NCM^2$ ) na posição $i$ em função do conteúdo de água a base de volume na capacidade de campo ( $\Theta_{CC}$ ), na posição $i-1$ , no espaçamento LT em ciclo de segunda soca. ....	141



Figura 71 - Regressão linear entre os valores transformados observados e estimados de número de colmos por metro quadrado (NCM <sup>2</sup> ) para o modelo de estimativa de NCM <sup>2</sup> considerando a microporosidade como variável preditora no espaçamento LT em ciclo de segunda soca. ....	142
Figura 72 - Regressão linear entre os valores transformados observados e estimados de número de colmos por metro quadrado (NCM <sup>2</sup> ) para o modelo de estimativa de NCM <sup>2</sup> considerando a $\Theta_{CC}$ como variável preditora no espaçamento LT em ciclo de segunda soca. ....	142
Figura 73 – Semivariograma da variável densidade do solo (Ds) nos espaçamentos LS (A) e LD (B). ....	146
Figura 74 – Semivariograma da variável resistência à penetração (RP) nos espaçamentos LS (A) e LD (B). ....	147
Figura 75 – Semivariograma da variável microporosidade (Mi) nos espaçamentos LS (A) e LD (B). ....	147
Figura 76 – Semivariograma da variável porosidade total (Pt) nos espaçamentos LS (A) e LD (B). ....	148
Figura 77 – Semivariograma da variável conteúdo de água a base de volume na capacidade de campo ( $\Theta_{cc}$ ) nos espaçamentos LS (A) e LD (B). ....	148
Figura 78 – Semivariograma da variável macroporosidade (Ma) nos espaçamentos LS (A) e LD (B). ....	148
Figura 79 – Mapa da distribuição espacial da variável densidade do solo (Ds) nos espaçamentos LS (A) e LD (B). ....	152
Figura 80 – Mapa da distribuição espacial da variável microporosidade (Mi) nos espaçamentos LS (A) e LD (B). ....	153
Figura 81 – Mapa da distribuição espacial da variável conteúdo de água a base de volume na capacidade de campo ( $\Theta_{cc}$ ) nos espaçamentos LS (A) e LD (B). ....	154
Figura 82 – Mapa da distribuição espacial da variável resistência à penetração (RP) nos espaçamentos LS (A) e LD (B). ....	155
Figura 83 – Mapa da distribuição espacial da variável porosidade total (Pt) nos espaçamentos LS (A) e LD (B). ....	156
Figura 84 – Mapa da distribuição espacial da variável macroporosidade (Ma) nos espaçamentos LS (A) e LD (B). ....	156

Figura 85 – Representação gráfica das linhas de cultivo no mapa da distribuição espacial da variável Resistencia à Penetração (RP) nos dois tipos de espaçamentos.....	157
Figura 86 – Representação gráfica das linhas de cultivo no mapa da distribuição espacial da variável Densidade do solo (Ds) nos dois tipos de espaçamento.....	158

## Lista de Tabelas

- Tabela 1 – Densidade ( $D_s$ ), resistência a penetração (RP), porosidade total (Pt), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), conteúdo de água a base de volume na capacidade de campo ( $\theta_{CC}$ ), conteúdo de água a base de volume no ponto de murcha permanente ( $\theta_{PMP}$ ) e água disponível (AD) de um Latossolo em ciclo de primeira e segunda soca no espaçamento linha simples. ....71
- Tabela 2 – Densidade ( $D_s$ ), resistência a penetração (RP), porosidade total (Pt), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), conteúdo de água a base de volume na capacidade de campo ( $\theta_{CC}$ ), conteúdo de água a base de volume no ponto de murcha permanente ( $\theta_{PMP}$ ) e água disponível (AD) de um Latossolo em ciclo de primeira e segunda soca no espaçamento linha dupla.....72
- Tabela 3 – Densidade ( $D_s$ ), resistência a penetração (RP), porosidade total (Pt), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), conteúdo de água a base de volume na capacidade de campo ( $\theta_{CC}$ ), conteúdo de água a base de volume no ponto de murcha permanente ( $\theta_{PMP}$ ) e água disponível (AD) de um Latossolo em ciclo de primeira e segunda soca no espaçamento linha tripla.....73
- Tabela 4 - Massa do colmo (MC), altura do colmo (HC), diâmetro do colmo (DC), número de colmos por metro quadrado (NCM2), sólidos solúveis totais do caldo (Brix), massa de colmos por hectare (TCH) e massa de sólidos solúveis do caldo por hectare (TBH) em ciclo de primeira e segunda soca no espaçamento linha simples.....78
- Tabela 5 - Massa do colmo (MC), altura do colmo (HC), diâmetro do colmo (DC), número de colmos por metro quadrado (NCM2), sólidos solúveis totais do caldo (Brix), massa de colmos por hectare (TCH) e massa de sólidos solúveis do caldo por hectare (TBH) em ciclo de primeira e segunda soca no espaçamento linha dupla. ....79
- Tabela 6 - Massa do colmo (MC), altura do colmo (HC), diâmetro do colmo (DC), número de colmos por metro quadrado (NCM2), sólidos solúveis totais do caldo (Brix), massa de colmos por hectare (TCH) e massa de

	sólidos solúveis do caldo por hectare (TBH) em ciclo de primeira e segunda soca no espaçamento linha tripla. ....	80
Tabela 7	– Valores médios dos atributos densidade do solo (Ds), resistência a penetração (RP), porosidade total (Pt), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), conteúdo de água a base de volume na capacidade de campo ( $\theta_{cc}$ ), conteúdo de água a base de volume no ponto de murcha permanente ( $\theta_{PMP}$ ) e capacidade de água disponível (CAD) de um Latossolo em ciclo de cana planta, primeira soca e segunda soca nos três espaçamentos entrelinhas. ....	83
Tabela 8	– Massa do colmo (MC), altura do colmo (HC), diâmetro do colmo (DC), número de colmos por metro quadrado (NCM2), sólidos solúveis totais do caldo (Brix), massa de colmos por hectare (TCH) e massa de sólidos solúveis do caldo por hectare (TBH) nos ciclos de cana planta, primeira e segunda soca nos três espaçamentos entrelinhas.....	87
Tabela 9	– Análise de correlação espacial cruzada em ciclo de cana de primeira soca.....	122
Tabela 10	– Análise de correlação espacial cruzada em ciclo de cana de segunda soca.....	123
Tabela 11	– Estatística descritiva das variáveis densidade do solo (Ds), resistência à penetração (RP), porosidade total (Pt), macro (Ma) e microporosidade (Mi) e conteúdo de água a base de volume na capacidade de campo ( $\theta_{cc}$ ) nos espaçamentos simples e duplo. ....	144
Tabela 12	– Modelo teórico do semivariograma para os atributos físicos do solo nos dois espaçamentos entrelinhas e seus respectivos parâmetros estimados.....	149

## Sumário

1. Introdução .....	21
2. Hipótese .....	23
3. Objetivos .....	23
3.1 Objetivo Geral .....	23
3.2 Objetivos específicos .....	23
4. Revisão Bibliográfica.....	24
4.1 A cana-de-açúcar no Brasil e no Rio Grande do Sul .....	24
4.2 Sistema de produção da cana-de-açúcar .....	25
4.3 Espaçamento entrelinhas de cultivo da cana-de-açúcar.....	29
4.4 Atributos físicos em solos cultivados com cana-de-açúcar .....	31
4.5 Variabilidade espacial dos atributos do solo e de planta .....	34
4.5.1 Importância .....	34
4.5.2 Teoria das variáveis regionalizadas.....	36
4.5.3 Séries temporais e espaciais.....	36
4.5.4 Função de autocorrelação .....	37
4.5.5 Função de crosscorrelação.....	39
4.5.6 Abordagem em espaço de estados .....	40
4.5.7 Semivariograma .....	42
4.5.8 Krigagem ordinária.....	44
5. Material e Métodos.....	45
5.1 Estudo 1: Relação solo planta sob diferentes espaçamentos entrelinhas ....	45
5.1.1 Localização e caracterização da área experimental .....	45
5.1.2 Implantação do experimento e manejos realizados .....	47
5.1.3 Colheita.....	50
5.1.4 Avaliação de atributos físicos do solo .....	51
5.1.5 Avaliações de atributos da planta .....	56
5.1.6 Análise dos dados.....	59
5.2 Estudo 2: Distribuição espacial da compactação de um Latossolo cultivado com cana-de-açúcar sob dois espaçamentos entrelinhas .....	61
5.2.1 Caracterização do experimento .....	61
5.2.2 Avaliação de atributos físicos do solo .....	63

5.2.3 Análise dos dados.....	65
6. Resultados e Discussão.....	69
6.1 Estudo 1: Relação solo planta sob diferentes espaçamentos entrelinhas ....	69
6.1.1 Análise exploratória dos dados .....	69
6.1.2 Autocorrelação.....	88
6.1.3 Análise de correlação cruzada.....	98
6.1.4 Abordagem de espaço de estados .....	125
6.2 Estudo 2: Distribuição espacial da compactação de um Latossolo sob dois espaçamentos entrelinhas .....	143
6.2.1 Análise exploratória.....	143
6.2.2 Análise de dependência espacial.....	146
6.2.3 Mapa da distribuição espacial dos atributos físicos .....	151
7. Conclusões .....	158
Referências Bibliográficas.....	159

## 1. Introdução

A cana-de-açúcar possui um alto potencial produtivo e é adaptada ao clima do Brasil, apresenta importância econômica para o País. Nos últimos quarenta 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 e a co-geração de energia elétrica do bagaço são, atualmente, componentes importantes na matriz energética do País. Por ser uma planta de metabolismo do tipo C4, apresenta eficiência em converter energia luminosa em química, o que viabiliza, economicamente o seu uso para fins energéticos nas condições edafoclimáticas do Brasil.

De acordo com dados da FAO (2017), a produção de cana-de-açúcar no Brasil foi de 768 milhões de toneladas em 2013, o que representa 37,8% da produção mundial e confere o primeiro lugar no ranking dos países produtores. Quanto à produção de etanol, o Brasil é o segundo maior mundial, participando com 28% do total da produção. Os Estados Unidos ocupam a primeira posição, que tem o milho como principal matéria prima para produção de etanol (RFA, 2016). Quanto a distribuição espacial da produção de etanol no Brasil, as regiões Sudeste e Nordeste concentram a maior parte da produção (UNICA, 2017b). O etanol tem se destacado ao longo das últimas décadas como uma alternativa energética sustentável por ser proveniente de uma fonte energética renovável e por emitir na sua combustão menor quantidade de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) em comparação com outros combustíveis, sendo uma energia considerada limpa.

Na maior parte das áreas cultivadas com cana-de-açúcar no Brasil, a colheita está migrando do sistema tradicional (colheita manual de cana inteira) para a mecanizada de cana picada. Este último implica em alterações no manejo da lavoura, principalmente no que tange ao espaçamento entrelinhas de plantio. Há uma incompatibilidade do espaçamento entrelinhas convencionalmente adotado nos canaviais com a distância entre rodas do maquinário, ocasionando o tráfego de máquinas próximo e/ou sobre as linhas de cultivo, gerando problemas no momento da rebrota e diminuição de produtividade (BRAUNACK et al., 2006; NYKO et al.,

2013). Desta forma, aumenta-se a preocupação com relação à compactação do solo que ocorre em função da utilização de máquinas e implementos pesados ao longo das sucessivas operações agrícolas durante o ciclo da cultura.

A avaliação de novas combinações de espaçamentos entrelinhas representa uma alternativa para minimizar os impactos causados pela compactação do solo na produtividade da cana-de-açúcar (TULLBERG, 1997; TULLBERG et al., 2001; BRAUNACK e MCGARRY, 2006; BRAUNACK et al., 2006). A modificação do espaçamento entrelinhas provoca alterações no ambiente físico onde a cultura se desenvolve e nos seus principais componentes de produção, tais como o comprimento, o diâmetro e a massa do colmo (SINGELS; SMIT, 2009; EHSANULLAH; JAMIL; GHAFAR, 2011; BANERJEE; PRAMANIK; PUSTE, 2012). Tais alterações são dinâmicas e na maioria das situações são de caráter local, destacando a importância da aplicação de ferramentas estatísticas que levem em consideração a variabilidade espacial das variáveis do sistema solo-planta e a possível estrutura de dependência entre elas (NIELSEN; WENDROTH, 2003; REICHARDT; TIMM, 2016). Dentre essas ferramentas, a abordagem em espaço de estados tem sido aplicada com sucesso em estudos relacionados ao sistema solo-planta, pois considera a dinamicidade do sistema bem como o comportamento local das variáveis (TIMM et al., 2000, 2003; OLIVEIRA et al., 2011; JIA et al., 2010; LIU et al., 2012; SHE et al., 2014).

Outra ferramenta importante para o entendimento de processos e fatores e avaliação de manejos do solo é a confecção de mapas a partir de técnicas geoestatísticas. Ao descrever a variação em diferentes resoluções espaciais, pode-se entender os processos e fatores que o causam ou controlam, e assim prever em um sentido espacial e gerenciar os recursos utilizados na produção agrícola (WEBSTER; OLIVER, 2007). O estudo baseia-se na teoria das variáveis regionalizadas, em que duas ferramentas são fundamentais: o semivariograma e a krigagem (LANDIM, 2006).

Desta forma, pretende-se gerar informações que contribuam na melhoria dos manejos realizados na cultura da cana-de-açúcar, aumentando a sustentabilidade do canal através da conservação do solo, incremento da produtividade, com a redução de insumos, resultando em um balanço energético mais favorável à produção de etanol a partir da cana-de-açúcar.



## **2. Hipótese**

i) A adoção de espaçamentos entrelinhas combinados minimiza a compactação do solo próximo à linha de cultivo, proporcionando adequadas condições para o desenvolvimento da cana-de-açúcar;

ii) A modificação do espaçamento entrelinhas da cultura da cana-de-açúcar altera a ordem de influência das variáveis físicas do solo sobre os componentes de produção.

## **3. Objetivos**

### **3.1 Objetivo Geral**

Avaliar o efeito de configurações alternativas de espaçamento entrelinhas de cana-de-açúcar sobre os componentes de produção e os atributos físicos de um Latossolo Vermelho-amarelo em sistema de colheita mecanizada no Rio Grande do Sul.

### **3.2 Objetivos específicos**

Os objetivos específicos deste estudo são:

- i) Avaliar os atributos físicos do solo (densidade, porosidade total, macro e microporosidade, resistência à penetração e água disponível) e os atributos da planta (massa, diâmetro, altura, e número de colmos por área e sólidos solúveis totais do caldo) em três tipos de configurações de espaçamentos entrelinhas da cultura da cana-de-açúcar e em dois momentos no ciclo de produção da cana-de-açúcar (primeira soca e segunda soca);
- ii) Relacionar os atributos de planta com os de solo por meio da abordagem de espaço de estado a fim de avaliar a relação solo-planta em três tipos de configurações de espaçamentos entrelinhas da cultura da cana-de-açúcar e em dois momentos no ciclo de produção da cultura (primeira soca e segunda soca);

- iii) Caracterizar a distribuição espacial da compactação do solo utilizando técnicas geoestatísticas através da determinação da densidade do solo, resistência a penetração, porosidade total, macro e microporosidade em dois tipos de configurações de espaçamentos entrelinhas da cultura da cana-de-açúcar em ciclo de segunda soca.

## **4. Revisão Bibliográfica**

### **4.1 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 várias 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. A partir do ano de 1975, com o advento do 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 geração de energia elétrica do bagaço são, atualmente, pilares fundamentais na matriz energética do País. 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 CONAB (2017), a produção de cana-de-açúcar no Brasil foi de aproximadamente 700 milhões de toneladas na safra 2016/17, o que mantém o País em primeiro lugar no ranking mundial de produção de cana-de-açúcar (FAO, 2017). No caso do etanol, o País é o segundo maior produtor, sendo o ranking liderado pelos Estados Unidos (RFA, 2016).

A produção de etanol no Brasil concentra-se na região Sudeste e Centro-Oeste (UNICA, 2017b). O Rio Grande do Sul ocupou a penúltima posição no ranking

nacional de produção de etanol (hidratado mais anidro) na safra 2016/17, com aproximadamente 3 milhões de litros, sendo incipiente sua participação no setor sucroalcooleiro (UNICA, 2017a). O consumo anual do Estado (hidratado mais anidro) correspondeu a 1 bilhão de litros em 2016 (UNICA, 2017a), que não é atendido com a sua pequena produção.

As características peculiares do clima no Rio Grande do Sul são apontadas como fator que interfere negativamente à 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., 2008). Entretanto, pesquisas realizadas nos últimos anos 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, SILVA et al., 2012), propiciando condições favoráveis a expansão da cultura no Estado. Segundo Almeida et al. (2008), 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 em algumas regiões do Rio Grande do Sul (RS) (VERISSIMO et al., 2012).

Neste sentido, o RS é 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.

#### **4.2 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 a necessidade de replantio do canavial (Fig. 1).

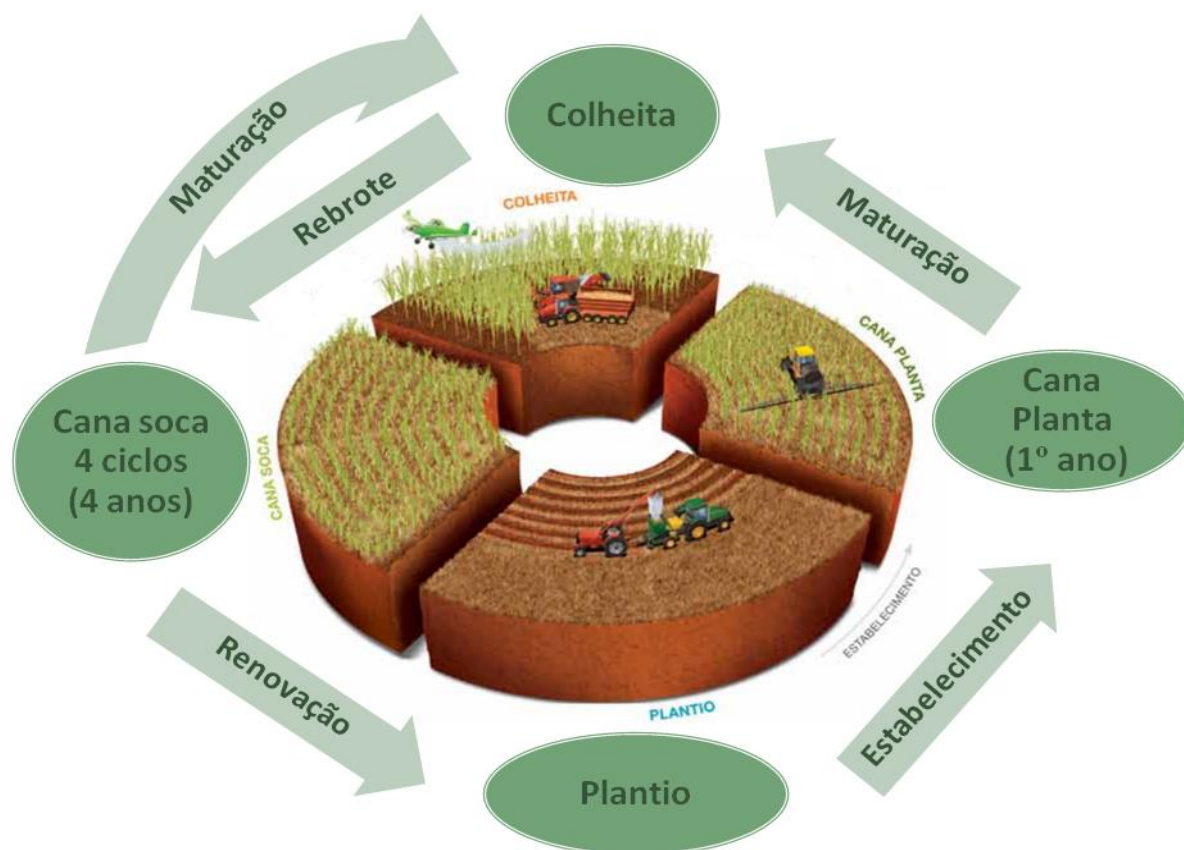


Figura 1 – Ciclos de cultivo da cana-de-açúcar (Adaptado de Syngenta®, 2013).

No sistema produtivo da cana-de-açúcar definem-se três fases distintas: a implantação do canavial, os tratos culturais e a colheita. A primeira é a que mais envolve o conhecimento das relações solo-planta-atmosfera (Beauclair e Scarpari, 2006) e pode, ainda, ser dividida em preparo do solo e plantio. Este primeiro é realizado na maioria dos canaviais na forma convencional, que envolve operações de subsolagem e aração, combinadas com gradagens para a eliminação das soqueiras antigas 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 e à água.

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 a oportunidade de um avanço significativo do plantio mecanizado da cana-de-açúcar, necessitando ainda de grandes ajustes para melhorar a precisão na distribuição dos toletes (colmos).

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, ciclos de compactação e descompactação se repete ao longo do tempo, sendo que ambas as operações demandam quantidade significativa de 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 evoluiu 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. Esta transição ocorreu por diversos fatores, destacando-se as vantagens econômicas, ambientais, de mão de obra e por restrições legislativas para a queima do canavial impostas por alguns estados e pelo governo federal. Considerando essas alterações, 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 compactação pregressiva 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 mecanização da operação elimina a queima da cultura e mantém os solos cobertos com restos culturais. Nesse sistema, buscase 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; OTTO et al., 2011; SOUZA et al., 2015; SÁ et al., 2016).

No RS estão as áreas com maior latitude com cultivo de cana-de-açúcar do Brasil. Neste Estado predomina o clima subtropical úmido, sem estação seca definida, com verões quentes (Cfa) (KUINCHTNER; BURRIOL, 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 e aumento da energia luminosa. 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, em que há precipitações associadas a baixos

valores de evapotranspiração potencial, devido às condições de menores temperaturas. Esta condição é 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.

Desta forma, devido as condições peculiares de clima no Rio Grande do Sul, potencializa-se o processo de compactação, pois a operação de colheita coincide com o período em que o solo se encontra com maior conteúdo de água, aumentando a suscetibilidade à compactação. Pankhurst et al. (2003) já relatava que a compactação dos solos em agrossistemas canavieiros é atribuída principalmente à operação da colheita mecanizada em períodos de elevados conteúdos de água no solo.

### **4.3 Espaçamento entrelinhas 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. No Brasil, a colheita mecanizada da cana-de-açúcar é realizada em linhas simples (1,4 a 1,5 m entrelinhas), com a colhedora acompanhada do veículo de transbordo na linha adjacente. 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 entrelinhas. 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 entre rodados (ROQUE et al., 2010). Esta incompatibilidade da bitola dos equipamentos com o espaçamento entrelinhas ocasiona o tráfego muito próximo às linhas de cultivo e até sobre as linhas, gerando danos às 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 às soqueiras, 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 a área foliar e o número de perfilhos/colmos foram superiores que o 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 entrelinhas (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 1,8 m) comparado as simples (1,5 m).

Neste sentido, as configurações de espaçamentos entrelinhas do tipo duplo (0,4 x 1,7 m) ou triplo (0,3 x 0,3 x 1,5 m) podem favorecer o crescimento radicular, visto que 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) ilustram as duas zonas criadas quando se utiliza o espaçamento duplo, com a mesma lógica para o espaçamento triplo, conforme mostrado na Fig. 2. Chan et al. (2006) e McHugh et al. (2009) relatam benefícios para as plantas e melhorias na qualidade física do solo, ajustando o espaçamento da cultura com base na largura da trilha dos maquinários e mantendo áreas permanentemente sem trânsito.



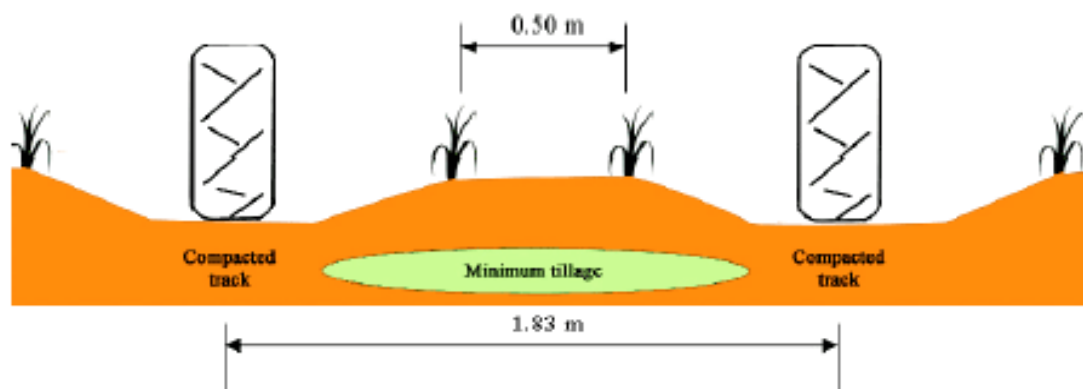


Figura 2 – Espaçamento duplo entrelinhas em cultivo mínimo de cana-de-açúcar, exemplificado por Naseri et al. (2007).

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. Desta forma, se o rodado das máquinas for bem posicionado nas entrelinhas, 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. Outro aspecto interessante da utilização das configurações de espaçamentos duplos ou triplos é a redução das operações de escarificação que ocorrem após cada safra, pois um ciclo 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.

No entanto, com a modificação do espaçamento entrelinhas, há alterações nos componentes de produção da cana-de-açúcar, sendo afetados o comprimento, o diâmetro e a massa do colmo (SINGELS; SMIT, 2009; EHSANULLAH; JAMIL; GHAFAR, 2011; BANERJEE; PRAMANIK; PUSTE, 2012).

#### 4.4 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. (2006), 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.

Para a avaliação da qualidade estrutural do solo e da relação solo-planta, pode se utilizar indicadores físicos relacionados à estrutura do solo, como: a densidade (CAVALIERI et al., 2011; VASCONCELOS et al., 2014), a porosidade (SILVA JUNIOR et al., 2013; CASTRO et al., 2013) e a resistência à penetração das raízes (TAVARES FILHO; RIBON, 2008; SILVA JUNIOR et al., 2013; CASTRO et al., 2013). 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, expressa 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 Júnior (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, enquanto os poros com diâmetro menor que 0,05 mm correspondem aos microporos (RICHARDS, 1965). Os poros são gerados 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 e armazenamento, já que as forças que atuam são principalmente as capilares, diferentemente dos macroporos que são poros inter agregados, sendo os responsáveis pela aeração e 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 consequente 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 frequentemente 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 resistência a penetração de 2,0 MPa é comumente citado como impeditivo ao desenvolvimento do sistema radicular da maioria das culturas (TAYLOR et al., 1966; TORMENA et al., 1999).

## **4.5 Variabilidade espacial dos atributos do solo e de planta**

### **4.5.1 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, 2016). Desta forma, o componente residual da análise de variância pode comprometer alguma inferência sobre o estudo realizado. Se o resíduo é alto, as inferências sobre experimento ficam comprometidas.

Atributos físicos, químicos e biológicos do solo e 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, 2016). 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, 2016).

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 valores de grau de dependência espacial de baixo a moderado, conforme classificação de Zimback (2001) para os caracteres número de perfilhos, diâmetro de colmo, altura do colmo, densidade de raiz e produtividade estimada da cana-de-açúcar.

Uma das maneiras mais eficazes de investigar a variabilidade espacial do solo é o uso da análise de variáveis regionalizadas (WARRICK; NIELSEN, 1980; GOOVAERTS, 1997; VIEIRA, 2000; VIEIRA et al, 2002; COUTO et al, 2007; WEBSTER; OLIVIER, 2007; REICHARDT; TIMM, 2016). Essa técnica é fundamentada na teoria das variáveis regionalizadas.

#### **4.5.2 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, uma expressão matemática pode descrever esta variação de um ponto para outro e quantificar 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. Em séries temporais e espaciais é comumente utilizado o autocorrelograma para verificar a estrutura de dependência espacial da série de variáveis, já em malhas amostrais utiliza-se o semivariograma.

#### **4.5.3 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 de uma transeção, formando assim séries espaciais no primeiro caso e séries 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 do solo 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 estrutura de dependência espacial (DOURADO-NETO et al.,1999).

#### 4.5.4 Função de autocorrelação

A dependência espacial de um conjunto de observações pode ser avaliada por meio de algumas medidas estatísticas, que têm 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:

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

Na equação 1, as variáveis x e y tornam-se uma função de autocorrelação se nessa equação o y for trocado pela própria variável 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 jh, onde h é a distância entre pontos de observações da variável e j é o número

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:

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

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:

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

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  $r(0), r(1), r(2), \dots, r(k)$ . O valor de  $r(0)$  é 1, pois correlaciona-se  $x_i$  com  $x_i$ . Se houver correlação entre vizinhos, tem-se 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, que 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:

$$IC = \pm \frac{p}{\sqrt{n}} \quad \text{Equação 4}$$

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 (2016) 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.

#### 4.5.5 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 dá 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:

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

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.

#### 4.5.6 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 realizada, levando em consideração a variabilidade espacial das variáveis (WENDROTH et al. 2003; REICHARDT; TIMM, 2016).

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, 2016).

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

Sendo:  $Y_j(x_i)$  o vetor de observação do processo na localização  $x_i$ ;  $M_{ij}(x_i)$  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  $x_i$ .

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

Sendo  $Z_j(X_i)$  um vetor de estado na posição  $x_i$ ;  $\phi_{ij}$  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  $x_i$ .

Há vários relatos do uso da abordagem de espaço de estados em séries de dados agrícolas, sendo mais eficientes quando comparados aos modelos de regressão múltipla (Timm et al., 2004; Oliveira et al., 2011; Liu et al., 2012). A melhor adequação ao estudo das relações solo-planta ocorre em virtude de os modelos de regressão dinâmica (espaço de estados) considerar o caráter local desse relacionamento (Timm et al., 2000).

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. Aquino et al. (2015) avaliaram os efeitos da sistematização nas relações espaciais das propriedades do solo por meio da abordagem de espaço de estados e observaram que as variáveis topo do horizonte B em relação a superfície do solo e capacidade de troca de cátions contribuíram na estimativa do conteúdo de água no solo após a sistematização. Rienzi et al. (2016) criaram modelos preditivos de espaço de estado que explicam 63% dos dados de carbono orgânico e 54% dos dados de densidade do solo em um transecto de 2740 m de comprimento sob diferentes sistemas de preparo do solo. Jia et al. (2017) utilizaram a abordagem de espaço de estado para avaliar a variabilidade do carbono orgânico ao longo de um transecto no planalto de Loess na China. Os autores observaram que o modelo de espaço de estados conseguiu capturar 90,3-99,9% da variabilidade espacial do carbono orgânico nas várias camadas do solo, sendo os fatores climáticos como precipitação e temperatura com maior contribuição sobre a distribuição espacial do carbono orgânico em menores profundidades.

Portanto, a abordagem em espaço de estados constitui-se uma interessante ferramenta para a avaliação da relação das variáveis que compõe o sistema solo-água-atmosfera.

#### **4.5.7 Semivariograma**

Para avaliar se há dependência espacial entre as amostras coletadas em uma malha utiliza-se o semivariograma, que mede e descreve a dependência espacial e expressa o grau de semelhança entre o ponto e os seus vizinhos. O semivariograma é um gráfico que representa a estimativa das semivariâncias dos dados  $[\gamma(h)]$  em relação ao número (h) de vetores (“lag” ou número de espaçamentos) que os separa.

Ao semivariograma experimental é ajustada a curva que proporcione a máxima correlação possível com os pontos calculados. O modelo ajustado é chamado de modelo teórico do semivariograma. Na região onde se observa a continuidade espacial a geoestatística é aplicada com eficiência. A etapa de ajuste do modelo ao semivariograma experimental é de grande importância, pois pode influenciar os resultados posteriores. O modelo ajustado deve se aproximar ao

máximo da descrição do fenômeno no campo, sendo que a verificação do melhor ajuste do modelo teórico ao semivariograma experimental pode ser realizada pela validação cruzada. O semivariograma melhor ajustado é aquele que possui o maior coeficiente de correlação entre os valores reais e os estimados pelo modelo teórico. Como a semivariância é uma medida de dissimilaridade entre observações vizinhas, o que intuitivamente se espera de dados de campo, é que à medida que  $h$  aumente, a distância que os separa, há o aumento da semivariância até se tornar invariante.

Os parâmetros do semivariograma são:

I. Alcance ( $a$ ): distância dentro da qual as amostras apresentam-se correlacionadas espacialmente.

II. Patamar ( $C$ ): é o valor do semivariograma correspondente a seu alcance ( $a$ ). Deste ponto em diante, considera-se que não existe mais dependência espacial entre as amostras, porque a variância da diferença entre pares de amostras torna-se invariante com a distância.

III. Efeito Pepita ( $C_0$ ): por definição,  $\gamma(0)=0$ . Entretanto, na prática, à medida que  $h$  tende para 0 (zero),  $\gamma(h)$  se aproxima de um valor positivo chamado Efeito Pepita ( $C_0$ ). O valor de  $C_0$  revela a descontinuidade do semivariograma para distâncias menores do que a menor distância entre as amostras. Parte desta descontinuidade pode ser também devida a erros de medição, mas é impossível quantificar se a maior contribuição provém dos erros de medição ou da variabilidade de pequena escala não captada pela amostragem.

IV. Contribuição ( $C_1$ ): é a diferença entre o patamar ( $C$ ) e o Efeito Pepita ( $C_0$ ).

O ajuste de um modelo teórico ao semivariograma experimental é um dos aspectos mais importantes das aplicações da Teoria das Variáveis Regionalizadas e pode ser uma das maiores fontes de ambiguidade e polêmica nessas aplicações. Todos os cálculos da geoestatística dependem do valor do modelo do semivariograma para cada distância especificada (Vieira et al., 1983; Guimarães, 2004). Por isso, se o modelo ajustado estiver errado, todos os cálculos seguintes também estarão. Como regra quanto mais simples puder ser o modelo ajustado, melhor, e não se deve dar importância excessiva a pequenas flutuações que podem ser artifícios referentes a um pequeno número de dados. A condição para o ajuste

de modelos a dados experimentais é que ele represente a tendência de  $\gamma(h)$  em relação a  $h$  e que o modelo tenha positividade definida condicional. Com base nos parâmetros do semivariograma definidos anteriormente, os principais modelos de semivariogramas utilizados na geoestatística são (Nielsen & Wendroth, 2003): Modelo efeito pepita puro, Modelo linear, Modelo esférico, Modelo exponencial e Modelo Gaussiano. De acordo com Nielsen & Wendroth (2003), semivariogramas com patamar ocorrem quando a variância se torna constante ao longo das observações. Já semivariogramas sem patamar ocorrem quando a variância cresce infinitamente ao longo das observações.

#### **4.5.8 Krigagem ordinária**

Um método de interpolação tem como função realizar inferências para os pontos não amostrados a partir dos dados observados ao longo do grid na área experimental. Existem métodos de interpolação determinísticos, tais como: método poligonal, triangulação e inverso do quadrado das distâncias, dentre outros. Entretanto, estes métodos não estimam o erro associado a cada valor interpolado, o que pode ser obtido por meio do interpolador geoestatístico denominado de krigagem (Webster & Oliver, 2007).

O semivariograma é a ferramenta da Geoestatística que permite verificar e modelar a dependência espacial de uma variável. Uma aplicação imediata do semivariograma é a utilização de informações geradas por ele na interpolação, ou seja, na estimativa de dados e, posterior, mapeamento da variável (Journel & Huijbregts, 1978). O interpolador que utiliza o semivariograma em sua modelagem é chamado de Krigagem, sendo necessário a presença de dependência espacial para aplicação deste método.

A krigagem é considerada o melhor método de interpolação linear não tendencioso e com variância mínima, pois considera os parâmetros do semivariograma (Nielsen & Wendroth, 2003). Nenhum outro método de interpolação é baseado na variância mínima entre as amostras. Na realização da interpolação por krigagem são atribuídos pesos aos valores dos pontos amostrais. Estes pesos variam em função da distância que separa o ponto a ser estimado e o ponto de valor conhecido. Os pesos são atribuídos considerando-se o modelo do semivariograma.

O valor do ponto desconhecido é então calculado pela solução de um sistema de matrizes (Journel & Huijbregts, 1978; Isaaks & Srivastava, 1989).

## 5. Material e Métodos

### 5.1 Estudo 1: Relação solo planta sob diferentes espaçamentos entrelinhas

#### 5.1.1 Localização e caracterização da área experimental

O estudo foi realizado no município de Porto Xavier, RS, em uma área pertencente à Cooperativa de Produtores de Cana Porto Xavier, Ltda (Coopercana), com coordenadas geográficas de 27° 56' 32,25" Sul e 55° 14' 36,35" Oeste e com uma elevação de 131 m em relação ao nível do mar (Fig. 3). A cooperativa é formada por aproximadamente 300 agricultores quase que exclusivamente familiares, em uma área de aproximadamente 2.100 hectares. Apresenta uma usina de produção de etanol, com capacidade nominal para processar 130 mil Mg ano<sup>-1</sup> de cana-de-açúcar e produzir 9 milhões L ano<sup>-1</sup> de etanol, absorvendo assim, toda a produção dos associados.

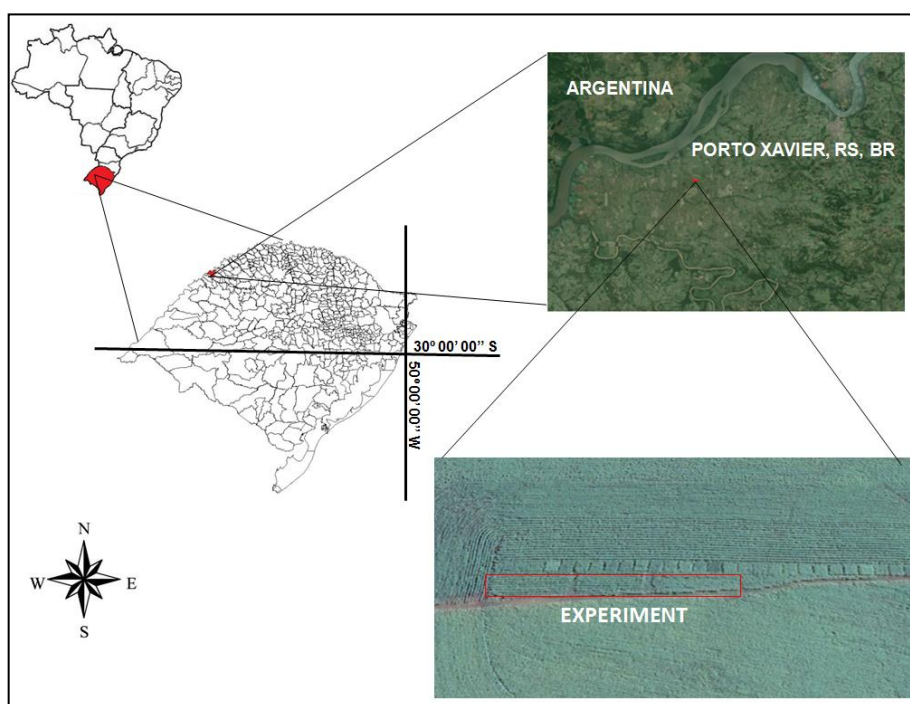


Figura 3 – Localização da área experimental pertencente a Coopercana, em Porto Xavier, RS.

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; BURIOL, 2001). Neste tipo de clima, a temperatura é moderada e as 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 o município de Porto Xavier, RS (CEMETRS, 2013). O período considerado nos cálculos das normais climatológicas foi de 1976-2005, perfazendo 30 anos de registros de dados diários.

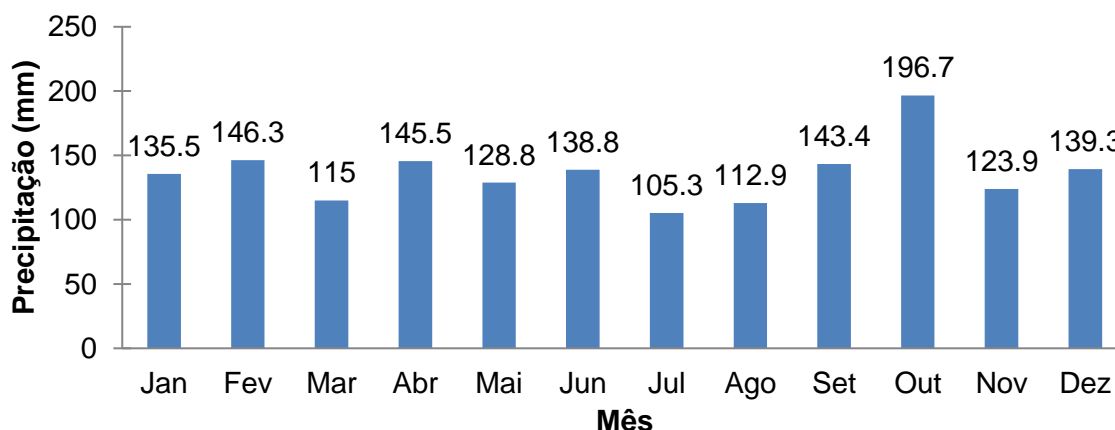


Figura 4 – Precipitação média mensal na região de Porto Xavier, RS.

As médias mensais da normal de precipitação 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, perceber-se-ão diferenças substanciais 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 de inverno (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.

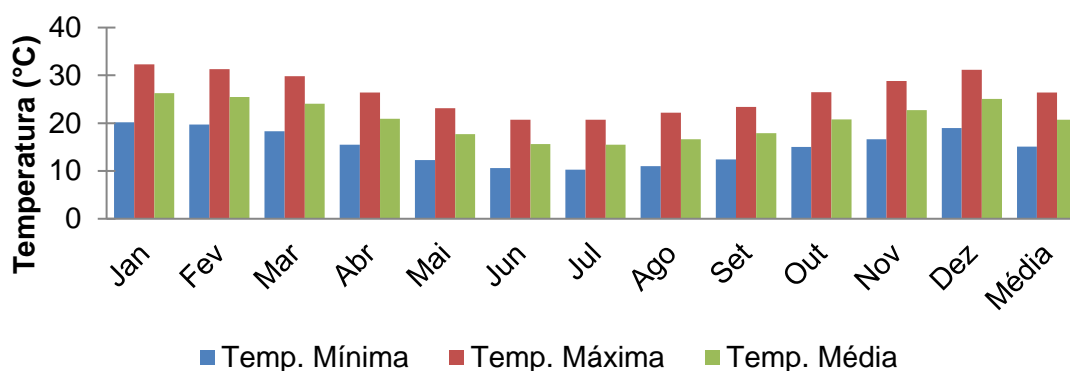


Figura 5 - Temperaturas mínima, máxima e média da região de Porto Xavier, RS.

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.

### 5.1.2 Implantação do experimento e manejos realizados

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 com grade aradora 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 antecedente (sorgo sacarino) e efetuada uma subsolagem (profundidade de ação de 0,4 m). Posteriormente foi realizada a abertura de sulcos (0,30 m), 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  $400 \text{ kg ha}^{-1}$  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 fertilizante (B); distribuição das mudas no sulco (C) e cobertura das mudas (D).

Com relação aos tratos culturais, foi realizada uma adubação de cobertura de  $100 \text{ kg ha}^{-1}$  da formulação de 45-00-00 (ureia) e aplicações de herbicidas sempre que constatada a presença de invasoras em nível de dano significativo. Foram utilizados os herbicidas Diuron na dose de  $4 \text{ L ha}^{-1}$  e o herbicida glifosato na dose de  $6 \text{ L ha}^{-1}$ , 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 entrelinhas da cultura (tratamentos). Cada terço ficou com aproximadamente  $20 \text{ m}$  de largura por  $60 \text{ m}$  de comprimento. Os espaçamentos definidos no experimento foram: Espaçamento simples com  $1,5$  metros entrelinhas de cultivo (LS); Espaçamento combinado duplo com  $0,4 \text{ m}$  nas linhas duplas e  $1,7 \text{ m}$  entrelinhas duplas (LD); e espaçamento combinado triplo com  $0,3 \text{ m}$  nas linhas triplas e  $1,50 \text{ m}$  entrelinhas triplas (LT) (Fig. 7).

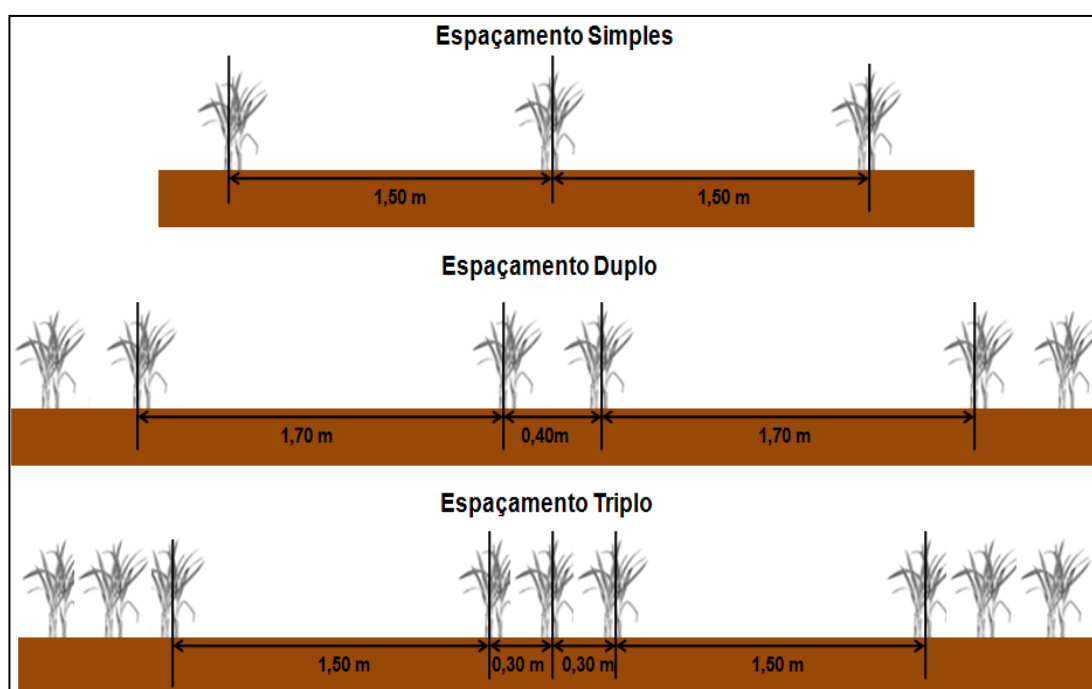


Figura 7 – Espaçamentos entrelinhas de cultivo da cana-de-açúcar adotados no presente estudo.

A variedade de cana-de-açúcar foi a RB855156, que possui importância a nível nacional, sendo o principal material genético cultivado pela cooperativa (PMGCA / UFSCar, 2008). 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.

Nos ciclos de primeira e segunda soca, aproximadamente 30 dias após a colheita, foi realizada a adubação de cobertura nas linhas de plantio com um adubador sulcador (Fig. 8a) na dose de  $100 \text{ kg ha}^{-1}$  do adubo NPK com formulação de 45-00-00 (ureia). Também foram realizadas as aplicações de herbicidas, sendo os mesmos utilizados em ciclo de cana planta (Diuron na dose de  $4 \text{ L ha}^{-1}$  e o herbicida glifosato na dose de  $6 \text{ L ha}^{-1}$ , sendo este último aplicado em jato dirigido).



Figura 8 – A) Adubador sulcador; B) Área de cana antes (direita), e após o manejo (esquerda).

### 5.1.3 Colheita

Os eventos de colheita do experimento foram realizados da mesma forma adotada em sistemas de produção, sendo realizadas em 12 de setembro de 2013 (cana planta), 16 de julho de 2014 (cana de 1° soca) e 19 de agosto de 2015 (cana de 2° soca) e ocorreram após as avaliações dos atributos da planta. Todos os três eventos foram realizados com uma colhedora Austoft 7000 modelo 1995, acompanhada de um transbordo para coleta dos colmos cortados.

A colhedora utilizada apresenta massa aproximada de 15 Mg e rodado do tipo pneu (pneu dianteiro  $400/60 \times 15,5$  e pneu traseiro  $23,5 \times 25$ ) com distância entre as faces externas do pneu dianteiro de 1,86 m e traseiro 1,83 m (Fig. 9a). O transbordo trafegou sobre o experimento com sua capacidade de carga máxima, o que corresponde a 15 Mg de carga total (Fig. 9b). A distância entre os lados internos do rodado do equipamento é 1,47 m e a distância entre os lados externos do rodado é 2,70 m, sendo a largura dos dois pneus de 1,23 m. O trator que tracionou o transbordo, é da marca CBT, modelo 2105, com tração 4x2, apresenta massa aproximada de 5 Mg 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 os pneus traseiros com largura total de 0,95 m.

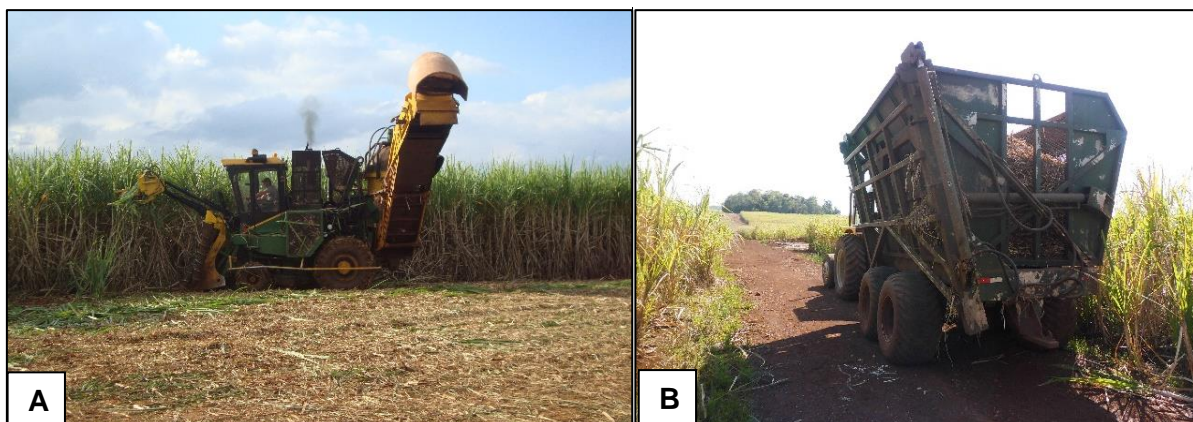


Figura 9 – Colheita mecanizada das parcelas experimentais: A) Colhedora; e B) Transbordo utilizados na colheita do experimento.

#### 5.1.4 Avaliação de atributos físicos do solo

Nos dias 11 de setembro de 2013 e 5 de agosto de 2014, durante os ciclos de primeira e segunda soca, respectivamente, em cada tipo de configuração de espaçamento, foram coletadas amostras com estrutura preservada a fim de representar a camada de solo de 0,00 - 0,10 m. Para isto, foi traçada uma transeção de 50 m de comprimento, paralela à linha de cultivo e distante 0,25 m para cada um dos três tipos de configurações de espaçamentos entrelinhas. A Fig. 10 esquematiza o local de amostragem em cada espaçamento considerando a projeção de um corte imaginário transversal a linha de cultivo. Os primeiros 0,03 m de solo foram desconsiderados por ser uma camada de solo pulverizado, com agregados sem nenhuma coesão, conforme caracterização realizada pelo método do perfil cultural (TAVARES FILHO et al., 1999). O anel volumétrico apresenta dimensões de 0,03 m de altura e 0,0485 m de diâmetro. A coleta de solo atingiu a profundidade de 0,06 m, representando a 0,10 m de solo.

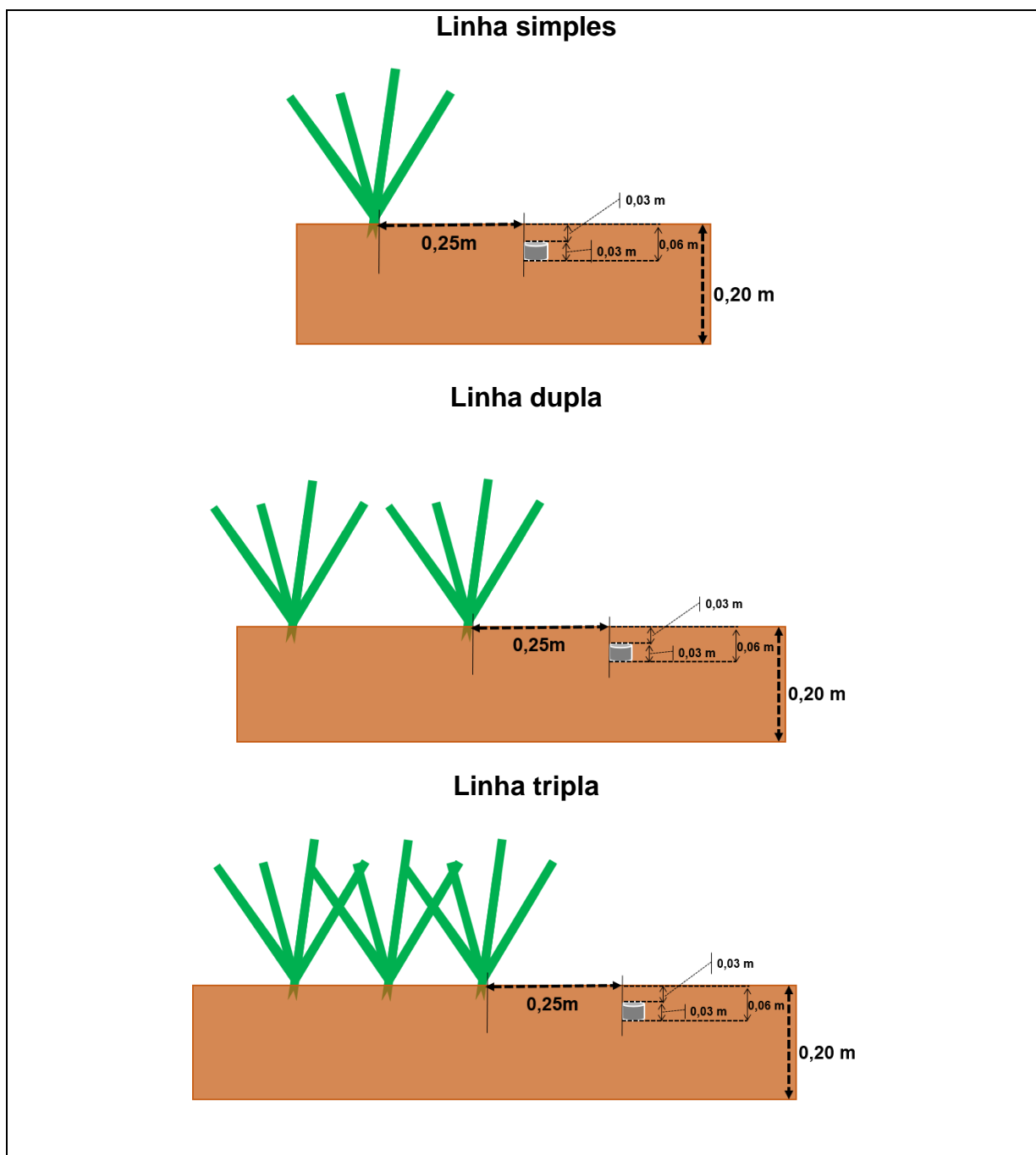


Figura 10 – Esquema do posicionamento da amostragem no perfil do solo para cada espaçamento entrelinhas em projeção de um corte transversal a linha de cultivo.

A amostragem foi realizada ao longo de cada uma das três transeções com pontos de amostragem equidistantes a 1 m. A Fig. 11 apresenta um esquema do delineamento experimental e a localização das transeções utilizadas na amostragem de solo.

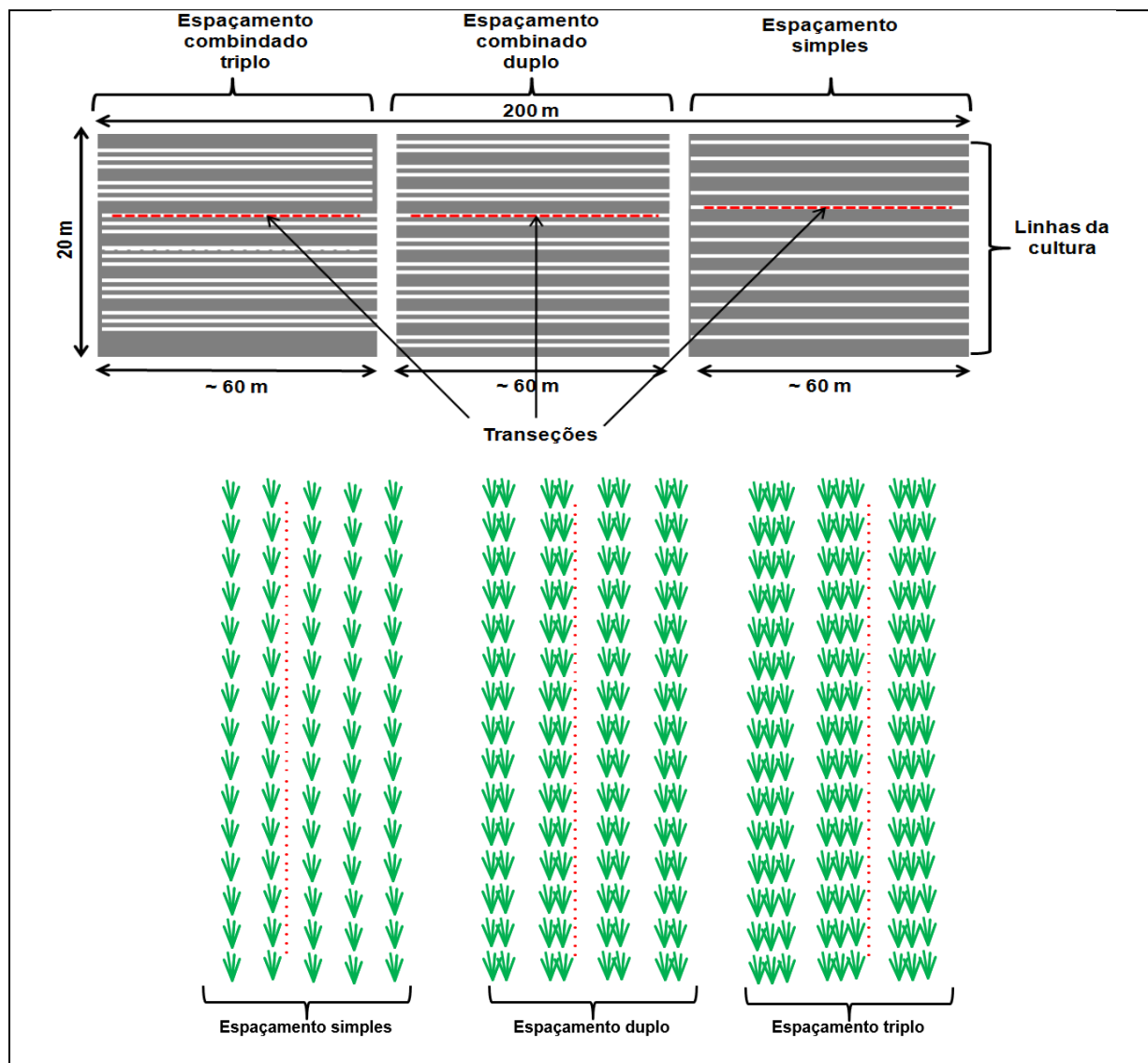


Figura 11 – Delineamento experimental e localização das transeções utilizadas para a coleta de amostras de solo.

As amostras de estrutura preservada foram coletadas em duplicata para cada ponto amostral, ou seja, no centro de cada metro ao longo da transeção (Fig. 12), totalizando 300 amostras de estrutura preservada.

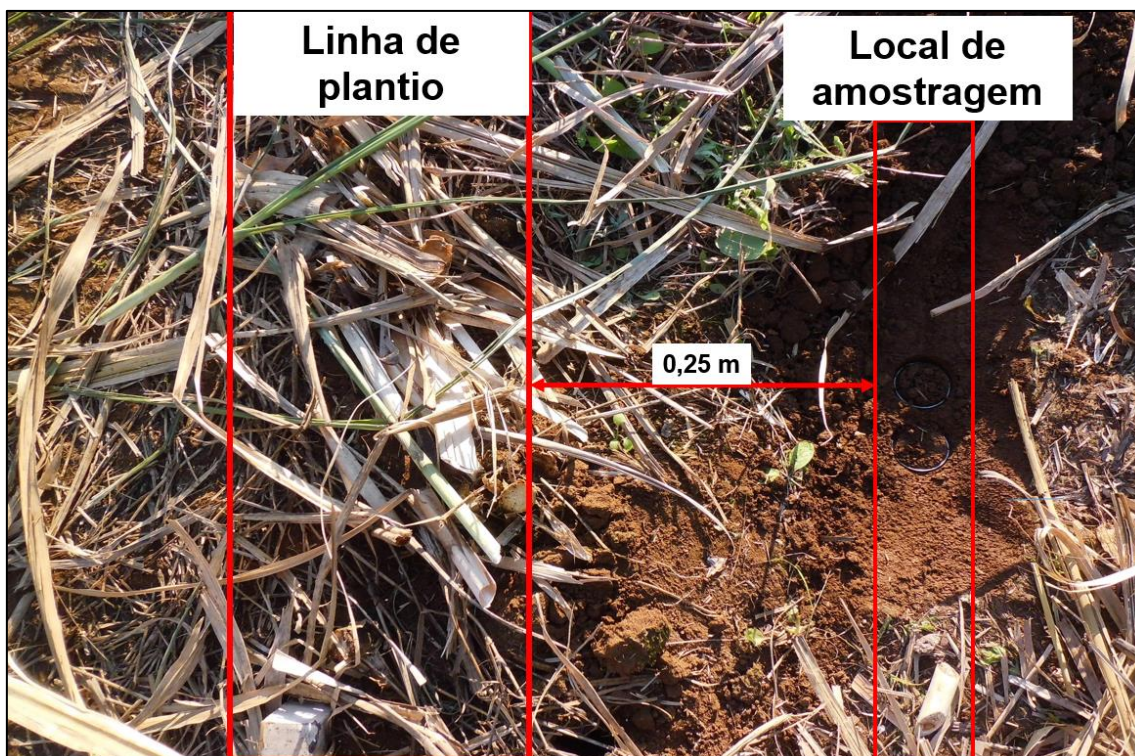


Figura 12 – Localização dos pontos de amostragem de solo com estrutura preservada.

As amostras de solo foram levadas ao Laboratório de Física do Solo da Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel (FAEM), da Universidade Federal de Pelotas (UFPel). A Fig. 13 apresenta um fluxograma dos procedimentos que foram realizados com as amostras, sendo 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 em laboratório ( $R_P$ ), umidade à base de volume correspondente a capacidade de campo ( $\theta_{cc}$ ), umidade à base de volume correspondente ao ponto de murcha permanente ( $\theta_{PMP}$ ) e a capacidade de água disponível (CAD).



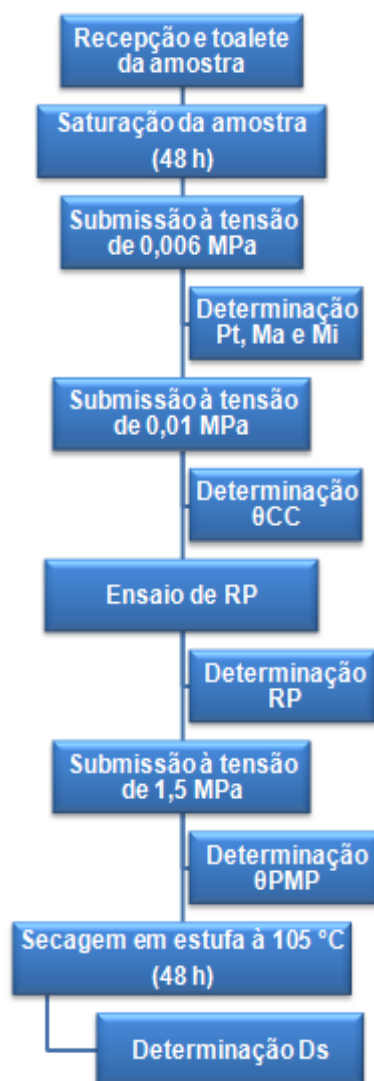


Figura 13 - Fluxograma dos procedimentos realizados em amostras de estrutura preservada para a determinação dos atributos físicos do solo.

Realizou-se primeiramente o toailete 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 tensão 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. 13), determinou-se a Pt, a Ma e a Mi (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 tensão aplicada e o conteúdo de água, cada amostra foi pesada para obtenção da  $\theta_{CC}$  e submetida ao ensaio de

resistência à penetração em laboratório, 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 na região central da amostra com uma velocidade de penetração de  $10 \text{ mm min}^{-1}$  (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  $\theta_{PMP}$ . Por último, as amostras foram secas em estufa a  $105 \text{ }^\circ\text{C}$  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  $\theta_{CC}$  e  $\theta_{PMP}$  multiplicado pela espessura da camada avaliada (0,10 m) (REICHARDT; TIMM, 2016). Os valores do parâmetro argila foram obtidos em Panziera (2012).

### **5.1.5 Avaliações de atributos da planta**

A avaliação dos atributos altura do colmo (H), o diâmetro do colmo (DC), sólidos solúveis totais ( $^\circ\text{Brix}$ ), número de colmos por metro quadrado (NCM2) e a massa do colmo (MC) da cana-de-açúcar foram realizadas nos dias 16 de julho de 2014 (cana de 1<sup>o</sup> soca) e 19 de agosto de 2015 (cana de 2<sup>o</sup> soca) no final do ciclo, 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 (folha +1), descartando as folhas da parte superior do dossel (Fig.14A) Determinou-

se a altura de três colmos com o auxílio de uma régua, totalizando três repetições por ponto de amostragem (Fig. 14B).



Figura 14 – 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. 15A). Para avaliação dos sólidos solúveis totais (°Brix) realizou-se a extração do caldo do entre-nó mediano com o auxílio de um extrator (Fig. 15B) e determinado com um refratômetro digital portátil que expressa o valor em grau brix, ou seja, teor de sólidos solúveis totais do caldo (Fig. 15C). Considerando a sacarose como um dos sólidos do caldo que representa de 80 a 90% do caldo, o aumento do seu conteúdo acaba por resultar em aumento do °Brix do caldo.

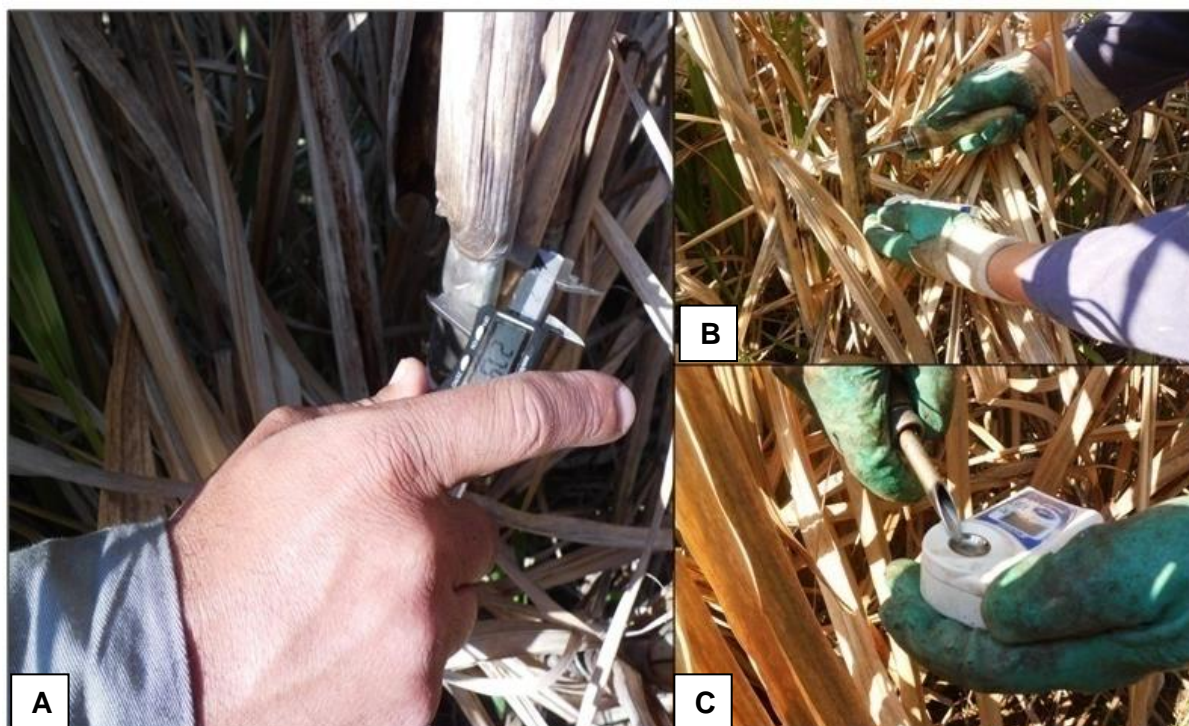


Figura 15 – Determinação do diâmetro do colmo (A), extração do caldo (B) e determinação do °Brix com refratômetro digital portátil (C).

Foram cortados todos os colmos a cada metro ao longo da transeção (Fig.16A) para avaliação do número de colmos (NCM) e da massa do colmo (MC). Os colmos foram dispostos sobre cada ponto (metro) e antes de serem pesados foram contados (Fig. 16B). Para a obtenção da massa dos colmos, todos os colmos do ponto foram pesados com uma balança instalada em um tripé (Fig. 16C). Assim, para obter a massa de colmo por ponto dividiu-se a massa de todos os colmos pesados pelo número de colmos contados, apresentando a unidade de Kg/colmo/metro. 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 direta com o espaçamento do tipo simples (convencional).



Figura 16 – 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).

### 5.1.6 Análise dos dados

Inicialmente foi realizada uma análise estatística descritiva dos atributos de planta (MC, NC, DC, HC, Brix) e dos atributos de solo (RP, Ds, CAD, Pt, Ma, Mi,  $\theta_{cc}$ ,  $\theta_{PMP}$ ,) 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 de aderência 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, de distribuição normal. As análises foram realizadas com o *software R* (R CORE TEAM, 2017).

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 através do *software R* (R CORE TEAM, 2017), como 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 intervalo de confiança (IC).

Com base no autocorrelograma, as variáveis que apresentaram autocorrelação de ao menos um lag, puderam ser relacionadas com as variáveis resposta por meio da função de crosscorrelação. A análise de crosscorrelação foi realizada para as variáveis de planta que foram dependentes espacialmente em relação às variáveis de solo 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, 2017) 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. Se houver 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 as variáveis de planta com as de solo, as que apresentaram dependência cruzada puderam compor o modelo autorregressivo de espaço de estados para cada espaçamento entrelinhas. Nas variáveis escolhidas, foi realizada uma padronização dos dados para manter a mesma ordem 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.

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

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

A análise de espaço de estados foi realizada com o auxílio do software ASTSA [Applied Statistical Time Series Analysis - Shumway (1988)]. 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 os valores transformados observados da variável resposta, conforme demonstrado pela equação 9.

$$R^2 = \frac{SQR}{SQT} \quad \text{Equação 9}$$

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.

## **5.2 Estudo 2: Distribuição espacial da compactação de um Latossolo cultivado com cana-de-açúcar sob dois espaçamentos entrelinhas**

### **5.2.1 Caracterização do experimento**

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° 53' 00,15" Sul e 55° 12' 07,25" Oeste e com uma elevação de 113 m, em relação ao nível do mar (Fig. 17).

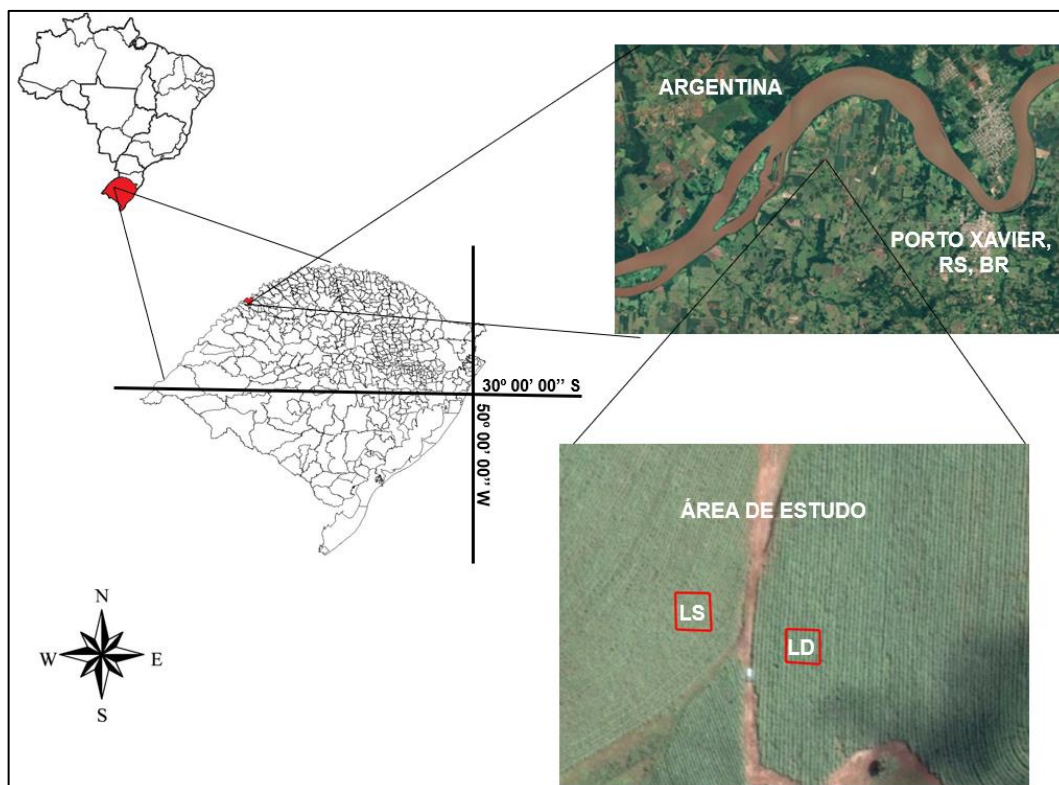


Figura 17 – Localização da área em estudo.

As configurações de espaçamentos entrelinhas da cultura avaliadas no estudo foram: Espaçamento simples com 1,5 metros entrelinhas de cultivo (LS) e Espaçamento combinado duplo com 0,4 m nas linhas duplas e 1,5 m entrelinhas duplas (LD 0,4 x 1,5), detalhados na Figura 18.

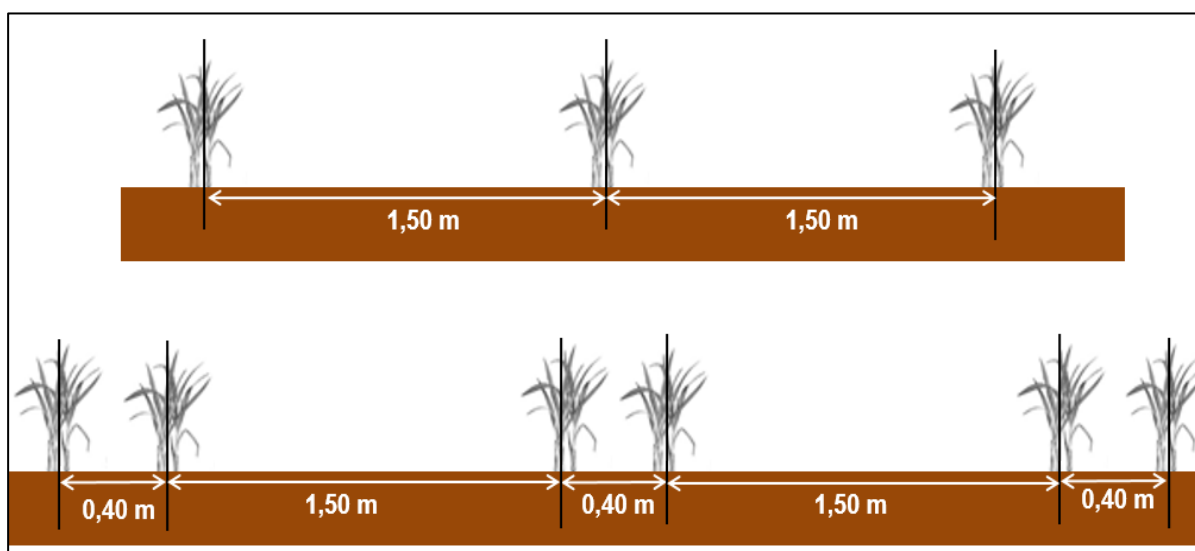


Figura 18 - Configurações de espaçamentos entrelinhas de cultivo da cana-de-açúcar avaliadas neste estudo.



O plantio das áreas foi realizado de forma convencional, com aração e gradagem, subsolagem, realização de sulcos para plantio, distribuição das mudas e cobertura com adubador cobridor. Realizou-se a adubação na linha com base na análise de solo, aplicando  $400 \text{ kg ha}^{-1}$  de NPK (Nitrogênio-Fósforo-Potássio) na formulação 02-30-10 e efetuada a cobertura das mudas nos sulcos. Com relação aos tratos culturais, foi realizada uma adubação de cobertura de  $100 \text{ kg ha}^{-1}$  da formulação de 45-00-00 (ureia) e aplicações de herbicidas sempre que constatada a presença de invasoras. A colheita das áreas foi realizada de modo mecanizado, com uma colhedora Austoft 7000 modelo 1995, acompanhada de um traspordo para coleta dos colmos cortados. O ciclo considerado na avaliação foi o de segunda soca, onde já ocorreu dois eventos de colheita mecanizada.

### 5.2.2 Avaliação de atributos físicos do solo

No dia 13 de janeiro de 2016, durante o ciclo de cana de segunda soca, em cada tipo de configuração de espaçamento, foram coletadas amostras com estrutura preservada na camada de solo de 0,00-0,10 m. As amostras foram coletadas em anéis volumétricos de 0,03 m de altura e 0,0485 m de diâmetro sendo uma para cada ponto de amostragem, totalizando 200 amostras nos dois tipos de espaçamentos. Foi realizada a raspagem dos primeiros 0,03 m de solo e introduzido o anel, o qual atingiu a profundidade de 0,06 m representando a camada de 0,0 - 0,10 m de solo, conforme detalhado na Fig. 19.

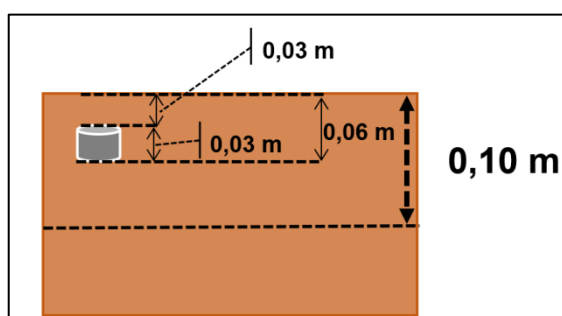


Figura 19 - Posição da amostragem no perfil do solo.

Para considerar a variabilidade espacial dos atributos físicos do solo, foi estabelecida uma grade amostral, com espaçamento entre amostras de 0,5 m por 1 m, totalizando 100 pontos de amostragem para cada tipo de espaçamento, conforme

apresentado na Fig. 20, a qual apresenta a localização da grade amostral em cada espaçamento e as coordenadas dos pontos de amostragem em metros.

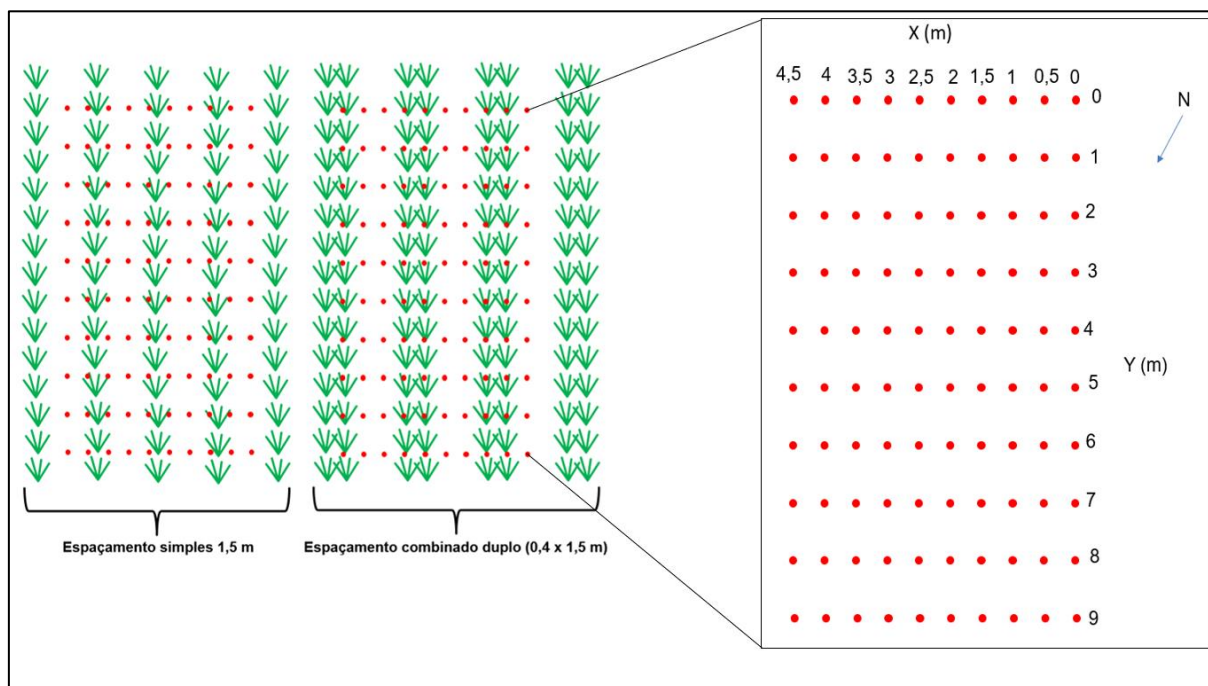


Figura 20 – Grade amostral utilizada na coleta de amostras de solo em cada espaçamento e coordenadas espaciais dos pontos de amostragem em metros.

Para localizar os pontos de amostragem, utilizou-se réguas e trenas onde através dos cruzamentos destas foi possível localizar os pontos de amostragem (Fig. 21).



Figura 21 – Localização dos pontos de amostragem das amostras de estrutura preservada.

As amostras de solo foram acondicionadas cuidadosamente e transportadas até o Laboratório de Física do Solo da Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel

(FAEM), da Universidade Federal de Pelotas (UFPel). 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 em laboratório ( $R_P$ ) e umidade à base de volume correspondente a capacidade de campo ( $\theta_{cc}$ ).

Realizou-se primeiramente o toailete nas amostras, sendo 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 tensão 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, 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 tensão aplicada e o conteúdo de água, cada amostra foi pesada para obtenção da  $\theta_{cc}$  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  $R_P$  em laboratório.

A  $R_P$  foi determinada em três locais próximos do centro da amostra com uma velocidade de penetração de  $10 \text{ mm min}^{-1}$  (BRADFORD, 1980). Depois de finalizado o ensaio, as amostras foram secas em estufa a  $105 \text{ }^\circ\text{C}$  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 mensuração 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 do conteúdo de água à base de massa na capacidade de campo para base de volume.

### 5.2.3 Análise dos dados

Inicialmente foi realizada uma análise estatística descritiva nos atributos físicos do solo ( $D_s$ ,  $R_P$ ,  $P_t$ ,  $M_a$ ,  $M_i$  e  $\theta_{cc}$ ) 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 do formato da distribuição de frequência dos atributos de solo utilizando como teste o kolmogorov-smirnov ao nível de 5% de significância. 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, 2017).

Após a análise estatística exploratória foi verificada a análise da estrutura de dependência espacial das variáveis através da confecção do semivariograma experimental. O semivariograma mede e descreve a dependência espacial e expressa o grau de semelhança entre o ponto e os seus vizinhos. O semivariograma é um gráfico que representa a estimativa das semivariâncias dos dados  $[\gamma(h)]$  em relação ao número (h) de vetores (“lag” ou número de espaçamentos) que os separa.

Para o cálculo da semivariância é mais comumente utilizado o estimador desenvolvido por Matheron (1962), descrito na equação 10.

$$y(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i + h)] \quad \text{Equação 10}$$

Onde:  $y(h)$  é a semivariância dos dados distantes entre si de um número h de vetores de espaçamento ou “lag”,  $z(x_i)$  e  $z(x_i+h)$  são os pares de valores medidos separados por um vetor h,  $N(h)$  é o número de pares de valores  $[z(x_i) - z(x_i+h)]$  separados pelo vetor h, e Z é a variável em estudo.

O estimador desenvolvido por Matheron (1962) foi construído a partir das médias dos quadrados dos incrementos do processo, e fundamenta-se no método dos momentos. Este estimador pode ser influenciado pela presença de outliers (CRESSIE, 1993; LI; LAKE,1994) não sendo um estimador robusto. Assim, para as variáveis que não apresentaram distribuição de probabilidade normal foi utilizado outro estimador, considerado mais robusto. Devido à sensibilidade do estimador de Matheron frente aos outliers, Cressie e Hawkins (1980) quiseram propor um estimador mais robusto. Para tanto, eles removeram o quadrado presente nos

incrementos do estimador de Matheron. Basicamente, a ideia era a de que a raiz quadrada diminuísse a contaminação por valores discrepantes. Este estimador é conhecido como estimador robusto e é definido pela equação 11, na qual o denominador corrige viés sob gaussianidade. Assim, para as variáveis que não apresentaram distribuição de probabilidade normal, foi utilizado na estimativa da semivariância o estimador proposto por Cressie e Hawkins (1980).

$$2y(h) = \frac{\left[ \frac{1}{N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} |z(x_i + h) - z(x_i)|^2 \right]^{\frac{1}{2}}}{\left( 0,457 + \frac{0,494}{N(h)} \right)} \quad \text{Equação 11}$$

Onde:  $y(h)$  é o valor da estimativa da semivariância;  $Z(x_i)$  é o valor da variável  $Z$  no ponto  $x_i$ ;  $Z(x_i + h)$  é o valor da variável  $Z$  no ponto  $x_i + h$ ;  $N(h)$  é o número de pares separados por uma determinada distância  $h$ .

Após a etapa de confecção dos semivariogramas experimentais, procedeu-se o ajuste da curva que proporciona a máxima correlação possível com os pontos calculados a partir dos estimadores de semivariância. Com isso, foram obtidos os modelos ajustados, os quais são chamados de modelos teóricos do semivariograma, permitindo assim que haja continuidade espacial das observações. Os modelos ajustados podem ser do tipo: Linear; Esférico; Exponencial; e Gaussiano. Como critérios para definir o melhor modelo, utilizou-se a técnica da validação cruzada, onde valores estimados foram relacionados com os valores amostrados através da análise de regressão linear. Foram adotados dois parâmetros da análise de regressão para verificar a qualidade do modelo: A soma dos quadrados dos resíduos (SQR) e o valor do coeficiente de determinação ( $R^2$ ).

Após o ajuste do modelo, pôde-se obter os parâmetros do semivariograma, sendo eles:

- i) Alcance (a): distância dentro da qual as amostras apresentam-se correlacionadas espacialmente;
- ii) Patamar (C): é o valor do semivariograma correspondente a seu alcance (a), sendo que deste ponto em diante considera-se que não existe mais dependência espacial entre as amostras, porque a variância da diferença entre pares de amostras ( $\text{Var}[Z(x) - Z(x+h)]$ ) torna-se invariante com a distância;

- iii) Efeito Pepita ( $C_0$ ): por definição,  $\gamma(0)=0$ , entretanto, na prática, à medida que  $h$  tende para 0 (zero),  $\gamma(h)$  se aproxima de um valor positivo chamado Efeito Pepita ( $C_0$ ) que revela a descontinuidade do semivariograma para distâncias menores do que a menor distância entre as amostras;
- iv) Contribuição ( $C_1$ ): é a diferença entre o patamar ( $C$ ) e o Efeito Pepita ( $C_0$ ).

Após os ajustes dos modelos dos semivariogramas teóricos, foram aplicados dois interpoladores para a confecção dos mapas. Nas variáveis que apresentaram dependência espacial e que puderam ter um modelo teórico ajustado, foi utilizado o método da Krigagem ordinária para interpolação dos valores e confecção dos mapas. Já para as variáveis que não apresentaram dependência espacial, foi utilizado o método do inverso do quadrado da distancia para interpolação dos dados. Para a aplicação da krigagem assumiu-se que: eram conhecidas as realizações  $z(x_1), z(x_2), \dots, z(x_n)$  da variável aleatória  $Z(x)$  nos locais  $x_1, x_2, \dots, x_n$ ; e que o semivariograma da variável já havia sido determinado. Dessa forma, determinou-se  $z^*$  na posição  $x_0$ . O valor estimado  $z^*(x_0)$  é dado pela equação 12.

$$z^*(x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i z(x_i) \quad \text{Equação 12}$$

Em que:  $N$  é o número de pontos medidos da variável  $Z(x)$  envolvidos na estimativa de  $z^*(x_0)$  e  $\lambda_i$  são os pesos associados a cada valor medido,  $z(x_i)$ . Se existe dependência espacial (constatada no semivariograma da variável), os pesos  $\lambda_i$  são variáveis de acordo com a distância entre o ponto a ser estimado  $z^*(x_0)$  e os valores  $z(x_i)$  envolvidos nas estimativas.

Já a interpolação por meio do inverso do quadrado da distância foi realizada pela equação 13.

$$z_p = \frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{d_i^2} * z_i \right)}{\sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{d_i^2} \right)} \quad \text{Equação 13}$$

Onde:  $z_p$  - variável interpolada;  $z_i$  - valor da variável da  $i$ -ésima localidade vizinha;  $d_i$  - distância euclidiana entre o  $i$ -ésimo ponto de vizinhança e o ponto amostrado; e  $n$  – número de amostras.

Após a aplicação dos interpoladores foi possível gerar os mapas que apresentam a distribuição espacial dos atributos RP, Ds, Pt, Ma, Mi e  $\theta_{cc}$ . De posse dos mapas de cada atributo em cada espaçamento, foram comparados entre os dois tipos de espaçamentos entrelinhas. A confecção dos semivariogramas, aplicação do interpolador e a confecção do mapa para as variáveis que não apresentaram normalidade foram realizadas pelo *software R* (R CORE TEAM, 2017). Já as variáveis que apresentaram distribuição normal dos dados foram analisadas com o *software GS+* (GAMMA DESIGN SOFTWARE, 2004).

## **6. Resultados e Discussão**

### **6.1 Estudo 1: Relação solo planta sob diferentes espaçamentos entrelinhas**

#### **6.1.1 Análise exploratória dos dados**

Analisando os valores mínimos e máximos (Tabela 1, 2 e 3), verifica-se que a densidade (Ds) apresentou maior amplitude de valores no espaçamento linha dupla nos dois ciclos de cultivo em comparação com o espaçamento linha simples. A maior amplitude da resistência a penetração (RP), em ciclo de primeira soca foi observada no espaçamento LD e em ciclo de segunda soca em LT. A menor diferença entre os valores máximos e mínimos para a RP nos dois ciclos de cultivo foi obtida no espaçamento LS.

Quanto aos valores de CV da Ds, percebe-se que o espaçamento linha dupla tanto em ciclo de primeira como em segunda soca, apresentou maior valor em relação aos outros dois tipos de espaçamentos (7,1 e 6,0%, respectivamente) (Tabelas 1, 2 e 3). Na avaliação desta medida de dispersão para a RP, o maior CV em ciclo de cana planta foi obtido no espaçamento LD e em ciclo de segunda soca no espaçamento LT. Utilizando a classificação do coeficiente de variação proposta

por Wilding e Dress (1983), sendo  $CV < 15\%$  de baixa variabilidade,  $15\% \leq CV < 35\%$  média variabilidade e  $CV \geq 35\%$  alta variabilidade, a Ds apresentou baixa variabilidade nos três tipos de espaçamentos entrelinhas e nos dois ciclos de cana soca. A RP apresentou alta variabilidade no espaçamento LD para os dois ciclos e no espaçamento LT no ciclo de segunda soca. No espaçamento LS tanto em ciclo de primeira como de segunda soca e no espaçamento LT em ciclo de primeira soca, a dispersão dos dados foi classificada como média.

Os coeficientes de assimetria, para a Ds, indicaram uma leve assimetria da curva de distribuição de probabilidade, com valores negativos para os espaçamentos simples e triplo e positivo para o espaçamento duplo em ciclo de primeira soca, e com valores positivos para os espaçamentos simples e triplo e negativo para o espaçamento duplo em ciclo de segunda soca. A RP apresentou valores positivos do coeficiente de assimetria nos dois ciclos de cultivos e nos três espaçamentos. Já o coeficiente de curtose da Ds apresentou predomínio de valores negativos sendo positivo apenas no espaçamento linha dupla em ciclo de segunda soca. Desta forma, é possível classificar a distribuição desta variável em platicúrtica para os espaçamentos simples, duplo e triplo em ciclo de primeira soca e nos espaçamentos simples e triplo no ciclo de segunda soca e leptocúrtica para o espaçamento duplo em ciclo de segunda soca (Tabelas 1, 2 e 3). Na avaliação do coeficiente de curtose para a RP, classifica-se a distribuição como leptocurtica para o espaçamento LD nos dois ciclos de cultivo e para o espaçamento LS no ciclo de primeira soca. Para o espaçamento LT nos dois ciclos de cultivo e no espaçamento LS em ciclo de segunda soca, o formato da curva de distribuição de probabilidade acumulada é classificado em platicúrtica. As distribuições para a Ds e a RP nos três espaçamentos e nos dois ciclos de cultivo podem ser consideradas normais, conforme o teste não paramétrico Kolmogorov-Smirnov a 5% de probabilidade.



Tabela 1 – Densidade (Ds), resistência a penetração (RP), porosidade total (Pt), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), conteúdo de água a base de volume na capacidade de campo ( $\theta_{CC}$ ), conteúdo de água a base de volume no ponto de murcha permanente ( $\theta_{PMP}$ ) e água disponível (AD) de um Latossolo em ciclo de primeira e segunda soca no espaçamento linha simples.

Variável	Ciclo	n	X <sup>1</sup>	Mediana	Min. <sup>1</sup>	Max. <sup>1</sup>	s <sup>1</sup>	CV(%) <sup>1</sup>	Ass. <sup>1</sup>	Cur. <sup>1</sup>	Distr <sup>1</sup>	p <sup>2</sup>
<b>Ds</b> (Mg m <sup>-3</sup> )	1º soca	50	1,405	1,425	1,260	1,510	0,067	4,75	-0,582	-0,740	N	0,149
	2º soca	50	1,289	1,277	1,165	1,448	0,064	5,00	0,436	-0,295	N	0,704
<b>RP</b> (MPa)	1º soca	50	2,140	2,100	1,240	3,770	0,479	22,41	0,508	1,410	N	0,922
	2º soca	50	2,200	2,158	0,760	3,815	0,756	34,37	0,079	-0,725	N	0,987
<b>Pt</b> (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	1º soca	50	0,533	0,530	0,487	0,589	0,024	4,45	0,357	-0,664	N	0,512
	2º soca	50	0,587	0,586	0,525	0,663	0,032	5,49	0,093	-0,627	N	0,767
<b>Ma</b> (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	1º soca	50	0,088	0,078	0,031	0,170	0,035	39,33	0,792	-0,259	N	0,233
	2º soca	50	0,143	0,143	0,058	0,212	0,038	26,46	-0,261	-0,552	N	0,968
<b>Mi</b> (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	1º soca	50	0,445	0,448	0,399	0,481	0,021	4,68	-0,529	-0,412	N	0,582
	2º soca	50	0,444	0,444	0,408	0,476	0,014	3,23	-0,040	-0,218	N	0,983
<b><math>\theta_{CC}</math></b> (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	1º soca	50	0,429	0,432	0,371	0,477	0,026	5,96	-0,409	-0,557	N	0,745
	2º soca	50	0,394	0,393	0,346	0,437	0,029	7,35	-0,093	-1,329	N	0,617
<b><math>\theta_{PMP}</math></b> (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	1º soca	50	0,369	0,377	0,293	0,415	0,031	8,29	-0,567	-0,634	N	0,2384
	2º soca	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>AD</b> (mm)	1º soca	50	6,05	8,840	4,00	9,198	1,381	22,83	0,550	-0,450	N	0,867
	2º soca	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

<sup>1</sup>X – média; Min. - valor mínimo; Max. - valor máximo; s - desvio padrão; CV - coeficiente de variação; Ass. - coeficientes de assimetria; Cur. - coeficiente de curtose; Distri. – formato da curva da função de distribuição de probabilidade: N = Normal, NN = Não normal.

<sup>2</sup>p – 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 significância).

Tabela 2 – Densidade (Ds), resistência a penetração (RP), porosidade total (Pt), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), conteúdo de água a base de volume na capacidade de campo ( $\theta_{cc}$ ), conteúdo de água a base de volume no ponto de murcha permanente ( $\theta_{PMP}$ ) e água disponível (AD) de um Latossolo em ciclo de primeira e segunda soca no espaçamento linha dupla.

Variável	Ciclo	n	X <sup>1</sup>	Mediana	Min. <sup>1</sup>	Max. <sup>1</sup>	s <sup>1</sup>	CV(%) <sup>1</sup>	Ass. <sup>1</sup>	Cur. <sup>1</sup>	Distr <sup>1</sup>	p <sup>2</sup>
<b>Ds</b> (Mg m <sup>-3</sup> )	1º soca	50	1,330	1,335	1,170	1,570	0,095	7,11	0,424	-0,357	N	0,492
	2º soca	50	1,316	1,327	1,062	1,497	0,079	5,99	-0,297	1,659	N	0,671
<b>RP</b> (MPa)	1º soca	50	2,261	1,980	1,040	4,980	0,959	42,40	1,180	1,109	N	0,288
	2º soca	50	2,140	1,960	0,630	4,275	0,799	37,34	0,841	0,919	N	0,531
<b>Pt</b> (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	1º soca	50	0,564	0,560	0,499	0,646	0,035	6,12	0,361	-0,503	N	0,815
	2º soca	50	0,591	0,596	0,510	0,673	0,028	4,77	-0,126	1,166	N	0,508
<b>Ma</b> (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	1º soca	50	0,124	0,120	0,035	0,249	0,056	45,15	0,282	-0,900	N	0,722
	2º soca	50	0,142	0,140	0,054	0,235	0,035	24,47	0,335	0,761	N	0,557
<b>Mi</b> (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	1º soca	50	0,440	0,438	0,397	0,498	0,026	6,00	0,218	-0,838	N	0,941
	2º soca	50	0,449	0,452	0,399	0,486	0,022	4,79	-0,421	-0,265	N	0,931
<b><math>\theta_{cc}</math></b> (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	1º soca	50	0,415	0,408	0,357	0,491	0,036	8,58	0,401	-0,818	N	0,555
	2º soca	50	0,427	0,429	0,374	0,476	0,024	5,57	-0,322	-0,212	N	0,490
<b><math>\theta_{PMP}</math></b> (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	1º soca	50	0,345	0,347	0,285	0,428	0,040	11,54	0,260	-0,983	N	0,768
	2º soca	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>AD</b> (mm)	1º soca	50	6,975	7,035	4,326	11,418	1,533	21,99	0,294	-0,061	N	0,537
	2º soca	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

<sup>1</sup>X – média; Min. - valor mínimo; Max. - valor máximo; s - desvio padrão; CV - coeficiente de variação; Ass. - coeficientes de assimetria; Cur. - coeficiente de curtose; Distr. – formato da curva da função de distribuição de probabilidade: N = Normal, NN = Não normal.

<sup>2</sup>p – 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 significância).

Tabela 3 – Densidade (Ds), resistência a penetração (RP), porosidade total (Pt), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), conteúdo de água a base de volume na capacidade de campo ( $\theta_{CC}$ ), conteúdo de água a base de volume no ponto de murcha permanente ( $\theta_{PMP}$ ) e água disponível (AD) de um Latossolo em ciclo de primeira e segunda soca no espaçamento linha tripla.

Variável	Ciclo	n	X <sup>1</sup>	Mediana	Min. <sup>1</sup>	Max. <sup>1</sup>	s <sup>1</sup>	CV(%) <sup>1</sup>	Ass. <sup>1</sup>	Cur. <sup>1</sup>	Distr <sup>1</sup>	p <sup>2</sup>
<b>Ds</b> (Mg m <sup>-3</sup> )	1º soca	50	1,468	1,470	1,320	1,610	0,065	4,45	-0,427	-0,194	N	0,606
	2º soca	50	1,341	1,359	1,176	1,510	0,078	5,83	0,012	-0,496	N	0,459
<b>RP</b> (MPa)	1º soca	50	4,332	4,175	2,690	6,360	0,910	21,00	0,403	-0,312	N	0,651
	2º soca	50	3,377	3,168	1,235	6,451	1,311	38,83	0,520	-0,598	N	0,550
<b>Pt</b> (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	1º soca	50	0,554	0,552	0,496	0,595	0,019	3,44	-0,127	0,908	N	0,958
	2º soca	50	0,572	0,571	0,517	0,646	0,029	5,07	0,534	0,259	N	0,916
<b>Ma</b> (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	1º soca	50	0,077	0,073	0,038	0,151	0,024	30,68	1,185	1,510	N	0,194
	2º soca	50	0,111	0,104	0,039	0,215	0,043	39,29	0,534	-0,518	N	0,708
<b>Mi</b> (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	1º soca	50	0,477	0,477	0,435	0,507	0,015	3,24	-0,531	0,391	N	0,838
	2º soca	50	0,461	0,470	0,398	0,508	0,029	6,28	-0,761	-0,368	N	0,195
<b><math>\theta_{CC}</math></b> (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	1º soca	50	0,465	0,468	0,392	0,505	0,023	4,91	-1,115	1,712	N	0,197
	2º soca	50	0,438	0,444	0,376	0,494	0,028	6,42	-0,394	-0,620	N	0,614
<b><math>\theta_{PMP}</math></b> (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	1º soca	50	0,405	0,409	0,332	0,442	0,022	5,48	-0,973	1,586	N	0,687
	2º soca	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>AD</b> (mm)	1º soca	50	5,983	6,038	4,59	7,562	0,8805	14,72	0,064	-1,130	N	0,720
	2º soca	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

<sup>1</sup>X – média; Min. - valor mínimo; Max. - valor máximo; s - desvio padrão; CV - coeficiente de variação; Ass. - coeficientes de assimetria; Cur. - coeficiente de curtose; Distr. – formato da curva da função de distribuição de probabilidade: N = Normal, NN = Não normal.

<sup>2</sup>p – 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 significância).

Com relação a porosidade total e a microporosidade na avaliação dos valores mínimos e máximos foi observado maior e menor amplitude em ciclo de cana de primeira e segunda soca nos espaçamentos linha dupla e linha tripla, respectivamente. Já a macroporosidade obteve maiores amplitudes de valores no espaçamento linha dupla para os dois ciclos e menor amplitude no espaçamento linha tripla para o ciclo de primeira soca e no espaçamento linha simples no ciclo de segunda soca.

Quanto ao coeficiente de variação (CV), a porosidade total, macro e microporosidade obtiveram menores valores em ciclo de primeira soca no espaçamento linha tripla (3,4%, 30,7% e 3,2%, respectivamente). Já em ciclo de segunda soca os menores valores de CV foram observados para a Pt, Ma e Mi nos espaçamentos linha tripla (5,1%), linha dupla (24,5%) e linha simples (3,2%), respectivamente. Os maiores valores de CV para os atributos porosidade total, micro e macroporosidade em ciclo de primeira soca foi observado no espaçamento linha dupla, sendo 6,1%, 6% e 45,1%, respectivamente (Tabelas 1, 2 e 3). Para o ciclo de segunda soca, os maiores valores de CV da Pt foram obtidos no espaçamento linha simples (5,5%), e para Ma e Mi, os maiores valores de CV foram observados no espaçamento linha tripla (39,3% e 6,3%, respectivamente). Utilizando a classificação de Wilding e Dress (1983) para avaliação do coeficiente de variação, percebe-se que a Pt e Mi apresentam baixa variabilidade ( $CV < 15\%$ ) nos três tipos de espaçamento e nos dois ciclos avaliados. Quanto a Ma, o CV para os espaçamentos LS e LD no ciclo de cana de 1° soca foram avaliados em alta variabilidade ( $CV > 35\%$ ) e no ciclo de cana de 2° soca os coeficientes de variação foram classificados como média variabilidade para os espaçamentos LS e LD. No espaçamento LT os valores de macroporosidade apresentaram alta ( $CV \geq 35\%$ ) e média variabilidade ( $15\% \leq CV < 35\%$ ) e em ciclo de 1° e 2° soca, respectivamente.

Observando os valores do coeficiente de assimetria para a Pt, Mi e Ma nos dois ciclos avaliados (Tabelas 1, 2 e 3), nota-se um comportamento aleatório da assimetria do gráfico da função densidade de probabilidade dos valores dos atributos avaliados, apresentando tanto valor negativo como positivo do coeficiente de assimetria. Destaca-se que todos os valores do coeficiente de assimetria foram próximos a zero, com exceção da Ma no espaçamento LT em ciclo de cana de 1° soca, cujo valor foi de 1,185. Com relação aos coeficientes de curtose dos atributos Pt, Ma e Mi, no espaçamento LS nos dois ciclos (1° e 2° soca), os atributos

apresentaram um achatamento da curva da função de distribuição de probabilidade, sendo platicúrtica, devido ao coeficiente de curtose apresentar sinal negativo. No espaçamento LD, em ciclo de primeira soca os três atributos apresentaram o formato da curva foi do tipo platicúrtica e no ciclo de segunda soca, apenas o atributo Mi obteve esse formato. No ciclo de segunda soca nos atributos Pt e Ma, o formato apresentado foi classificado em leptocúrtica. A mesma classificação foi obtida para a Pt para os dois ciclos de cultivo e para Ma e Mi no ciclo de primeira soca, sendo que para esses dois últimos atributos no ciclo de cana de segunda soca o formato da curva foi classificado em platicúrtica. Embora as variáveis Pt, Ma e Mi tivessem apresentado uma assimetria na curva de distribuição, nos três espaçamentos (LS, LD e LT) e nos dois ciclos de cultivo as distribuições para estas variáveis de solo podem ser consideradas normais, conforme indica o teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov a 5% de probabilidade.

Nas Tabelas 1, 2 e 3 também são apresentados os valores das variáveis relacionadas a retenção e disponibilidade de água ( $\theta_{CC}$ ,  $\theta_{PMP}$  e AD). Pela avaliação dos valores de mínimos e máximos indica-se que a menor amplitude para os atributos  $\theta_{CC}$  e  $\theta_{PMP}$  foi observada no espaçamento LS para os dois ciclos de cultivo. Quanto a AD, a menor amplitude foi observada no espaçamento LT. Já quanto a maior amplitude, para a  $\theta_{PMP}$ ,  $\theta_{CC}$  e AD no ciclo de primeira soca, foi obtida no espaçamento LD. Para a  $\theta_{CC}$  no ciclo de segunda soca, a maior diferença entre os valores de mínimo e máximo foi observada no espaçamento LT.

Analisando o coeficiente de variação para esses atributos, nota-se que os menores valores em ciclo de cana de primeira soca são observados no espaçamento LT. Já para  $\theta_{CC}$  em ciclo de segunda soca, o menor valor foi observado no espaçamento LD. De acordo com a classificação de Wilding e Dress (1983), os atributos  $\theta_{PMP}$  e  $\theta_{CC}$  nos três espaçamentos e nos dois ciclos de cultivo apresentaram baixa variabilidade ( $CV < 15\%$ ). Já a AD, apresentou média variabilidade ( $15\% \leq CV < 35\%$ ) no ciclo de primeira soca nos espaçamentos LS e LD e baixa no espaçamento LT.

Na avaliação do coeficiente de assimetria, nota-se que os espaçamentos LS e LT nos dois ciclos para os atributos  $\theta_{PMP}$  e  $\theta_{CC}$  obtiveram valor negativo dos coeficientes, indicando que a cauda do lado esquerdo da função densidade de probabilidade é maior que a do lado direito. No espaçamento LD, apenas a  $\theta_{CC}$  no ciclo de segunda soca apresentou valor negativo do coeficiente de assimetria, sendo

os valores para  $\theta_{PMP}$  e  $\theta_{CC}$  em ciclo de primeira soca nesse espaçamento positivos. A variável AD no ciclo de primeira soca para os três espaçamentos apresentou valores positivos do coeficiente de assimetria indicando que a cauda da curva da função densidade de probabilidade do lado direito é maior que a do lado esquerdo. De acordo com os coeficientes de curtose nos espaçamentos LS e LD nos dois ciclos de cultivo para os três atributos ( $\theta_{CC}$ ,  $\theta_{PMP}$  e AD), foi possível classificar a curva da função densidade de probabilidade em platicúrtica, devido ao sinal negativo dos coeficientes de curtose. Quanto a LT, os atributos  $\theta_{CC}$  e  $\theta_{PMP}$  em ciclo de primeira soca apresentaram o formato da curva da função densidade de probabilidade em leptocúrtica. A variável  $\theta_{CC}$  em ciclo de segunda soca e a variável AD em ciclo de segunda soca apresentaram classificação do tipo platicúrtica, com um maior achatamento da curva em relação a curva de distribuição normal. As três variáveis ( $\theta_{CC}$ ,  $\theta_{PMP}$  e AD) nos dois ciclos e nos três espaçamentos podem ser consideradas normais, conforme indica o teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov a 5% de probabilidade.

Nas Tabelas 4, 5 e 6 é possível observar os resultados da estatística descritiva dos componentes de produção da cana-de-açúcar (MC, HC, DC e NCM2). Avaliando os valores de mínimo e máximo, nota-se para a variável MC nos dois ciclos de cultivo, a maior e menor amplitude no espaçamento LD e LT, respectivamente. Para HC em ciclo de primeira e segunda soca as maiores amplitudes foram observadas no espaçamento LD e LT, respectivamente, e a menor diferença entre mínimo e máximo observado no espaçamento LT em ciclo de primeira soca e no espaçamento LS para o ciclo de segunda soca. Já a variável DC apresentou maior e menor diferença entre mínimo e máximo no ciclo de segunda soca nos espaçamentos LS e LT, respectivamente. A variável NCM2 apresentou maior amplitude de valores em ciclo de primeira soca no espaçamento LD e no ciclo de segunda soca no espaçamento LS. Quanto a menor amplitude dos valores de NCM2, no ciclo de primeira soca foi observado no espaçamento LS e em ciclo de segunda soca no espaçamento LD.

Com relação a dispersão dos valores, as variáveis HC e DC apresentaram baixa variabilidade e o componente MC média, nos três espaçamentos e nos dois ciclos de cultivo, de acordo com a classificação do coeficiente de variação de Wilding e Dress (1983). Já o NCM2, no ciclo de segunda soca nos três espaçamentos e no ciclo de primeira soca no espaçamento LD observou-se alta

variabilidade dos dados ( $CV \geq 35\%$ ) e nos espaçamentos LS e LT no ciclo de primeira soca foi observado média variabilidade ( $15\% \leq CV < 35\%$ ) de acordo com a classificação de Wilding e Dress (1983). Nas Tabelas 4, 5 e 6, também é possível visualizar os coeficientes de assimetria para os componentes de produção da cana-de-açúcar.

Nos espaçamentos LD e LT nos dois ciclos de cultivo e no espaçamento LS em ciclo de segunda soca, os valores do coeficiente de assimetria foram positivos, indicando que a cauda da curva de distribuição de probabilidade acumulada é maior do lado direito que do lado esquerdo. O DC também apresentou valores positivos do coeficiente de assimetria nos espaçamentos LD e LT no ciclo de segunda soca e no espaçamento LS em ciclo de primeira soca. Já a variável HC obteve valores negativos para o coeficiente de assimetria nos três espaçamentos e nos dois ciclos de cultivo. A variável NCM2 obteve valores positivos do coeficiente de assimetria nos espaçamentos: LT nos dois ciclos de cultivo; LD ciclo de primeira soca; e LS no ciclo de segunda soca. Quanto ao coeficiente de curtose, a curva de distribuição de probabilidade acumulada para a variável MC nos três espaçamentos em ciclos de primeira e segunda soca podem ser classificadas em leptocúrtica e platicúrtica, respectivamente. Os valores dos coeficientes de curtose para a HC nos três espaçamentos e nos dois ciclos foram positivos, permitindo classificar a curva de distribuição em leptocúrtica. Para a variável DC, os valores dos coeficientes de curtose para os espaçamentos LD e LT em ciclo de segunda soca e no espaçamento LS em ciclo de primeira soca foram negativos, sendo a classificação da forma da curva de distribuição achatada em relação a curva de distribuição normal, ou seja, platicúrtica. Quanto ao NCM2, os valores dos coeficientes de curtose nos três espaçamentos no ciclo de primeira soca e no espaçamento LD em ciclo de segunda soca também foram negativos, sendo a curva de distribuição também classificada em platicúrtica. Embora, algumas diferenças nos coeficientes de assimetria entre os atributos, a MC, a HC, o NCM<sup>2</sup> e a DC apresentaram distribuição normal, indicado pelo teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov a 5% de probabilidade.

Tabela 4 - Massa do colmo (MC), altura do colmo (HC), diâmetro do colmo (DC), número de colmos por metro quadrado (NCM2), sólidos solúveis totais do caldo (Brix), massa de colmos por hectare (TCH) e massa de sólidos solúveis do caldo por hectare (TBH) em ciclo de primeira e segunda soca no espaçamento linha simples.

Variável	Ciclo	n	X <sup>1</sup>	Med.	Min. <sup>1</sup>	Max. <sup>1</sup>	s <sup>1</sup>	CV(%) <sup>1</sup>	Ass. <sup>1</sup>	Cur. <sup>1</sup>	Distr <sup>1</sup>	p <sup>2</sup>
<b>MC (Kg)</b>	1º soca	50	0,77	0,78	0,36	0,95	0,13	17,13	-0,83	0,61	N	0,621
	2º soca	50	0,35	0,34	0,18	0,53	0,08	24,14	0,13	-0,49	N	0,976
<b>HC (m)</b>	1º soca	50	1,98	2,00	1,35	2,32	0,19	9,66	-0,61	1,17	N	0,886
	2º soca	50	1,08	1,10	0,73	1,37	0,14	13,26	-0,22	0,18	N	0,718
<b>DC (mm)</b>	1º soca	50	21,39	21,38	16,81	26,82	2,21	10,33	0,06	-0,43	N	0,940
	2º soca	50	19,96	19,98	14,23	23,59	1,76	8,84	-0,32	1,10	N	0,918
<b>NCM2 (un)</b>	1º soca	50	8,71	8,67	2,00	13,33	2,63	30,17	-0,27	-0,58	N	0,595
	2º soca	50	7,63	7,33	2,00	17,33	3,16	41,46	0,78	0,78	N	0,567
<b>Brix (%)</b>	1º soca	50	20,11	20,22	17,93	21,70	0,79	3,94	-0,67	0,88	N	0,852
	2º soca	50	21,15	21,23	19,67	22,57	0,57	2,69	-0,16	1,36	N	0,642
<b>TCH (Mg)</b>	1º soca	50	66,79	66,50	15,33	120,67	23,26	34,82	0,00	-0,02	N	0,996
	2º soca	50	25,82	24,33	6,33	55,67	11,03	42,72	0,56	0,16	N	0,815
<b>TBH (Mg)</b>	1º soca	50	13,42	13,38	2,83	24,62	4,69	34,95	0,10	0,18	N	0,998
	2º soca	50	5,42	5,03	1,30	11,82	2,36	43,51	0,63	0,19	N	0,528

<sup>1</sup>X – média; Med. – mediana; Min. - valor mínimo; Max. - valor máximo; s - desvio padrão; CV - coeficiente de variação; Ass. - coeficientes de assimetria; Cur. - coeficiente de curtose; Distr. – formato da curva da função de distribuição de probabilidade: N = Normal, NN = Não normal.

<sup>2</sup>p – 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 significância).



Tabela 5 - Massa do colmo (MC), altura do colmo (HC), diâmetro do colmo (DC), número de colmos por metro quadrado (NCM2), sólidos solúveis totais do caldo (Brix), massa de colmos por hectare (TCH) e massa de sólidos solúveis do caldo por hectare (TBH) em ciclo de primeira e segunda soca no espaçamento linha dupla.

Variável	Ciclo	n	X <sup>1</sup>	Med.	Min. <sup>1</sup>	Max. <sup>1</sup>	s <sup>1</sup>	CV(%) <sup>1</sup>	Ass. <sup>1</sup>	Cur. <sup>1</sup>	Distr <sup>1</sup>	p <sup>2</sup>
<b>MC (Kg)</b>	1º soca	50	0,75	0,73	0,43	1,12	0,14	19,18	0,25	0,08	N	0,825
	2º soca	50	0,41	0,39	0,22	0,65	0,10	25,12	0,13	-0,40	N	0,984
<b>HC (m)</b>	1º soca	50	1,87	1,87	1,23	2,20	0,16	8,64	-1,18	4,26	N	0,412
	2º soca	50	1,11	1,10	0,70	1,37	0,14	12,38	-0,41	0,26	N	0,569
<b>DC (mm)</b>	1º soca	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2º soca	50	19,88	19,47	16,50	24,44	1,76	8,84	0,30	-0,42	N	0,514
<b>NCM2 (un)</b>	1º soca	50	8,16	8,10	2,38	16,19	3,18	39,01	0,44	-0,03	N	0,895
	2º soca	50	6,27	6,67	1,43	10,95	2,61	41,69	-0,38	-0,94	N	0,164
<b>Brix (%)</b>	1º soca	50	19,16	19,05	17,07	21,03	0,82	4,27	-0,03	0,26	N	0,918
	2º soca	50	20,87	21,00	18,17	22,17	0,70	3,33	-1,54	4,16	N	0,557
<b>TCH (Mg)</b>	1º soca	50	60,94	62,38	14,29	115,00	24,29	39,85	0,14	-0,39	N	0,830
	2º soca	50	25,26	26,79	4,76	52,62	12,16	48,13	0,13	-0,72	N	0,947
<b>TBH (Mg)</b>	1º soca	50	11,64	11,40	2,95	21,74	4,62	39,71	0,19	-0,26	N	0,932
	2º soca	50	5,28	5,57	0,99	11,26	2,57	48,60	0,17	-0,67	N	0,951

<sup>1</sup>X – média; Min. - valor mínimo; Max. - valor máximo; s - desvio padrão; CV - coeficiente de variação; Ass. - coeficientes de assimetria; Cur. - coeficiente de curtose; Distr. – formato da curva da função de distribuição de probabilidade: N = Normal, NN = Não normal.

<sup>2</sup>p – 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 significância).

Tabela 6 - Massa do colmo (MC), altura do colmo (HC), diâmetro do colmo (DC), número de colmos por metro quadrado (NCM2), sólidos solúveis totais do caldo (Brix), massa de colmos por hectare (TCH) e massa de sólidos solúveis do caldo por hectare (TBH) em ciclo de primeira e segunda soca no espaçamento linha tripla.

Variável	Ciclo	n	X <sup>1</sup>	Med.	Min. <sup>1</sup>	Max. <sup>1</sup>	s <sup>1</sup>	CV(%) <sup>1</sup>	Ass. <sup>1</sup>	Cur. <sup>1</sup>	Distr <sup>1</sup>	p <sup>2</sup>
<b>MC (Kg)</b>	1º soca	50	0,57	0,57	0,42	0,84	0,08	14,06	0,82	2,18	N	0,841
	2º soca	50	0,32	0,31	0,20	0,46	0,06	20,55	0,14	-0,50	N	0,950
<b>HC (m)</b>	1º soca	50	1,60	1,63	1,20	1,90	0,15	9,16	-0,33	0,17	N	0,437
	2º soca	50	0,95	0,93	0,53	1,30	0,14	14,96	-0,37	0,97	N	0,531
<b>DC (mm)</b>	1º soca	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2º soca	50	20,49	20,20	16,37	24,18	1,87	9,12	0,08	-0,55	N	0,708
<b>NCM2 (un)</b>	1º soca	50	9,10	9,05	3,33	16,19	3,01	33,07	0,23	-0,05	N	0,609
	2º soca	50	5,76	5,48	2,38	13,81	2,58	44,78	1,11	1,07	N	0,06
<b>Brix (%)</b>	1º soca	50	21,56	21,67	19,53	23,13	0,68	3,17	-0,64	1,04	N	0,373
	2º soca	50	20,78	20,77	18,93	22,43	0,72	3,46	-0,04	0,23	N	0,961
<b>TCH (Mg)</b>	1º soca	50	51,05	50,48	14,29	94,05	16,61	32,54	0,10	0,20	N	0,546
	2º soca	50	17,92	16,67	5,71	31,91	7,70	42,98	0,35	-1,04	N	0,694
<b>TBH (Mg)</b>	1º soca	50	11,01	10,92	2,97	18,37	3,53	32,09	-0,12	-0,23	N	0,908
	2º soca	50	3,72	3,38	1,20	6,64	1,58	42,59	0,34	-1,03	N	0,638

<sup>1</sup>X – média; Min. - valor mínimo; Max. - valor máximo; s - desvio padrão; CV - coeficiente de variação; Ass. - coeficientes de assimetria; Cur. - coeficiente de curtose; Distri. – formato da curva da função de distribuição de probabilidade: N = Normal, NN = Não normal.

<sup>2</sup>p – 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 significância).

Com relação a variável da cana-de-açúcar que expressa a riqueza em açúcares (Brix) são apresentados nas Tabelas 4, 5 e 6 os valores máximos e mínimos para o Brix nos três espaçamentos e nos dois ciclos de cultivo. Percebe-se uma maior amplitude de valores no espaçamento LD nos dois ciclos de cultivo e uma menor amplitude em ciclo de primeira soca no espaçamento LT e em ciclo de segunda soca no espaçamento LS. Quanto ao coeficiente de variação, nota-se baixos valores para este atributo, sendo a dispersão dos dados classificados de

acordo com a classificação de Wilding e Dress (1983) em baixa variabilidade ( $CV < 15\%$ ) para os três espaçamentos e nos dois ciclos de cultivo. Quanto ao coeficiente de assimetria, nos três espaçamentos e nos dois ciclos de cultivo os valores foram negativos, indicando que a cauda da curva de distribuição de probabilidade acumulada é maior do lado esquerdo que do lado direito para o atributo Brix. Com relação ao coeficiente de curtose, para a variável Brix nos três espaçamentos e nos dois ciclos de cultivo os valores foram positivos, permitindo classificar a curva de distribuição em leptocúrtica. Embora apresentando uma assimetria da curva de distribuição em relação a curva de distribuição normal, nos três espaçamentos e nos dois ciclos a variável Brix apresentou distribuição normal, conforme indica o teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov a 5% de probabilidade.

Quanto aos parâmetros de avaliação da produtividade do canavial (TCH e TBH), nota-se nas tabelas 4, 5 e 6, os valores mínimos e máximos, sendo a maior amplitude entre esses valores nos atributos TCH e TBH observado no espaçamento LS nos dois ciclos de cultivo (primeira e segunda soca). Já a menor diferença entre os valores de mínimo e máximo foi verificada no espaçamento LT nos dois ciclos de cultivo. Quanto ao coeficiente de variação, o espaçamento LD para os atributos TCH e TBH nos dois ciclos de cultivo apresentou valores superiores a 35%, sendo classificados conforme Wilding e Dress (1983) em alta variabilidade. Nos espaçamentos LS e LT para esses mesmos atributos no ciclo de segunda soca também foram classificados com alta variabilidade, pois apresentaram valores superiores a 35%. Já no ciclo de primeira soca para os espaçamentos LS e LT, os atributos TCH e TBH foram classificados com variabilidade média, devido ao coeficiente de variação ser maior que 15 e menor que 35%. Com relação ao coeficiente de assimetria das variáveis TCH e TBH, nos espaçamentos LS e LD nos dois ciclos de cultivo, todos os valores foram positivos o que indica que a cauda da curva de distribuição de probabilidade acumulada é maior do lado direito que do lado esquerdo. No espaçamento LT também observado um predomínio de valores positivos do coeficiente assimetria, sendo apenas a variável TBH em ciclo de primeira soca com valor negativo. Avaliando os coeficientes de curtose, nota-se que no espaçamento LD para as variáveis TCH e TBH nos dois ciclos de cultivo os valores foram negativos, o que permite classificar a curva de distribuição de probabilidade acumulada em platicúrtica. Essa mesma classificação pode ser

aplicada para a variável TBH no espaçamento LT nos dois ciclos de cultivo e no espaçamento LS em ciclo de primeira soca e ainda para a variável TCH no espaçamento LT em ciclo de segunda soca. Por outro lado, no espaçamento LS para a variável TBH nos dois ciclos de cultivo e para a variável TCH no ciclo de segunda soca os valores dos coeficientes de curtose foram positivos, sendo classificada a curva de distribuição para essas variáveis em leptocúrtica. No espaçamento LT a variável TCH em ciclo de primeira soca também apresentou valor positivo do coeficiente de variação, sendo a curva de distribuição também classificada em leptocúrtica.

Na Tabela 7 são apresentadas as médias dos atributos físicos do solo nos ciclos de primeira e segunda soca em comparação com as médias em ciclo de cana planta (Panziera, 2014). Nota-se que a resistência à penetração (RP) no espaçamento entrelinhas triplo apresentou valor significativamente maior na comparação entre os espaçamentos nos três ciclos de cultivo. Comportamento semelhante foi observado com as médias da densidade do solo (Ds) em ciclo de primeira soca, o que vem a complementar os valores de RP. O comportamento da RP em ciclo de cana planta mostra que há um estado inicial de estruturação do solo diferente em cada um dos três espaçamentos, com maiores valores de RP nos espaçamentos entrelinhas triplo e duplo, respectivamente, em relação ao espaçamento simples. Esse padrão observado pode ser explicado pela forma como foi realizada a abertura e, posteriormente a cobertura do sulco em cada tipo de espaçamento entrelinhas para a implantação do canavial, pois houve uma adaptação do equipamento para sulcar e cobrir o sulco para os espaçamentos LD e principalmente no 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. Porém, a Ds não diferiu estatisticamente entre os espaçamentos em ciclo de cana planta.

Tabela 7 – Valores médios dos atributos densidade do solo (Ds), resistência a penetração (RP), porosidade total (Pt), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), conteúdo de água a base de volume na capacidade de campo ( $\theta_{CC}$ ), conteúdo de água a base de volume no ponto de murcha permanente ( $\theta_{PMP}$ ) e capacidade de água disponível (CAD) de um Latossolo em ciclo de cana planta, primeira soca e segunda soca nos três espaçamentos entrelinhas.

Variável	Ciclo	Tipos de espaçamentos					
		LS		LD		LT	
<b>Ds</b> (Mg m <sup>-3</sup> )	Cana planta <sup>1</sup>	1,216	A c	1,207	A b	1,242	A c
	1º soca	1,405	B a	1,330	C a	1,468	A a
	2º soca	1,289	B b	1,316	AB a	1,341	A b
<b>RP</b> (MPa)	Cana planta	0,88	B b	1,04	AB b	1,35	A c
	1º soca	2,140	B a	2,261	B a	4,332	A a
	2º soca	2,200	B a	2,140	B a	3,377	A b
<b>Pt</b> (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	Cana planta	0,602	A a	0,610	A a	0,614	A a
	1º soca	0,533	B c	0,564	A c	0,554	A c
	2º soca	0,587	A b	0,591	A b	0,572	B b
<b>Ma</b> (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	Cana planta	0,197	A a	0,197	A a	0,171	B a
	1º soca	0,088	B c	0,124	A b	0,077	B c
	2º soca	0,143	A b	0,142	A b	0,111	B b
<b>Mi</b> (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	Cana planta	0,405	B b	0,413	B b	0,443	A b
	1º soca	0,445	B a	0,440	B a	0,477	A a
	2º soca	0,444	B a	0,449	B a	0,461	A b
<b><math>\theta_{CC}</math></b> (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	Cana planta	0,374	C c	0,391	B b	0,420	A c
	1º soca	0,429	B a	0,415	C a	0,465	A a
	2º soca	0,394	B b	0,427	A a	0,438	A b
<b><math>\theta_{PMP}</math></b> (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	Cana planta	0,284	C b	0,310	B b	0,339	A b
	1º soca	0,369	B a	0,345	C a	0,405	A a
	2º soca	-		-		-	
<b>CAD</b> (mm)	Cana planta	9,015	A a	8,095	B a	8,045	B a
	1º soca	6,05	B b	6,975	A a	5,983	B b
	2º soca	-		-		-	

<sup>1</sup> Panziera (2014).

<sup>2</sup> Médias seguidas pelas mesmas letras maiúsculas na horizontal e pelas mesmas letras minúsculas na vertical não diferem estatisticamente entre si ao nível de 95 % de confiança pelo teste de comparação de média Tukey.

Destaca-se ainda na Tabela 7, o incremento significativo da Ds e da RP no ciclo de primeira soca em comparação com o ciclo cana planta no espaçamento LS e LT, indicando o processo de compactação do solo após a primeira colheita, sendo menos acentuado no espaçamento LD. Em todos os tratamentos avaliados em ciclo de cana de primeira e segunda soca, os valores de RP foram superiores a 2 MPa que é considerado crítico para as plantas conforme Taylor et al. (1966).

Esse incremento de RP e de Ds no ciclo de cana de primeira soca está associado ao tráfego de máquinas no momento da colheita, visto que esta foi realizada de forma mecanizada, com trânsito sobre o solo da colhedora e do transbordo com a cana colhida. O aumento da Ds e da RP em função do tráfego de

máquinas também foi observado por Streck et al. (2004) e Collares et al. (2008) em áreas sob plantio direto, sendo o primeiro autor em um Argissolo Vermelho Amarelo e o segundo em um Latossolo Vermelho. No entanto, cabe ressaltar que o menor incremento foi no espaçamento LD, com valores de RP e Ds significativamente menor em comparação com LS, devido provavelmente a compatibilidade do espaçamento entrelinhas com a bitola do maquinário envolvido na colheita, proporcionando um controle de tráfego e por consequência uma compactação do solo menos expressiva. Percebe-se ainda, que os valores de RP e de Ds mantiveram-se elevados no ciclo de cana de segunda soca em comparação com a primeira soca, com uma redução significativa nos valores de RP e Ds no espaçamento LT e no espaçamento LS para a Ds. Essa redução pode estar associada a operação de escarificação realizada durante o ciclo de cana de segunda soca, adotada como prática cultural padrão no manejo do canavial na Coopercana.

Em ciclo de cana planta para todos os tratamentos e em ciclo de primeira soca para o espaçamento LD foram obtidos valores de  $M_a$  superior a  $0,10 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$  (Tabela 7) considerado adequado um valor mínimo de porosidade de aeração ao desenvolvimento do sistema radicular (BAVER et al., 1972; REICHERT et al., 2009). Em ciclo de primeira soca, os espaçamentos simples, duplo e triplo apresentaram uma redução significativa nos valores desta variável. Esse comportamento observado no presente estudo foi devido ao tráfego de máquinas no momento da colheita, visto que parte dos macroporos foram destruídos e transformados em microporos com a aplicação de cargas sobre o solo. Porém, o espaçamento duplo apresentou valor significativamente maior que os demais para esse ciclo, com a média acima do valor considerado mínimo, o que infere em um bom comportamento dessa configuração para contornar a compactação do solo devido ao efeito do tráfego controlado que ela proporciona. Quanto ao ciclo de segunda soca, os valores de  $M_a$  tenderam a um aumento nos três espaçamentos, devido provavelmente a operação de escarificação realizada durante este ciclo, porém ainda inferiores aos patamares do ciclo de cana planta.

Observa-se na Tabela 7, que houve um incremento significativo nas médias da microporosidade ( $M_i$ ) nos três espaçamentos entrelinhas após o primeiro corte. Esse incremento é ocasionado pela transformação de macroporos em microporos devido ao tráfego de máquinas no momento da colheita. Já em ciclo de segunda soca, os valores de microporosidade foram semelhantes ao ciclo de primeira soca

nos três espaçamentos, com o valor significativamente inferior no espaçamento LT em comparação com o ciclo de primeira soca.

Quanto as médias da porosidade total (Pt) em ciclo de cana planta (Tabela 7), não houve diferença significativa entre os espaçamentos. Com relação ao ciclo de primeira e segunda soca, houve uma redução significativa da Pt nos três espaçamentos em relação ao ciclo de cana planta, com menor decréscimo no espaçamento LD, que foi significativamente maior que o espaçamento LS em ciclo de primeira soca e que o espaçamento LT em ciclo de segunda soca, o que indica um efeito negativo da colheita sobre os atributos físicos, porém menos pronunciado no espaçamento LD.

Em relação aos valores de capacidade de água disponível (CAD) em ciclo de cana planta (Tabela 7), o espaçamento simples apresentou valor significativamente maior. Em ciclo de primeira soca, houve uma redução significativa do valor de CAD nos espaçamentos entrelinhas LS e LT, o que não foi observado no LD. Este espaçamento apresentou média significativamente maior, devido a menor redução após o primeiro evento de colheita. Segundo Tormena et al. (1998), a CAD reflete as alterações na estrutura do solo em virtude das alterações do espaço poroso, que atua na retenção de água em tensões menores e, portanto, mais facilmente disponível às plantas. Os valores de  $\theta_{CC}$  e  $\theta_{PMP}$  apresentaram um incremento significativo no ciclo de primeira soca em comparação ao ciclo de cana planta. Esse incremento está associado ao aumento da microporosidade, que devido ao tráfego de máquina ocorreu a transformação de macroporos em microporos. Esses últimos são responsáveis pela retenção de água no solo por apresentarem menor diâmetro, o que permite a formação do fenômeno de capilaridade. Com esse incremento da microporosidade houve o aumento da retenção de água no solo, o que não quer dizer aumento da disponibilidade de água. Comparando os incrementos dos valores de  $\theta_{CC}$  e  $\theta_{PMP}$  na comparação do ciclo de cana planta com 1° soca, percebe-se que há um maior acréscimo na variável  $\theta_{PMP}$  em comparação com o  $\theta_{CC}$ , indicando que mesmo com o aumento da retenção a água está retida a maiores tensões o que não confere maior disponibilidade e por consequência resulta em menor valor de CAD, como pode ser observado na tabela 7.

Desta forma, a redução da CAD em ciclo de primeira soca é explicada pelo tráfego de máquinas no momento da colheita. O maior valor de CAD no espaçamento duplo em ciclo de primeira soca também é explicado pela mesma

causa que originou menores valores de RP e Ds nesse mesmo espaçamento e ciclo de cultivo.

Com relação aos componentes de produção da cana-de-açúcar (Tabela 8), percebe-se uma redução significativa dos valores de massa do colmo e altura do colmo nos três espaçamentos no ciclo de segunda soca em relação ao ciclo de primeira soca, ocasionando menores valores de TCH e TBH nos três espaçamentos neste ciclo. Percebe-se que o espaçamento LT apresentou no ciclo de primeira soca TCH significativamente menor em relação aos outros espaçamentos (Tabela 8). As médias desse atributo não diferiram significativamente nos espaçamentos LS e LD nos três ciclos. A menor produtividade no espaçamento LT em comparação com os outros dois tipos de espaçamento (duplo e simples) é provavelmente associado a maior competição por luz solar, água e nutrientes. Já o decréscimo acentuado da produtividade nesse espaçamento no ciclo de segunda soca, pode estar associado as condições ambientais durante o ciclo. 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 0,3 m) 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.



Tabela 8 – Massa do colmo (MC), altura do colmo (HC), diâmetro do colmo (DC), número de colmos por metro quadrado (NCM2), sólidos solúveis totais do caldo (Brix), massa de colmos por hectare (TCH) e massa de sólidos solúveis do caldo por hectare (TBH) nos ciclos de cana planta, primeira e segunda soca nos três espaçamentos entrelinhas.

Variável	Ciclo	Tipos de espaçamentos								
		LS			LD			LT		
<b>MC (Kg)</b>	Cana planta <sup>1</sup>	1,04	A	a	0,99	A	a	0,83	B	a
	1º soca	0,77	A	b	0,75	A	b	0,57	B	b
	2º soca	0,35	B	c	0,41	A	c	0,32	B	c
<b>HC (m)</b>	Cana planta	1,99	A	a	1,72	B	b	1,65	B	a
	1º soca	1,98	A	a	1,87	B	a	1,60	C	a
	2º soca	1,08	A	b	1,11	A	c	0,95	B	b
<b>DC (mm)</b>	Cana planta	26,00	A	a	24,73	B	a	23,26	C	a
	1º soca	21,39			-			-		
	2º soca	19,96	B	b	19,88	C	b	20,49	A	b
<b>NCM2 un<sup>m</sup>-<sup>2</sup></b>	Cana planta	6,49	B	B	7,06	AB	ab	7,90	A	a
	1º soca	8,71	A	a	8,16	A	a	9,10	A	a
	2º soca	7,63	A	ab	6,27	B	b	5,76	B	b
<b>Brix (%)</b>	Cana planta	20,77	A	b	20,53	A	a	20,44	A	b
	1º soca	20,11	B	c	19,16	C	b	21,56	A	a
	2º soca	21,15	A	a	20,87	A	a	20,78	A	b
<b>TCH (Mgha<sup>-1</sup>)</b>	Cana planta	67,50	A	a	69,90	A	a	65,60	A	a
	1º soca	66,79	A	a	60,94	A	a	51,05	B	b
	2º soca	25,82	A	b	25,26	A	b	17,92	A	c
<b>TBH (Mgha<sup>-1</sup>)</b>	Cana planta	14,02	A	a	14,35	A	a	13,41	A	a
	1º soca	13,42	A	a	11,64	B	b	11,01	B	b
	2º soca	5,42	A	b	5,28	A	c	3,72	A	c

<sup>1</sup> Panziera (2014).

<sup>2</sup> Médias seguidas pelas mesmas letras maiúsculas na horizontal e pelas mesmas letras minúsculas na vertical não diferem estatisticamente entre si ao nível de 95 % de confiança pelo teste de comparação de média Tukey.

Quanto ao NCM2, nota-se uma tendência de incremento de colmos no ciclo de primeira soca em relação a cana planta, porém significativamente maior somente no LS, o que é um comportamento desta variedade utilizada no experimento, a qual apresenta maior perfilhamento em ciclo de primeira soca em estudos conduzidos em espaçamento simples. Percebe-se ainda que há uma tendência de redução do número de colmos no ciclo de segunda soca na comparação com os outros dois ciclos anteriores, sendo significativamente menor no ciclo de segunda soca em comparação com primeira soca nos três espaçamentos. Por este ciclo ter apresentado alguma adversidade ambiental para a cultura (restrição hídrica), provavelmente houve a resposta fisiológica para aborto de alguns perfilhos, principalmente no espaçamento que apresentou maior população em ciclo de primeira soca (LT). O número final de perfilhos são resultantes da competição por

luz, água e nutrientes durante o seu desenvolvimento (CASTRO; CHRISTOFOLETTI, 2005).

O teor de sólidos solúveis do caldo (°Brix) não diferiram significativamente nos espaçamentos LS, LD e LT nos ciclos de cana planta e segunda soca (Tab. 8). Este atributo é 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 e nos três ciclos são elevados. 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.

### **6.1.2 Autocorrelação**

A análise de autocorrelação avalia a similaridade de uma mesma variável distribuída espacialmente, verificando se há dependência ou independência espacial entre as observações.

Nas Figuras 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28 e 29 são apresentados os gráficos autocorrelogramas que indicam se há ou não independência espacial e a faixa de dependência espacial entre as observações adjacentes ao longo das transeções construídas nos três espaçamentos de cultivo de cana-de-açúcar para as variáveis de solo e de planta avaliados em ciclo de primeira e segunda soca.

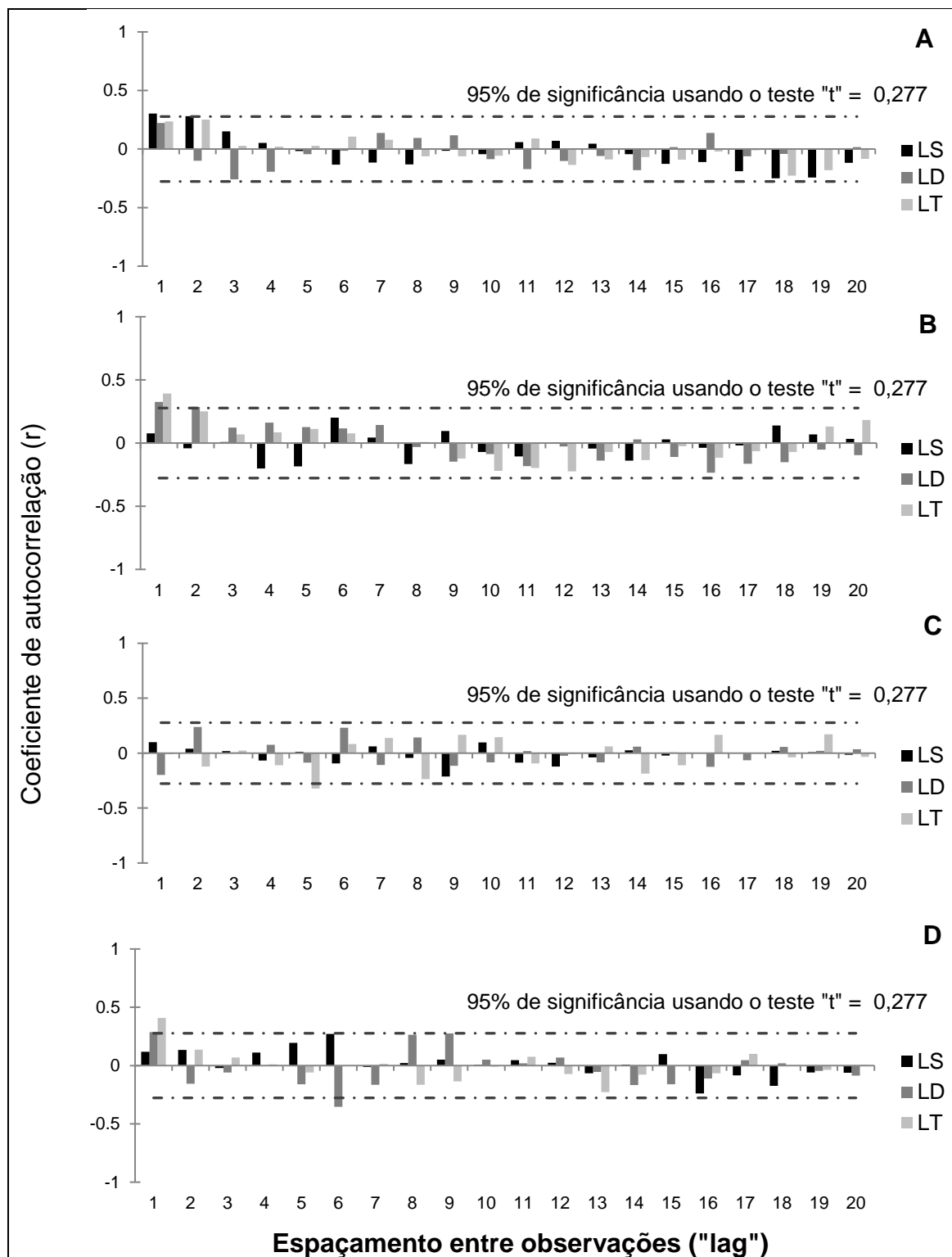


Figura 22 – Autocorrelogramas amostrais da massa do colmo (A), sólidos solúveis totais (B), número de colmos por metro quadrado (C) e altura do colmo (D) obtido nos três espaçamentos (Linha simples – LS; Linha Dupla – LD; Linha tripla - LT) em ciclo de primeira soca.

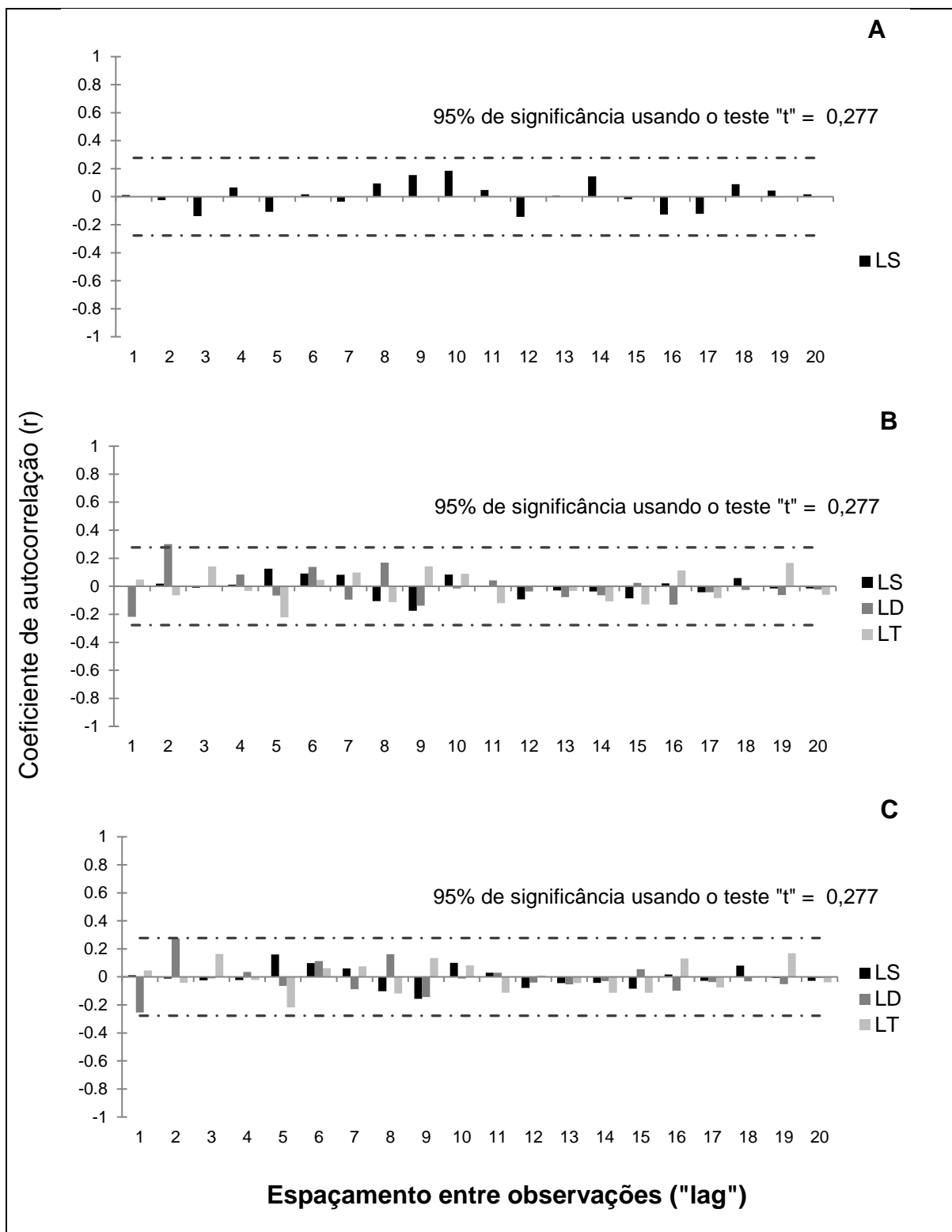


Figura 23 – Autocorrelogramas amostrais do diâmetro do colmo (A), tonelada de colmos por hectare (B) e tonelada de brix por hectare (C) obtido nos três espaçamentos (Linha simples – LS; Linha Dupla – LD; Linha tripla - LT) em ciclo de primeira soca.

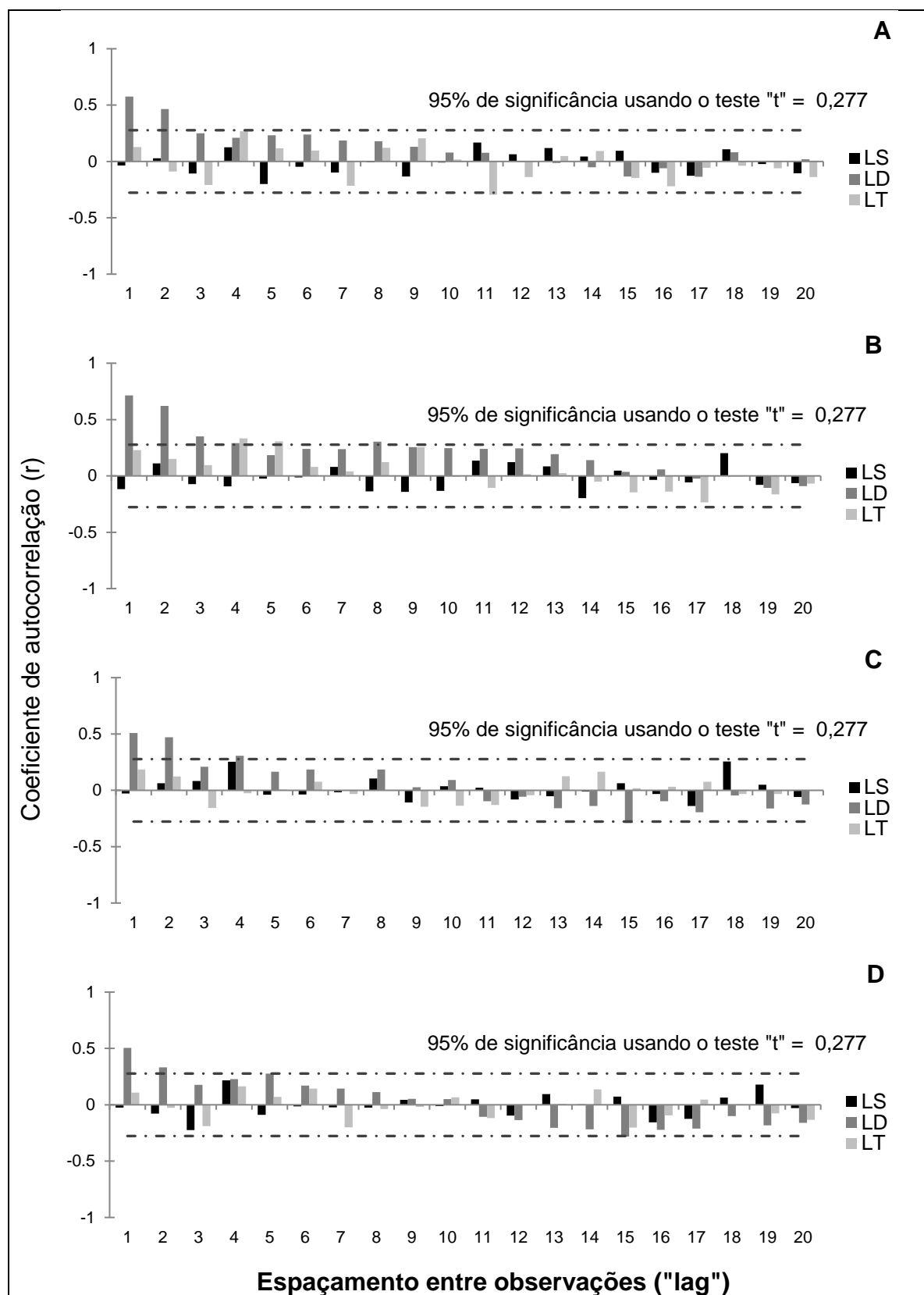


Figura 24 – Autocorrelogramas amostrais da densidade do solo (A), da resistência a penetração (B), da macroporosidade (C) e da microporosidade (D) obtido nos três espaçamentos (Linha simples – LS; Linha Dupla – LD; Linha tripla - LT) em ciclo de primeira soca.

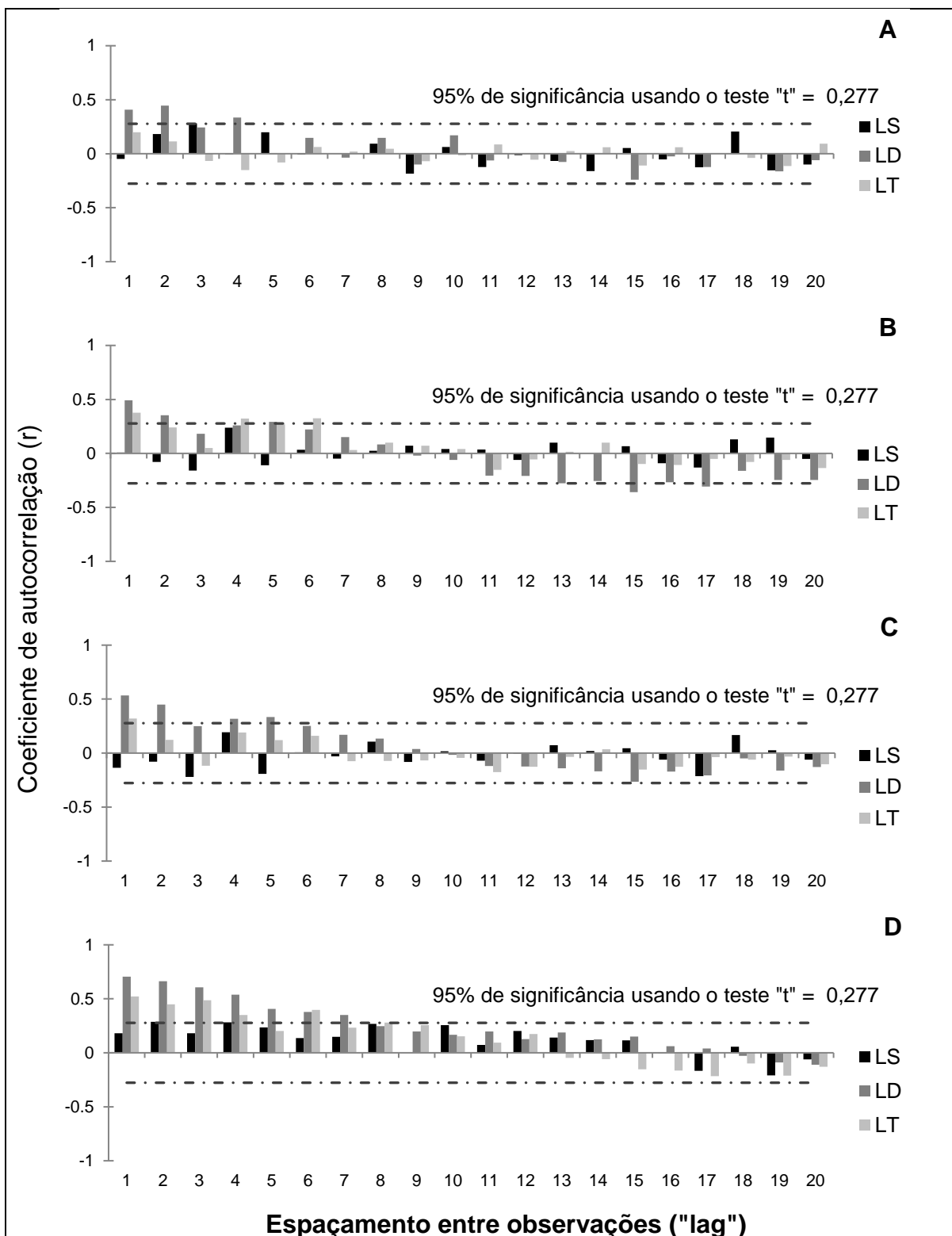


Figura 25 – Autocorrelogramas amostrais da porosidade total (A), do conteúdo de água a base de volume na capacidade de campo (B) do conteúdo de água a base de volume no ponto de murcha permanente (C) e da água disponível (E) obtido nos três espaçamentos (Linha simples – LS; Linha Dupla – LD; Linha tripla - LT) em ciclo de primeira soca.

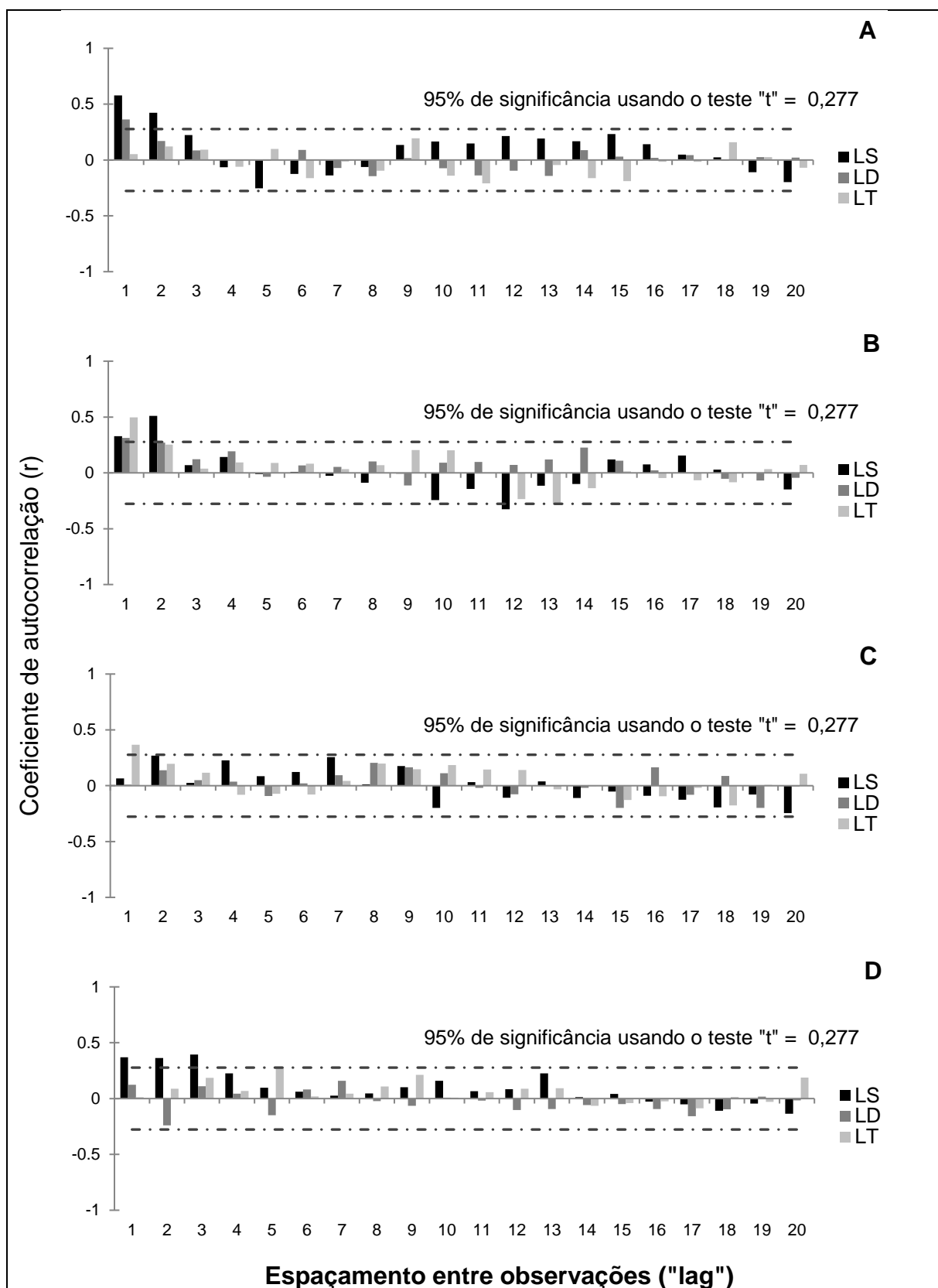


Figura 26 – Autocorrelogramas amostrais da massa do colmo (A), de sólidos solúveis totais (B), do número de colmos por metro quadrado (C) e da altura do colmo (D) obtido nos três espaçamentos (Linha simples – LS; Linha Dupla – LD; Linha tripla - LT) em ciclo de segunda soca.

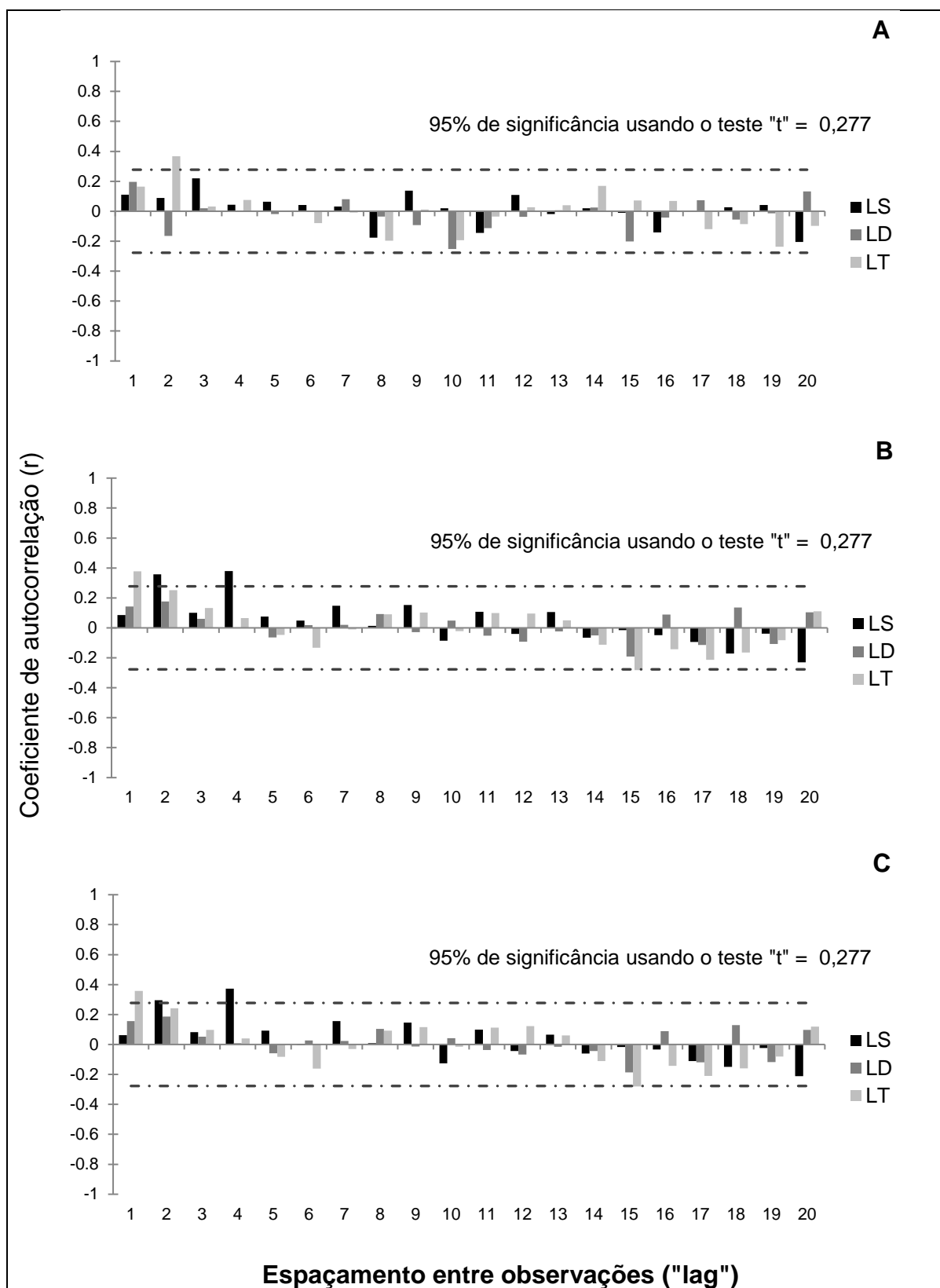


Figura 27 – Autocorrelogramas amostrais da massa do diâmetro do colmo (A), tonelada de colmo por hectare (B) e tonelada de brix por hectare (C) obtido nos três espaçamentos (Linha simples – LS; Linha Dupla – LD; Linha tripla - LT) em ciclo de segunda soca.



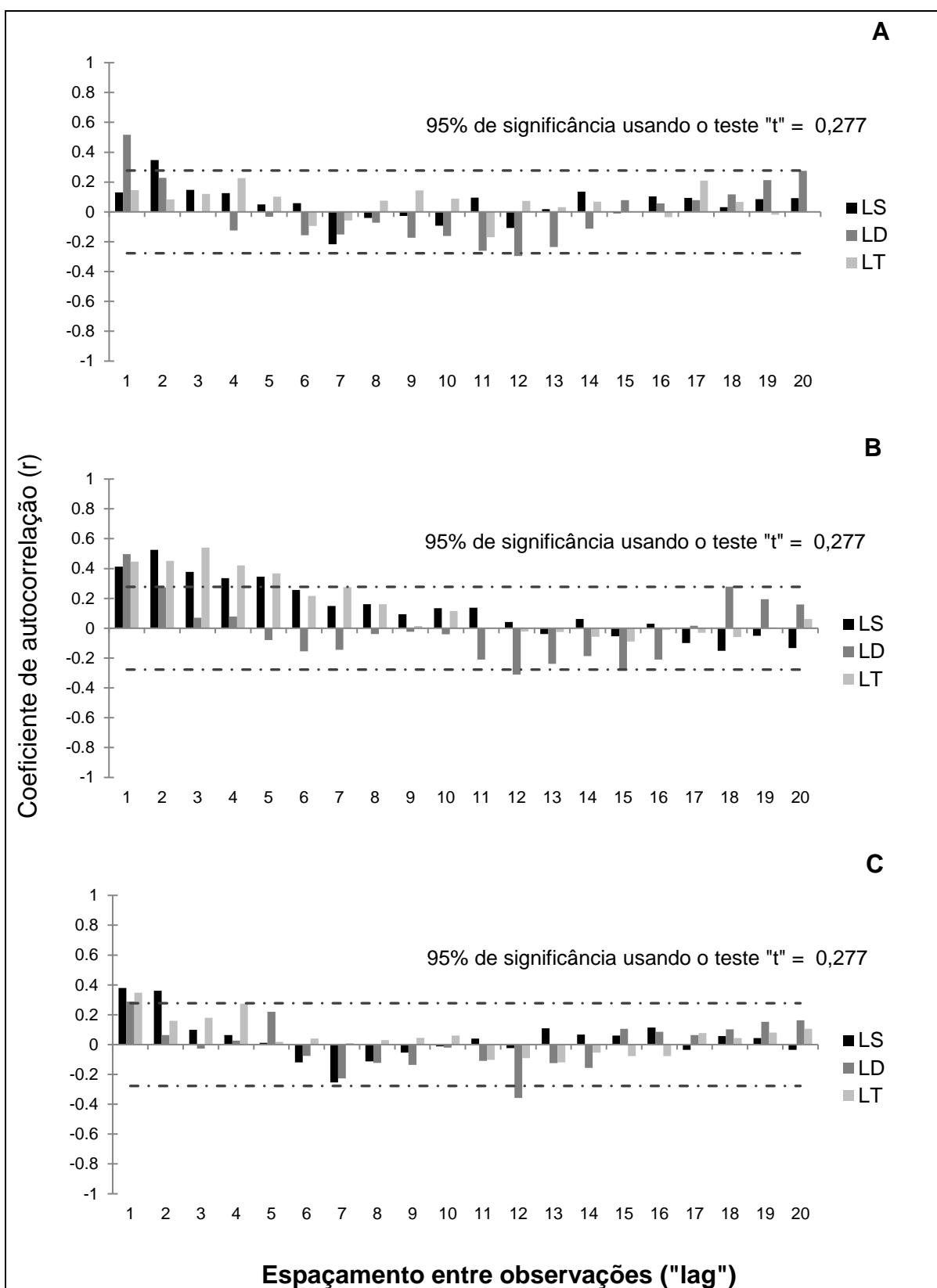


Figura 28 – Autocorrelogramas amostrais da densidade do solo (A), da resistência a penetração (B) e da macroporosidade (C) obtido nos três espaçamentos (Linha simples – LS; Linha Dupla – LD; Linha tripla - LT) em ciclo de segunda soca.

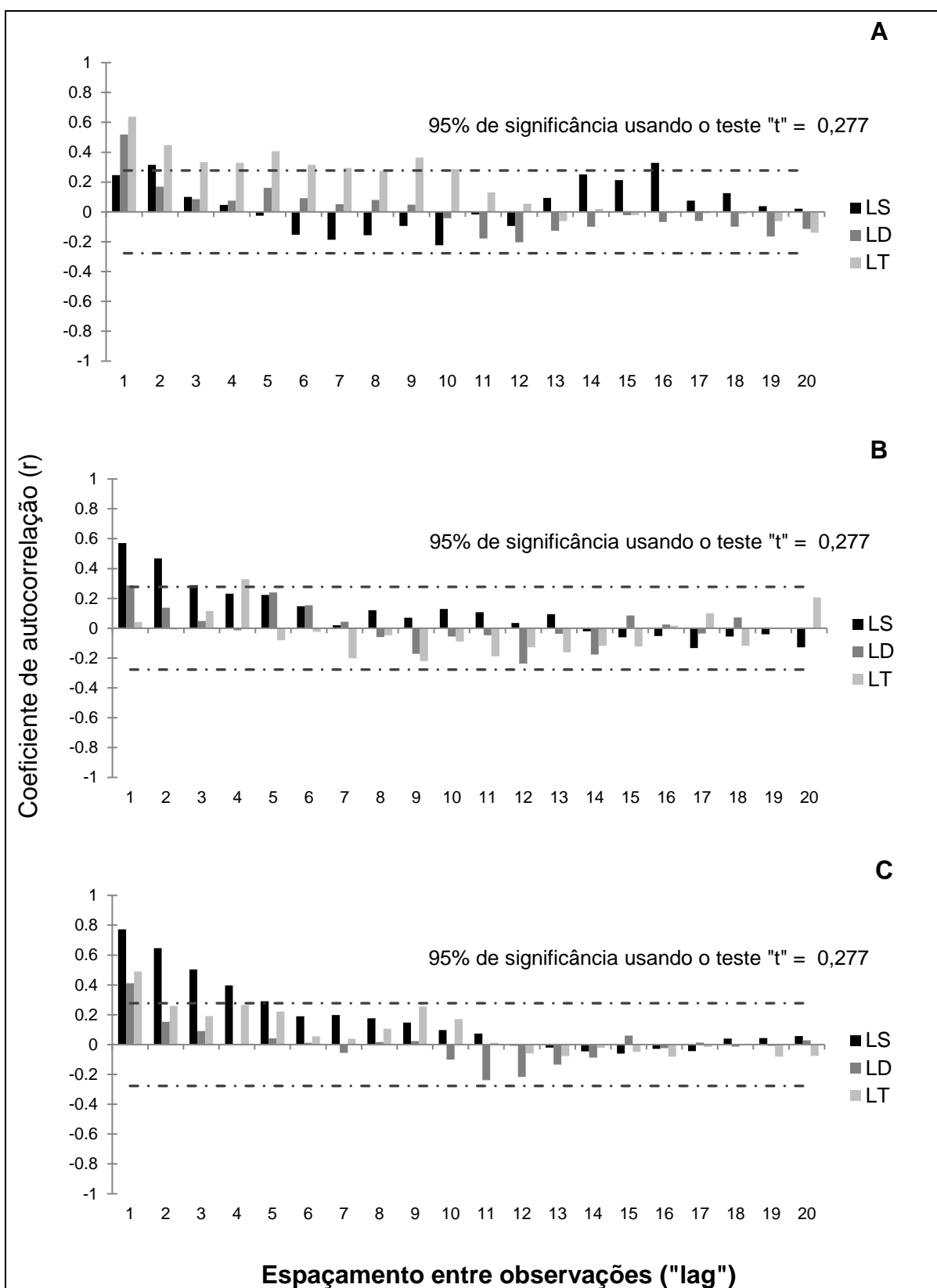


Figura 29 – Autocorrelogramas amostrais da microporosidade (A), da porosidade total (B) e do conteúdo de água a base de volume na capacidade de campo (C) obtido nos três espaçamentos (Linha simples – LS; Linha Dupla – LD; Linha tripla - LT) em ciclo de segunda soca.

Apresenta-se uma heterogeneidade do resultado da análise de dependência espacial entres os três espaçamentos e entre os ciclos de cultivo. Em ciclo de primeira soca a MC foi dependente espacialmente apenas no espaçamento LS, com alcance de 1 lag (Fig. 22). Já o Brix, neste mesmo ciclo apresentou dependência espacial de ao menos 1 lag nos espaçamentos LS e LT, sendo o mesmo comportamento da variável HC (Fig. 22). Já o atributo NCM2 no ciclo de primeira soca foi independente espacialmente nos três tipos de espaçamentos (Fig. 22). Quanto ao resultado da análise dos demais atributos (DC, TCH e TBH) nos dois ciclos avaliados (Fig. 23 e 27), também se observou uma heterogeneidade dos resultados. Apenas os atributos TCH e TBH no espaçamento LT em ciclo de segunda soca apresentaram dependência espacial ao nível de 95% de significância. Para estas variáveis nos outros espaçamentos e ciclo e para o DC nos dois ciclos de cultivo as observações foram independentes espacialmente (Fig. 23 e 27). Timm et al. (2003) avaliando a produção de cana por abordagem de espaço de estados com espaçamento entrelinhas convencional (1,4 m), obtiveram uma dependência espacial para a variável número de colmos por metro de 10 m em um Nitossolo vermelho sob diferentes manejos de palhada.

Quanto aos atributos de solo, verifica-se nas Fig. 24 e 28 que a variável Ds apresentou dependência espacial somente no LD nos dois ciclos de cultivo. As variáveis RP, Ma, Mi e Pt em ciclo de primeira soca também só apresentaram dependência espacial no espaçamento LD, sendo nos demais espaçamentos neste ciclo de cultivo independentes espacialmente (Fig. 24 e 25). Já em ciclo de segunda soca, as variáveis RP e Ma apresentaram dependência espacial de ao menos 1 lag nos três espaçamentos (Fig. 28). Já a Mi, também em ciclo de segunda soca, apresentou dependência espacial nos espaçamentos LD e LT. A Pt para esse mesmo ciclo apresentou dependência espacial nos espaçamentos LS e LD. Souza et al. (2004) avaliando a variabilidade espacial da porosidade total, da macro e da 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 lag considerado no estudo de 10 m e a ferramenta utilizada para avaliação da estrutura de dependência espacial foi o semivariograma. Quanto aos atributos de solo relacionados com retenção e disponibilidade de água, percebe-se na Fig. 25 que as variáveis  $\theta_{CC}$ ,  $\theta_{PMP}$  e AD apresentaram dependência

espacial de ao menos 1 lag nos espaçamentos LD e LT no ciclo de primeira soca. Já em segundo ciclo de soqueira a variável  $\theta_{cc}$  apresentou dependência espacial nos três tipos de espaçamentos, destacando para um alcance de 5 lag's (5 metros) no espaçamento LS (Fig. 29).

Desta forma, nota-se que na comparação dos espaçamentos houve diferenças na estrutura de dependência espacial das variáveis analisadas. Porém, nem toda alteração do padrão de variabilidade espacial pode estar associada ao fator espaçamento, podendo estar relacionada também com as características intrínsecas do solo em cada área onde os espaçamentos foram instalados. O ciclo de cultivo pode ter influenciado nos padrões de dependência espacial das variáveis, com uma tendência de tonar as variáveis de solo dependentes espacialmente e com maior faixa de dependência espacial no espaçamento LS e reduzir a faixa de dependência espacial no espaçamento LD no ciclo de segunda soca em comparação com o primeiro corte.

### **6.1.3 Análise de correlação cruzada**

A análise de correlação cruzada 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 correlação cruzada foram obtidos pelo cálculo da equação 5. Os valores dos coeficientes de correlação cruzada 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, °BRIX, HC e NCM<sup>2</sup> como variáveis preditas para os modelos autorregressivos de espaço de estados. Como critério para uso da MC, °BRIX, HC e NCM<sup>2</sup> como variáveis preditas, adotou-se a presença de dependência espacial e a importância como componentes de produtividade da cana-de-açúcar.

Para a análise de correlação cruzada, a MC foi utilizada como variável predita no espaçamento LS em ciclo de primeira soca e nos espaçamentos LS e LD em ciclo de segunda soca. O Brix foi usado nos espaçamentos LD e LT nos dois ciclos de cultivo e no espaçamento LS em ciclo de segunda soca. A HC foi considerada variável resposta nos espaçamentos LD e LT em ciclo de primeira soca. Já o NCM<sup>2</sup>

foi considerado como variável predita apenas no espaçamento LT em ciclo de segunda soca. Foram consideradas variáveis predictoras para análise de correlação cruzada todas as variáveis que apresentaram dependência espacial em cada tipo de espaçamento entrelinhas e em cada ciclo de cultivo. As Fig. 30 a 52 apresentam os gráficos da análise de correlação cruzada para os três espaçamentos nos dois ciclos de cultivo (primeira e segunda soca).

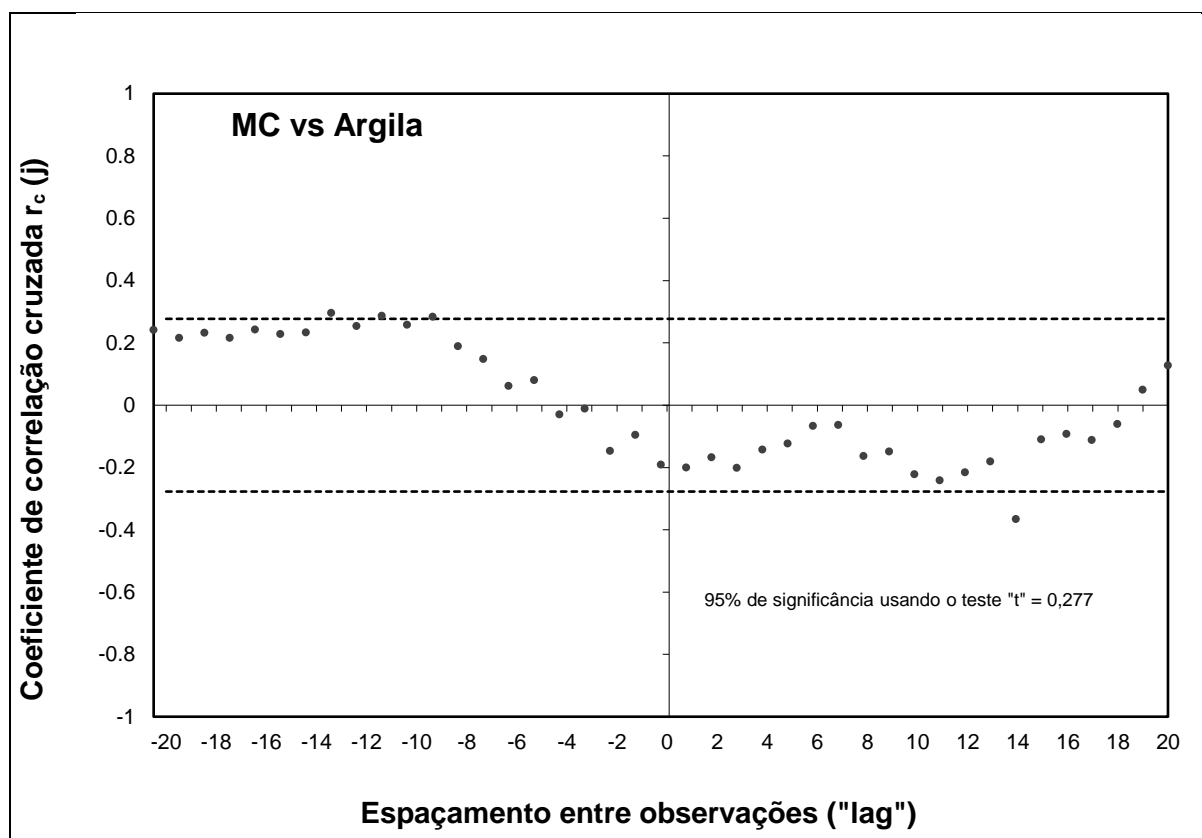


Figura 30 – Crosscorrelograma amostral entre massa do colmo e teor de argila no espaçamento simples em ciclo de cana de primeira soca.

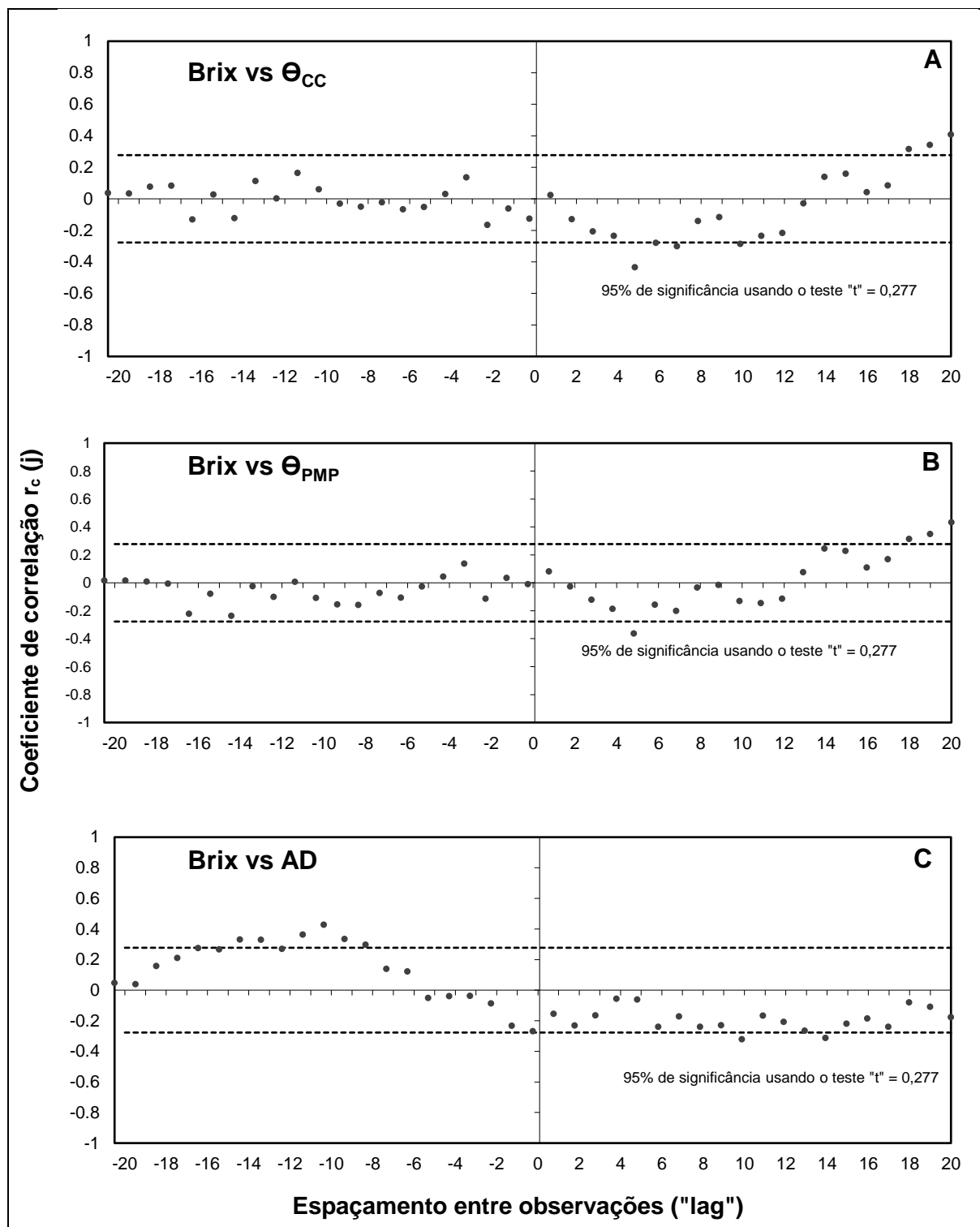


Figura 31 – Crosscorrelograma amostral entre sólidos solúveis totais (brix) e: A) conteúdo de água a base de volume na capacidade de campo ( $\theta_{CC}$ ); B) conteúdo de água a base de volume no ponto de murcha permanente ( $\theta_{PMP}$ ); e C) Água disponível (AD) no espaçamento duplo em ciclo de cana de primeira soca.

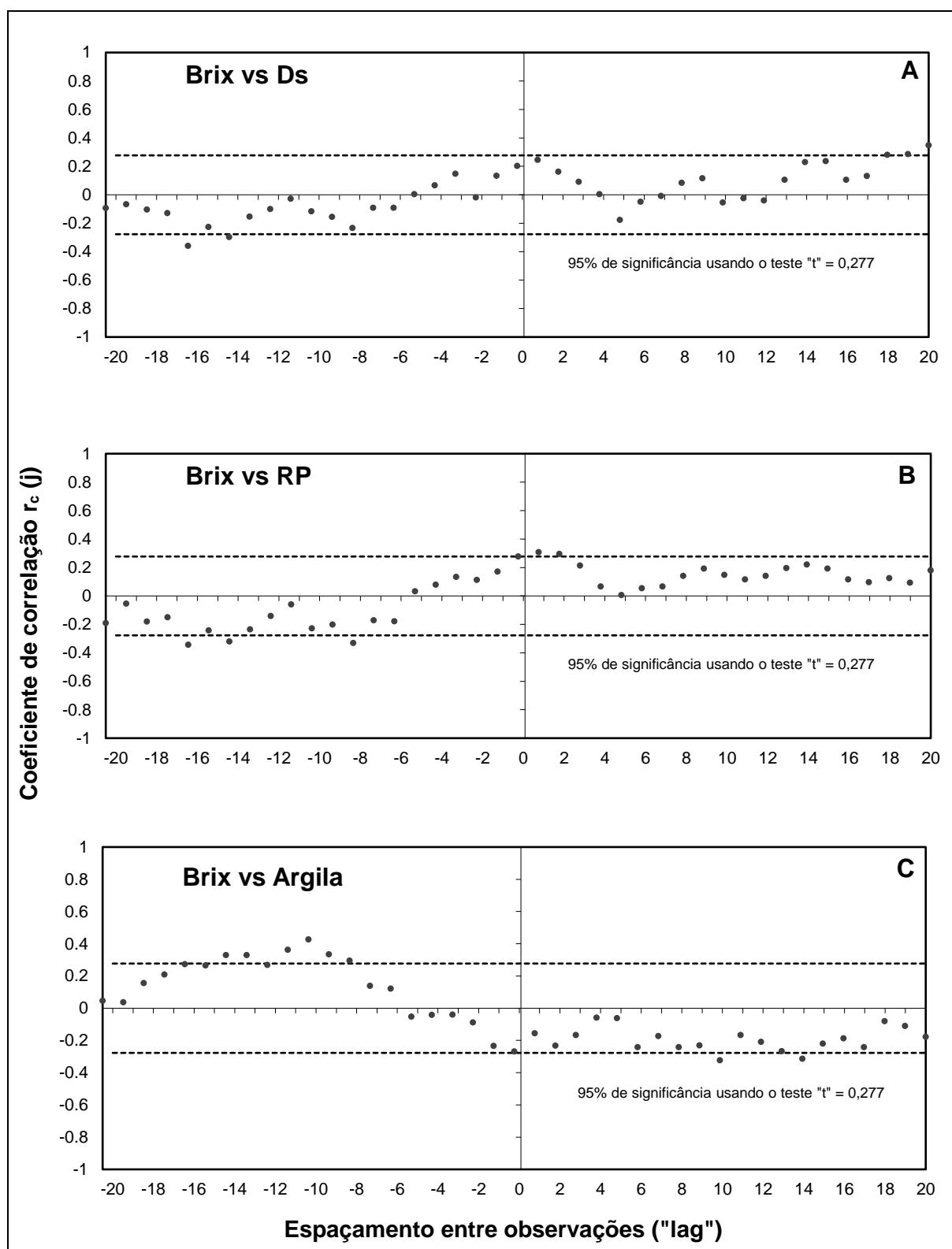


Figura 32 – Crosscorrelograma amostral entre sólidos solúveis totais (brix) e: A) Densidade do solo (Ds); B) resistência a penetração (RP); e C) teor de argila no espaçamento duplo em ciclo de cana de primeira soca.

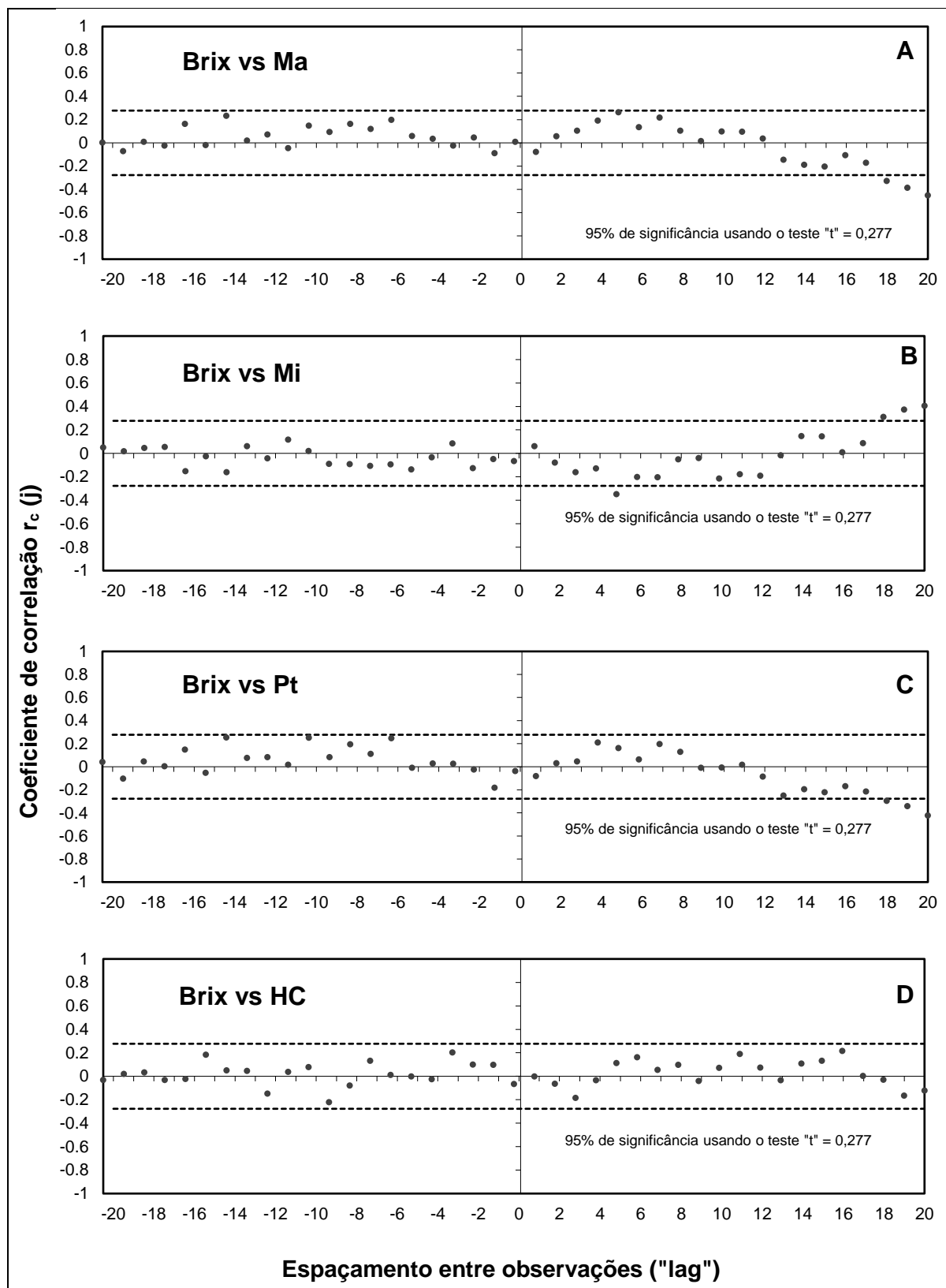


Figura 33 – Crosscorrelograma amostral entre sólidos solúveis totais (brix) e: A) macroporosidade (Ma); B) microporosidade (Mi); C) porosidade total (Pt); e D) altura do colmo (HC) no espaçamento duplo em ciclo de cana de primeira soca.



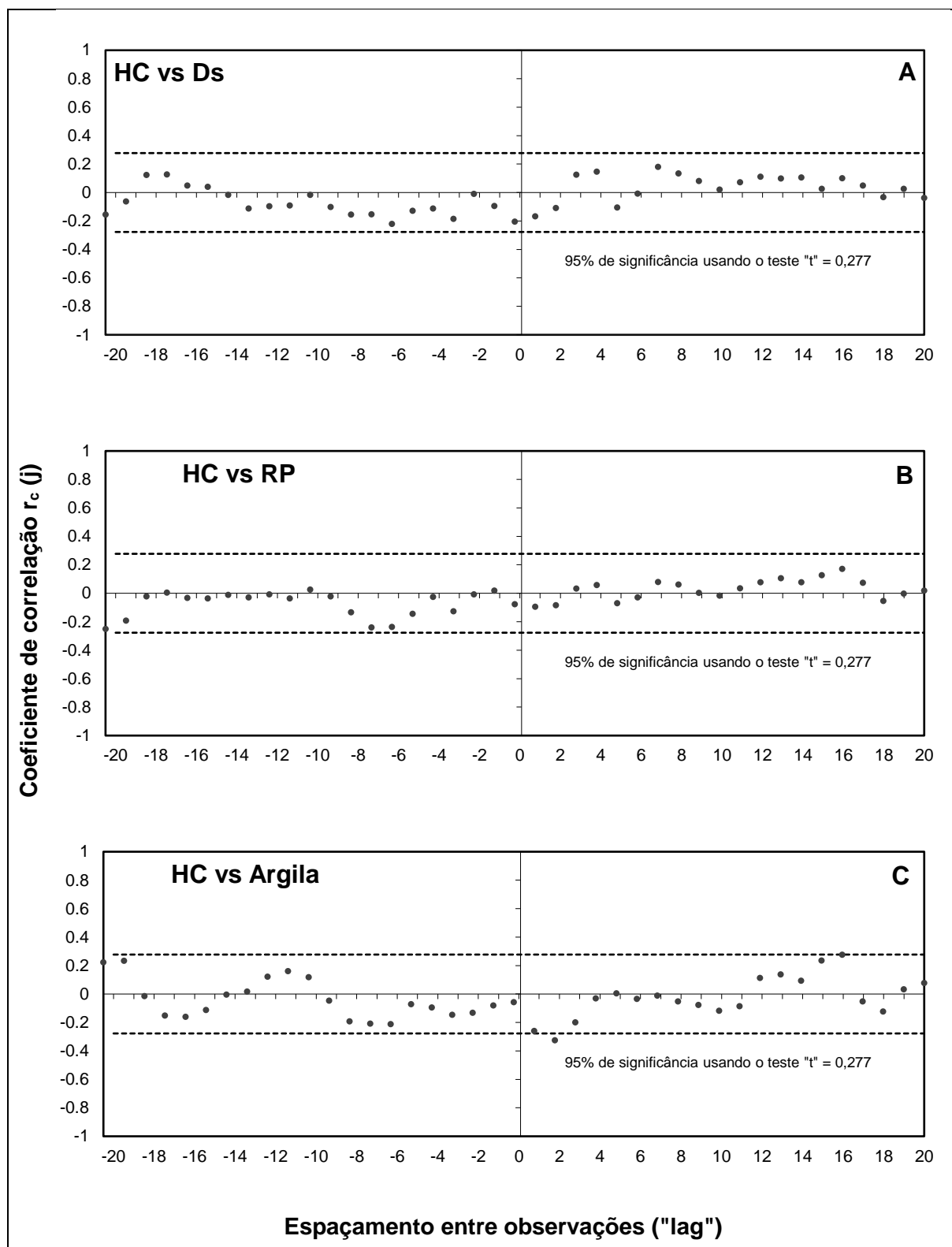


Figura 34 – Crosscorrelograma amostral entre altura do colmo (HC) e: A) densidade do solo (Ds); B) resistência a penetração (RP); e C) teor de argila (Argila) no espaçamento duplo em ciclo de cana de primeira soca.

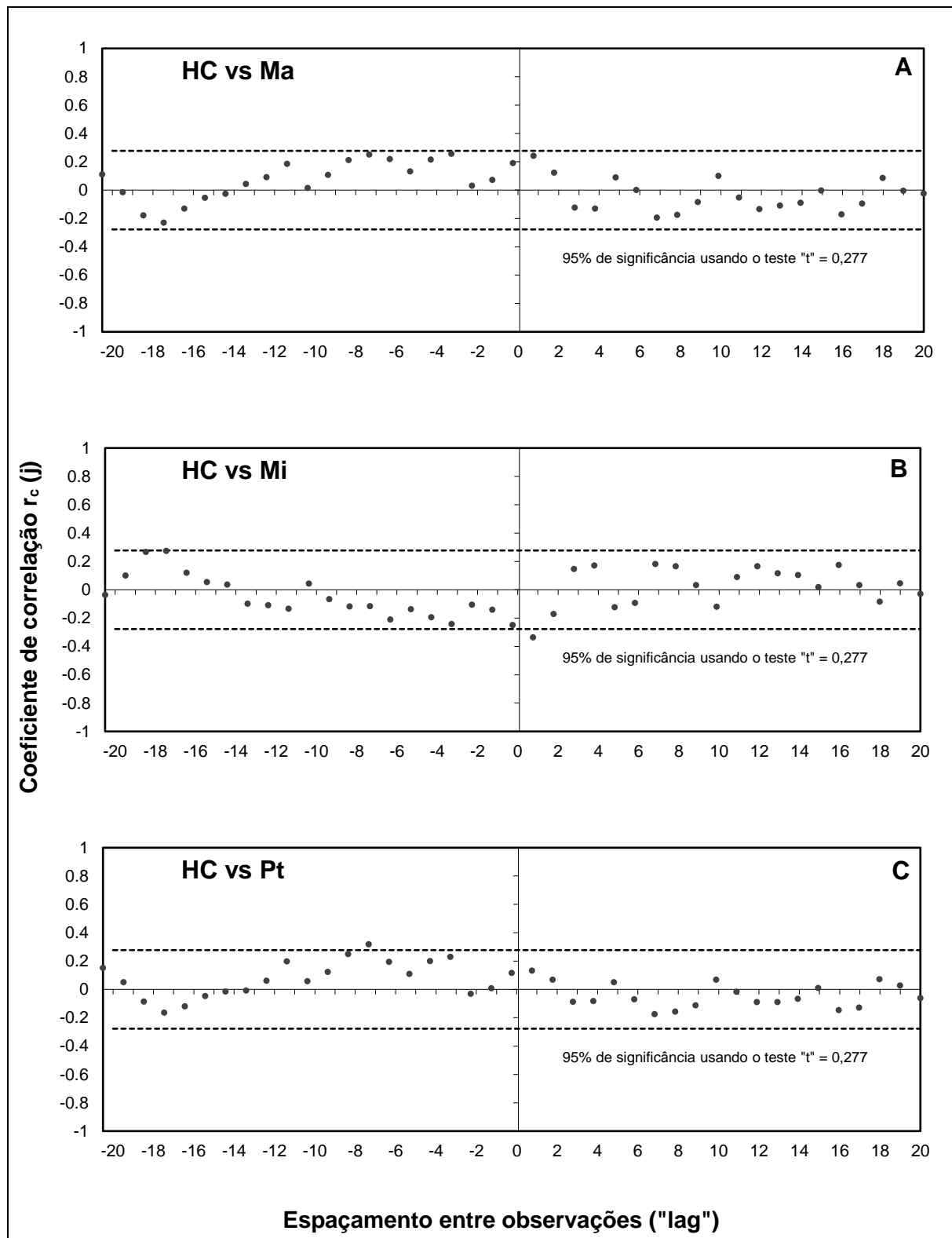


Figura 35 – Crosscorrelograma amostral entre altura do colmo (HC) e: A) Macroporosidade (Ma); B) microporosidade (Mi); e C) porosidade total (Pt) no espaçamento duplo em ciclo de cana de primeira soca.

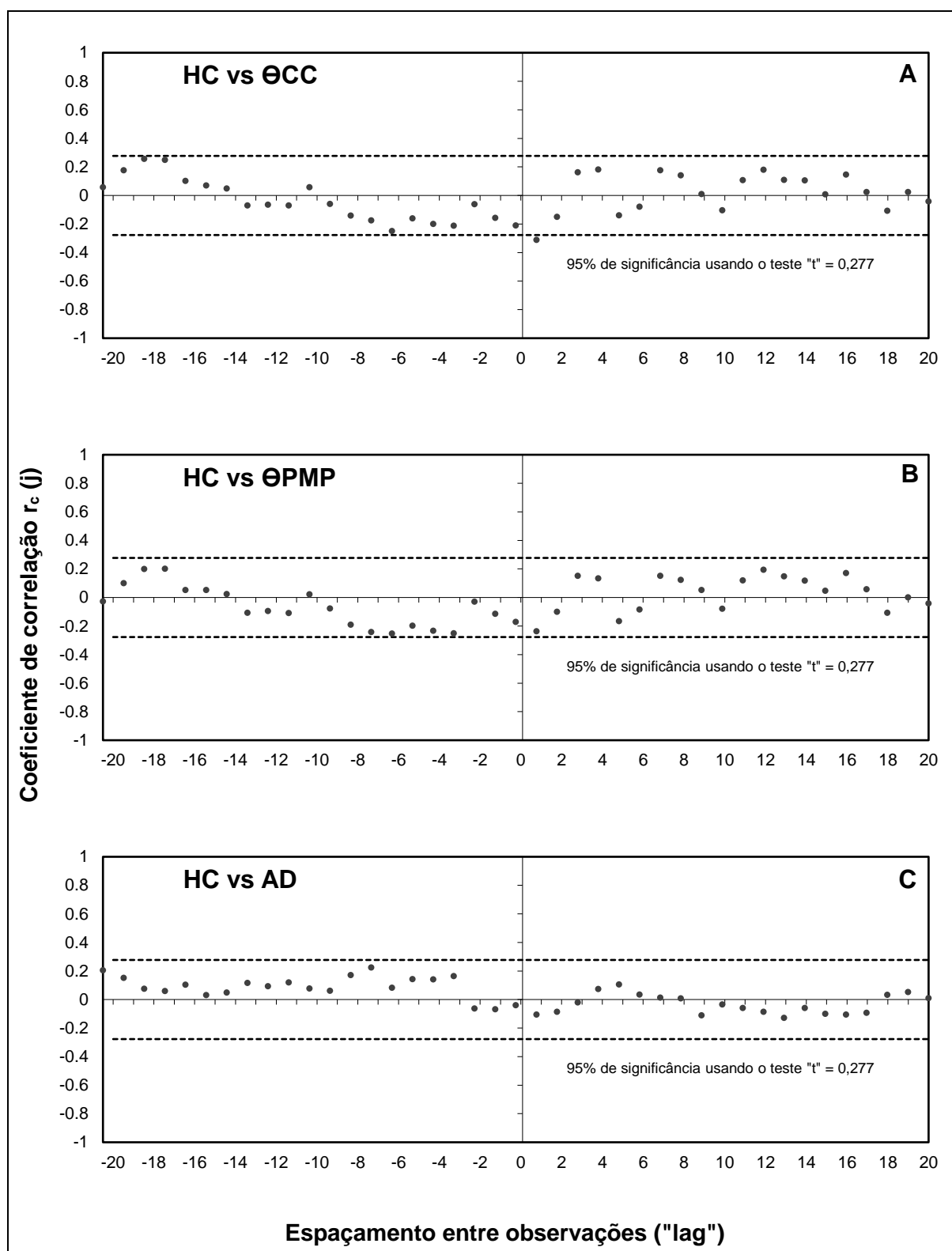


Figura 36 – Crosscorrelograma amostral entre altura do colmo (HC) e: A) conteúdo de água a base de volume na capacidade de campo ( $\Theta_{CC}$ ); B) conteúdo de água a base de volume no ponto de murcha permanente ( $\Theta_{PMP}$ ); e C) água disponível (AD) no espaçamento duplo em ciclo de cana de primeira soca.

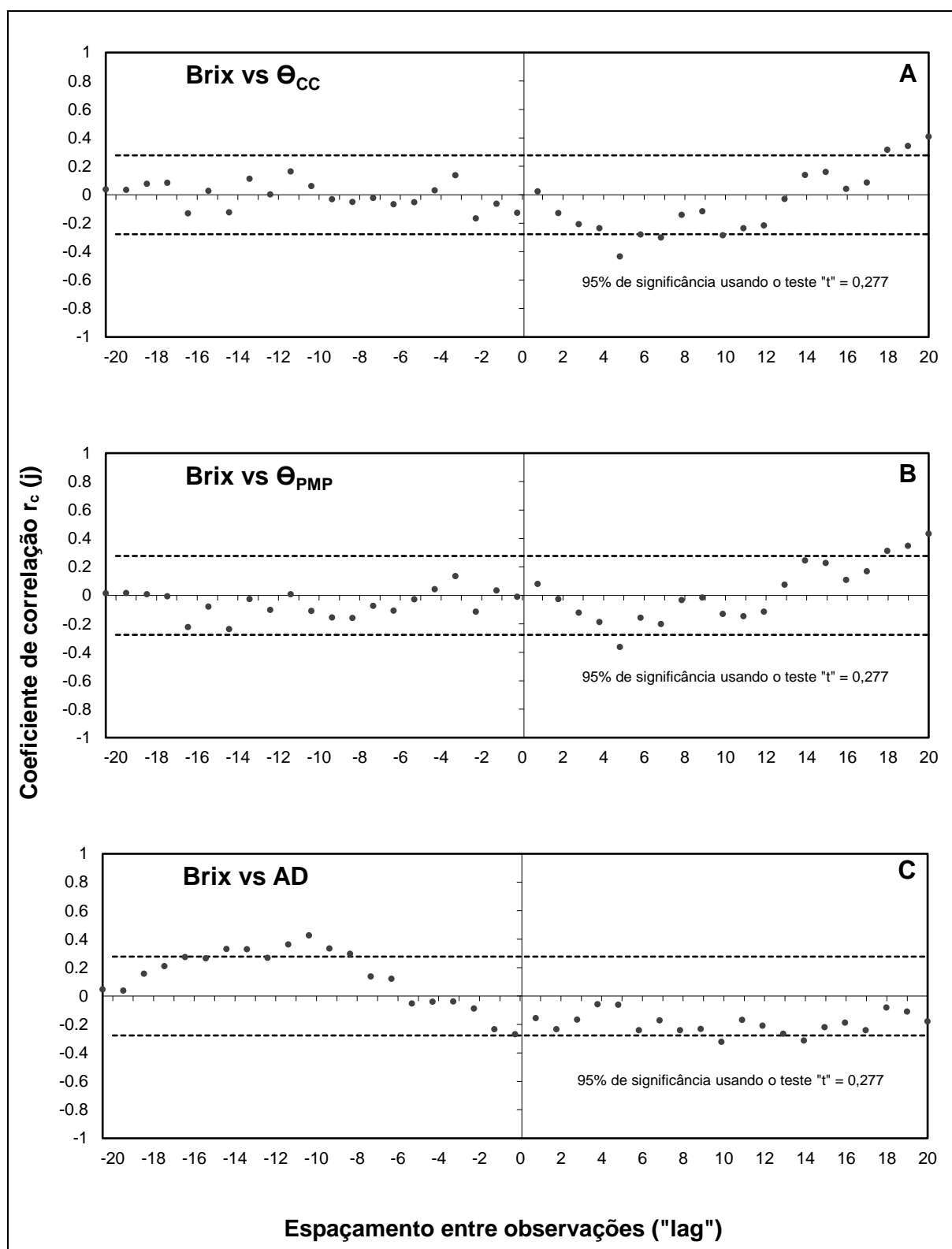


Figura 37 – Crosscorrelograma amostral entre Sólidos solúveis Totais (brix) e: A) conteúdo de água a base de volume na capacidade de campo ( $\theta_{CC}$ ); B) conteúdo de água a base de volume no ponto de murcha permanente ( $\theta_{PMP}$ ); e C) Água disponível (AD) no espaçamento triplo em ciclo de cana de primeira soca.

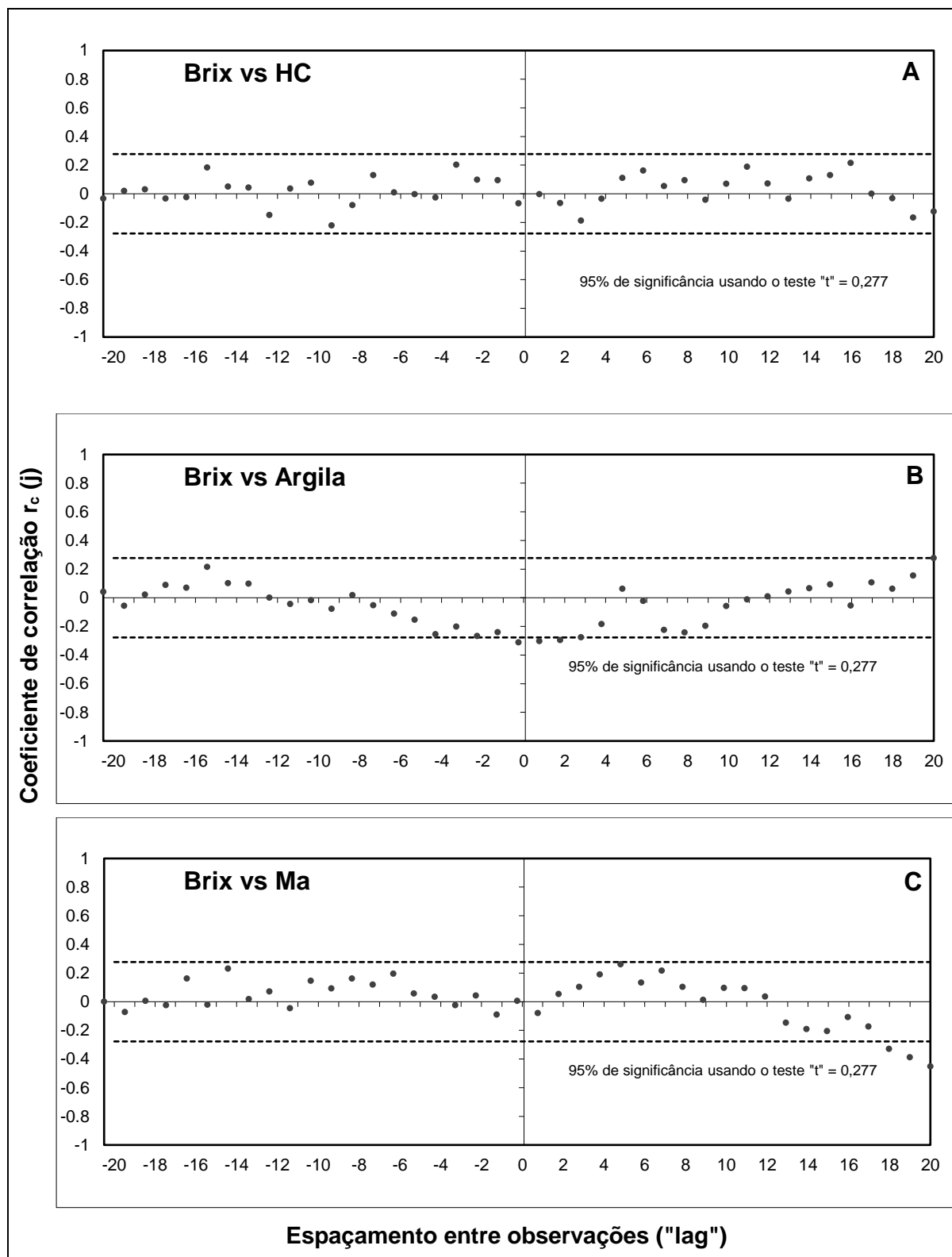


Figura 38 – Crosscorrelograma amostral entre Sólidos solúveis Totais (brix) e: A) altura do colmo (HC); B) teor de argila e C) macroporosidade (Ma) no espaçamento triplo em ciclo de cana de primeira soca.

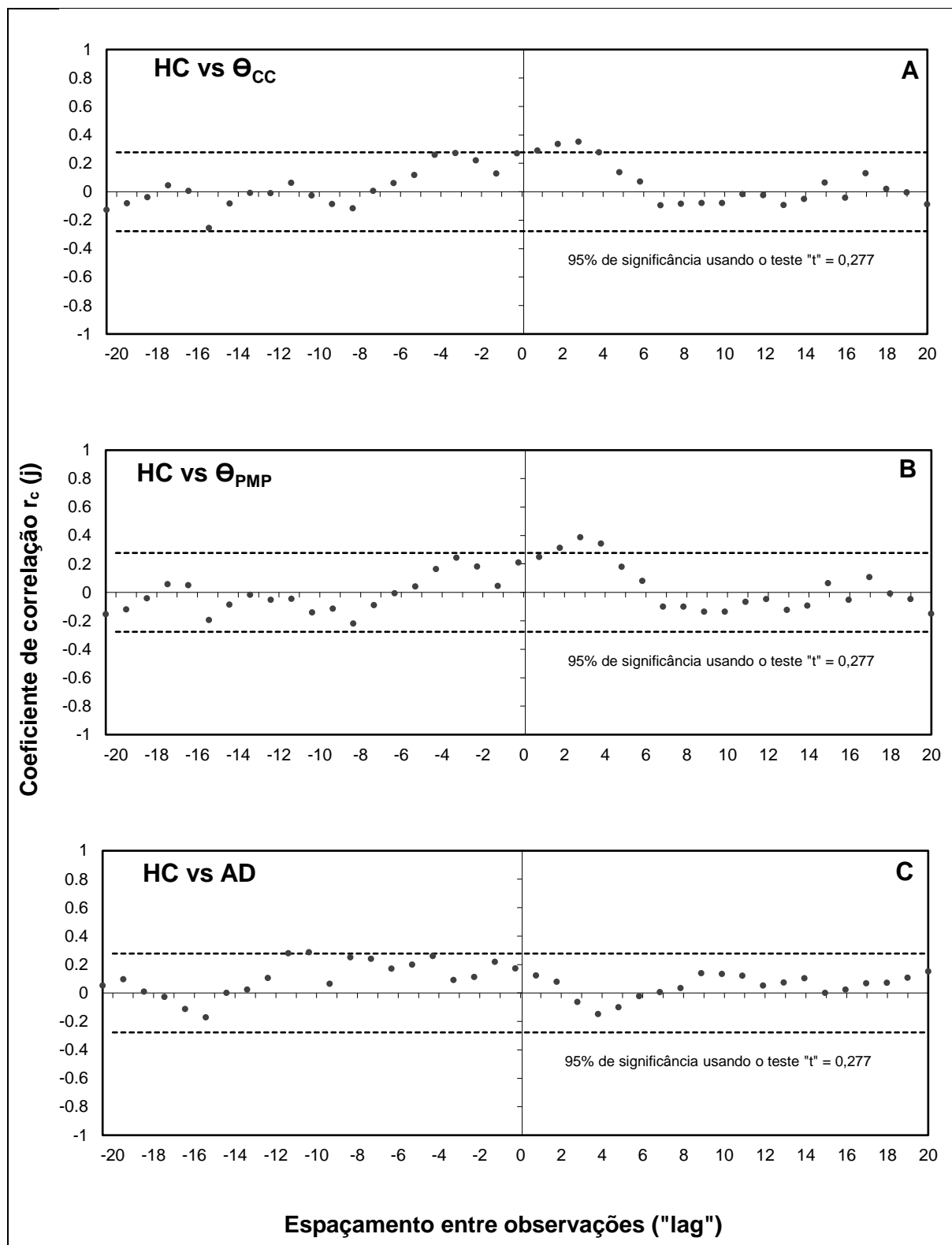


Figura 39 – Crosscorrelograma amostral entre altura do colmo (HC) e: A) conteúdo de água a base de volume na capacidade de campo ( $\Theta_{CC}$ ); B) conteúdo de água a base de volume no ponto de murcha permanente ( $\Theta_{PMP}$ ); e C) Água disponível (AD) no espaçamento triplo em ciclo de cana de primeira soca.

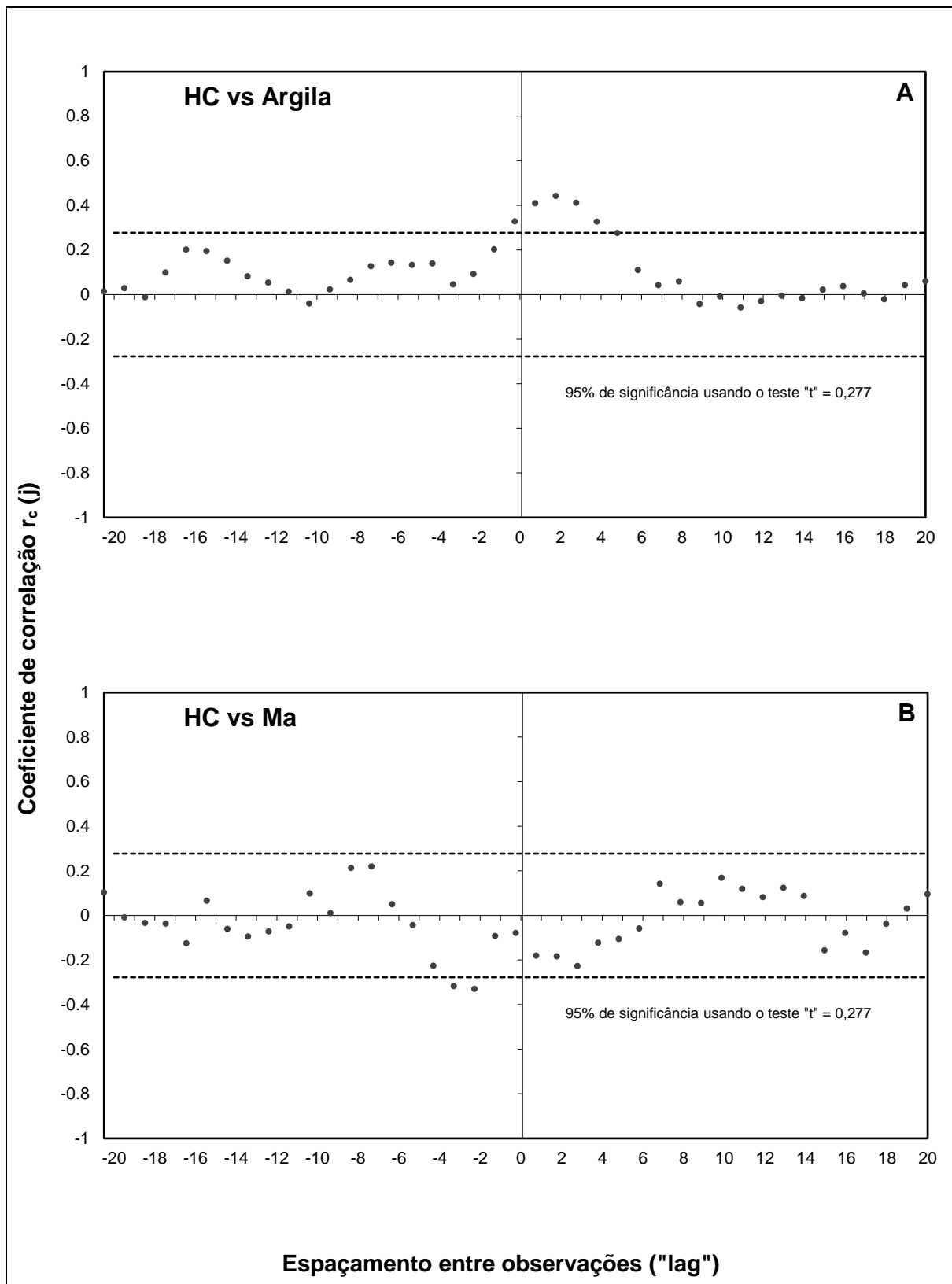


Figura 40 – Crosscorrelograma amostral entre altura do colmo (HC) e: A) teor de argila e B) macroporosidade (Ma) no espaçamento triplo em ciclo de cana de primeira soca.

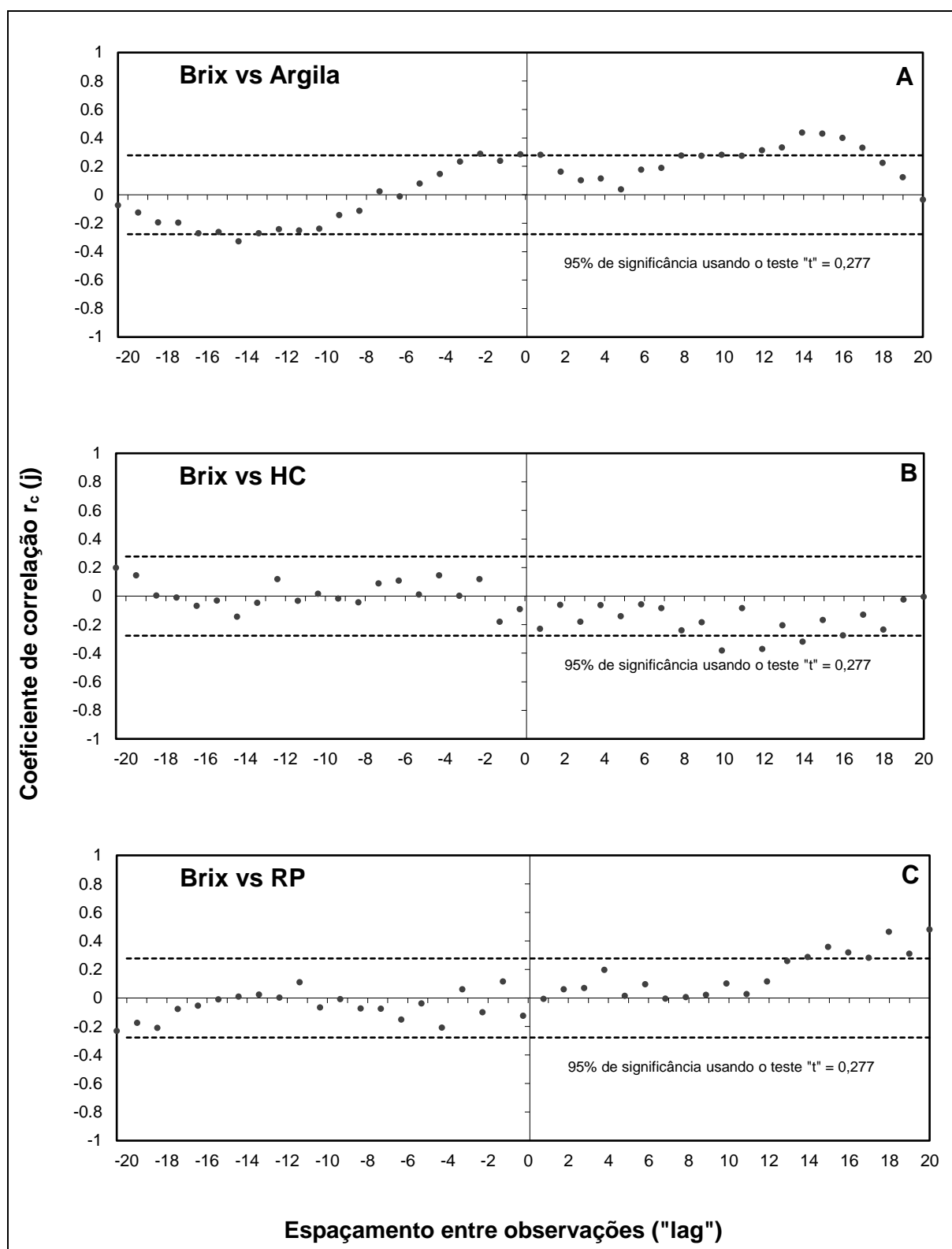


Figura 41 – Crosscorrelograma amostral entre Sólidos solúveis Totais (brix) e: A) teor de argila; B) densidade do solo ( $D_s$ ) e C) resistência à penetração (RP) no espaçamento simples em ciclo de cana de segunda soca.



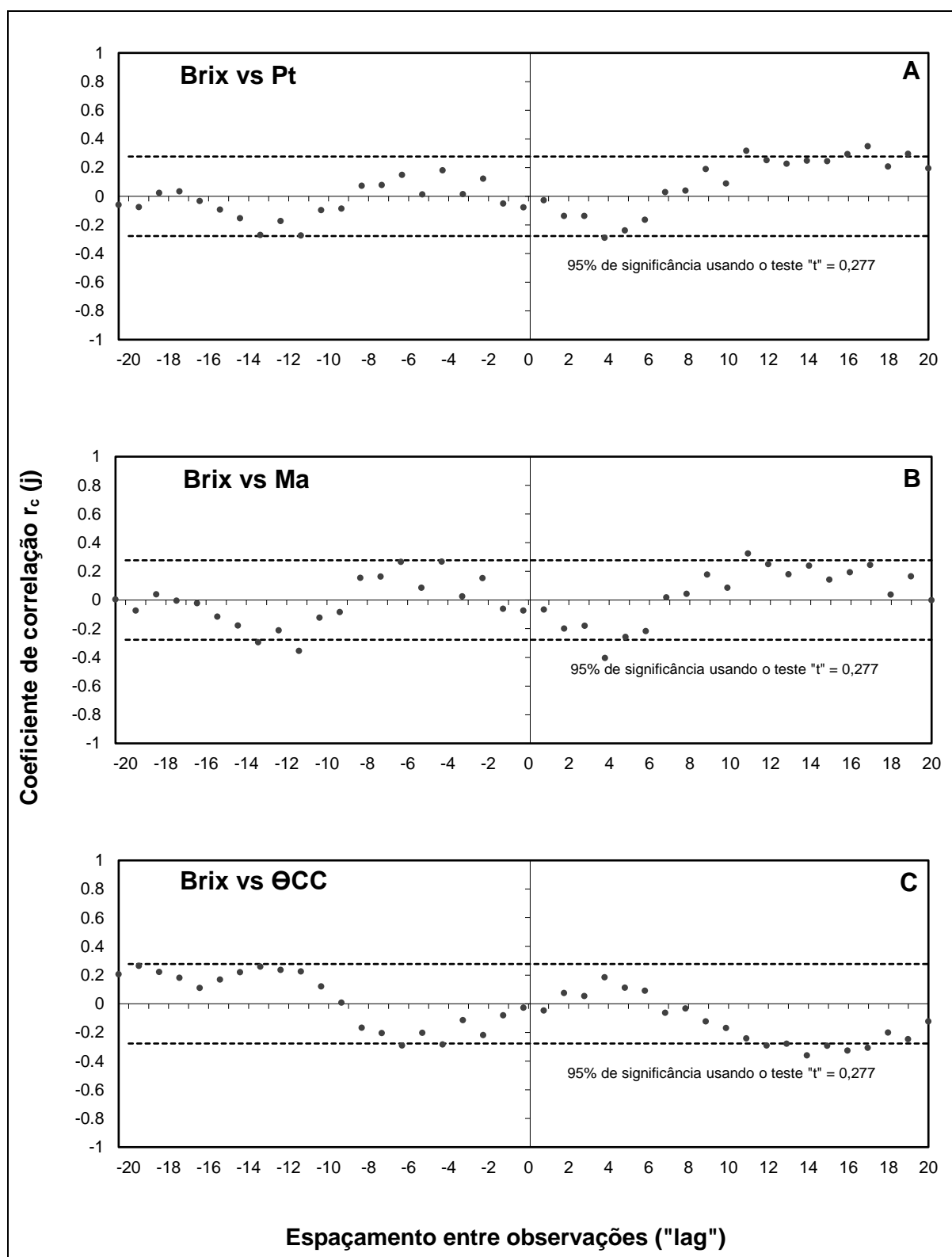


Figura 42 – Crosscorrelograma amostral entre Sólidos solúveis Totais (brix) e: A) porosidade total (Pt); B) macroporosidade (Ma); e C) conteúdo de água a base de volume na capacidade de campo ( $\Theta_{CC}$ ) no espaçamento simples em ciclo de cana de segunda soca.

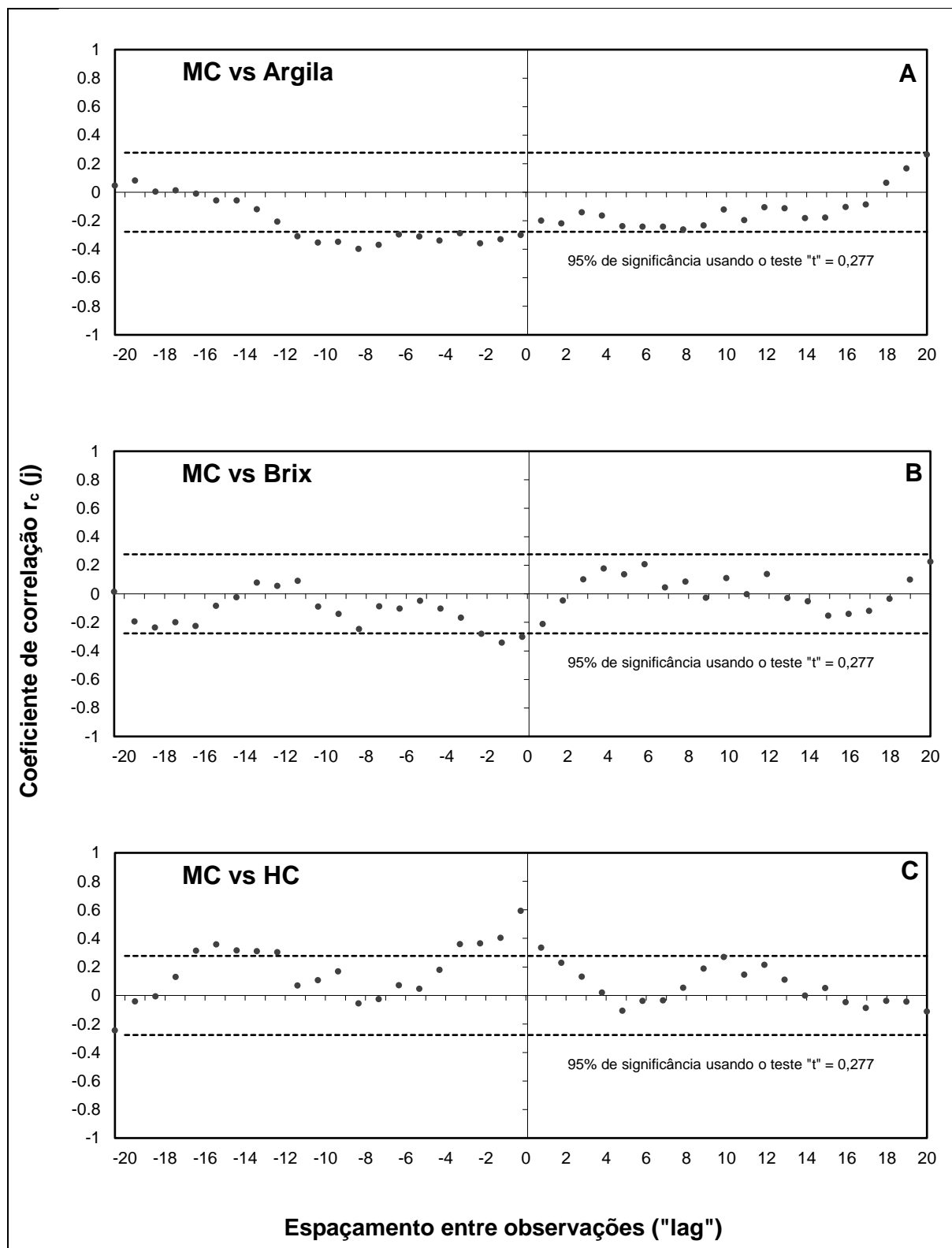


Figura 43 – Crosscorrelograma amostral entre massa do colmo (MC) e : A) teor de argila; B) sólidos solúveis totais (Brix); e C) altura do colmo (HC) no espaçamento simples em ciclo de cana de segunda soca.

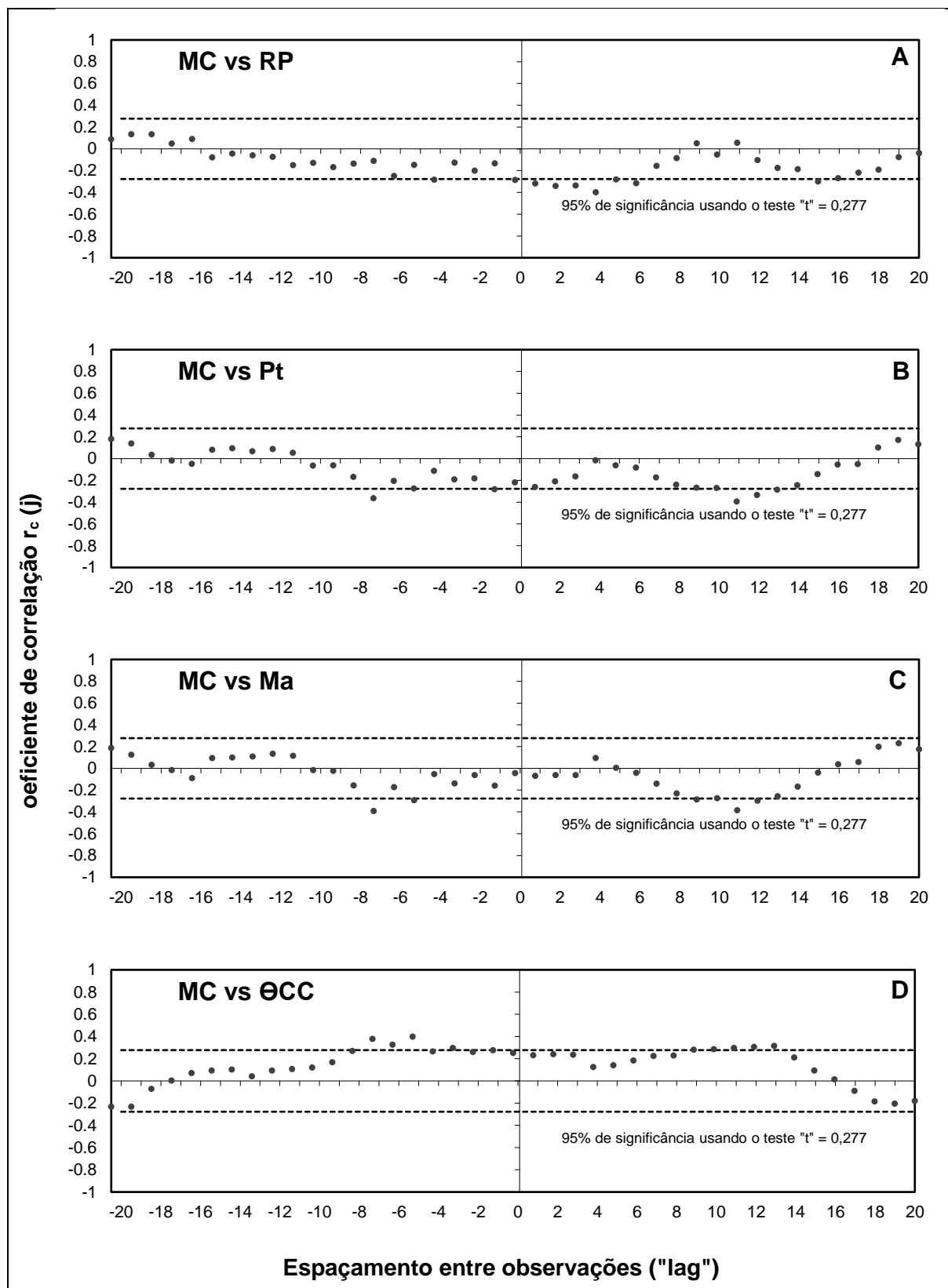


Figura 44 – Crosscorrelograma amostral entre massa do colmo (MC) e: A) teor de argila; B) porosidade total (Pt); C) macroporosidade (Ma); e D) conteúdo de água a base de volume na capacidade de campo ( $\theta_{cc}$ ) no espaçamento simples em ciclo de cana de segunda soca.

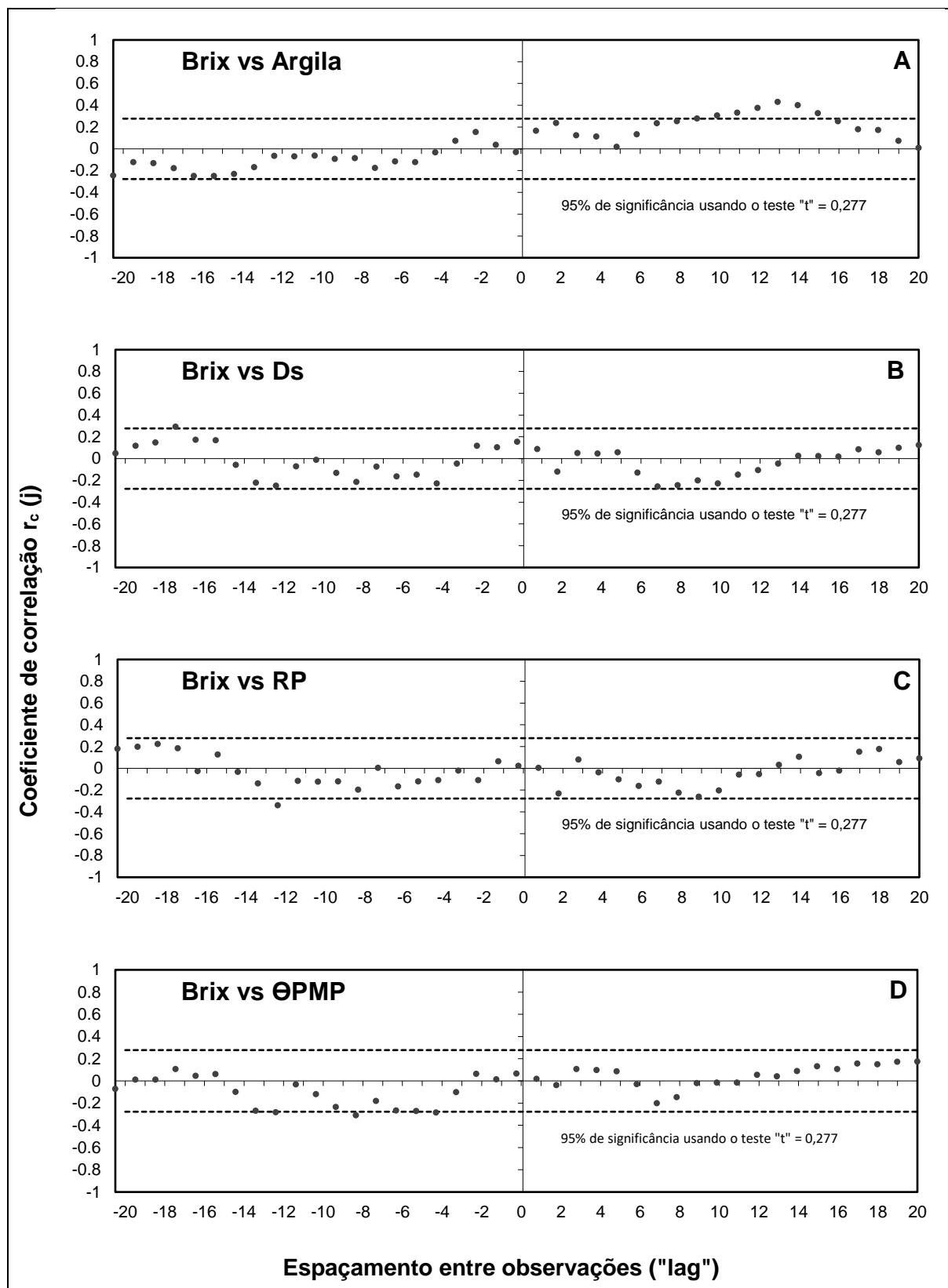


Figura 45 – Crosscorrelograma amostral entre massa do colmo (MC) e: A) teor de argila (Argila); B) densidade do solo (Ds); C) resistência à penetração (RP); e D) conteúdo de água a base de volume na capacidade de campo ( $\theta_{CC}$ ) no espaçamento duplo em ciclo de cana de segunda soca.

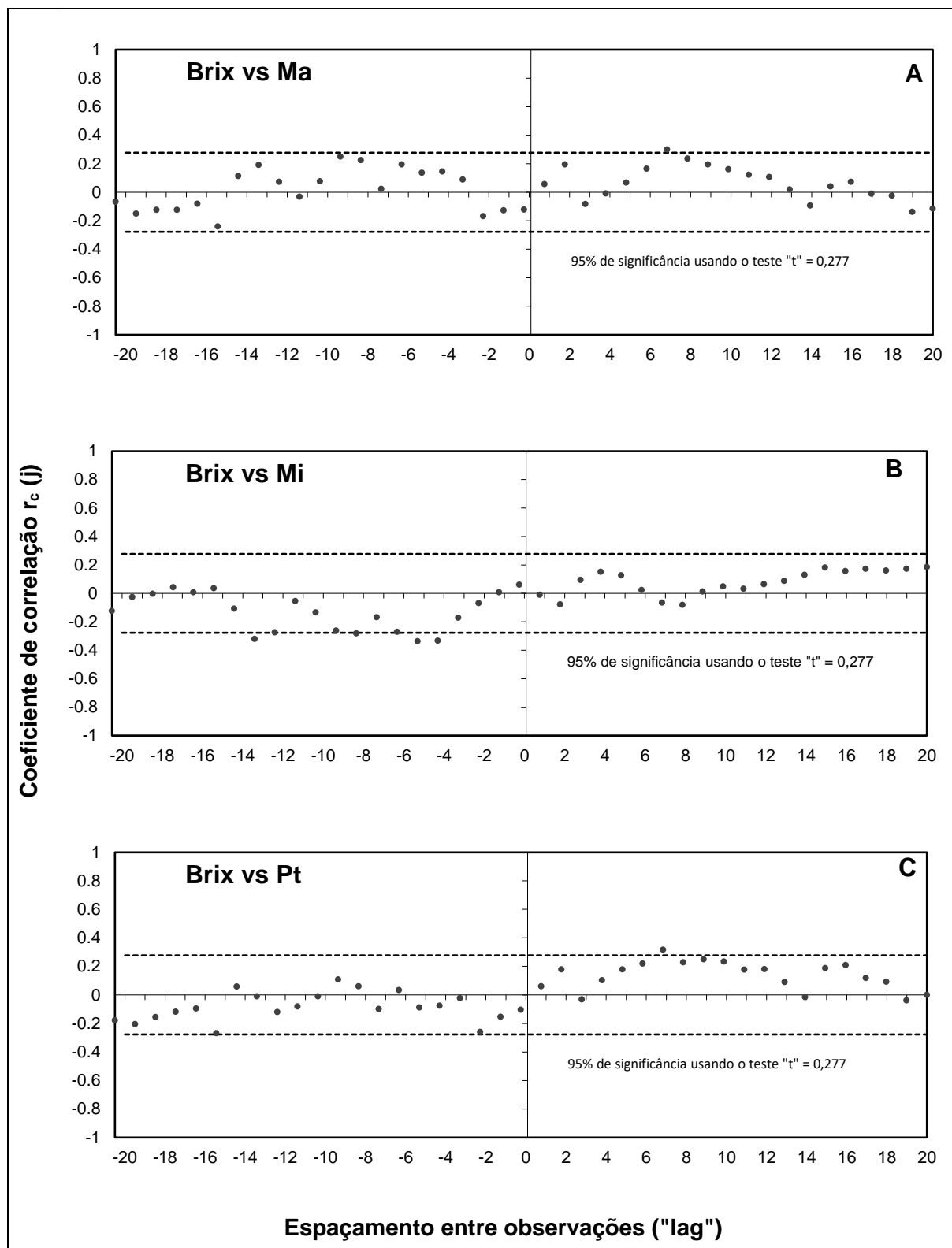


Figura 46 – Crosscorrelograma amostral entre Sólidos solúveis Totais (Brix) e: A) macroporosidade (Ma); B) microporosidade (Mi); e C) porosidade total (Pt) no espaçamento duplo em ciclo de cana de segunda soca.

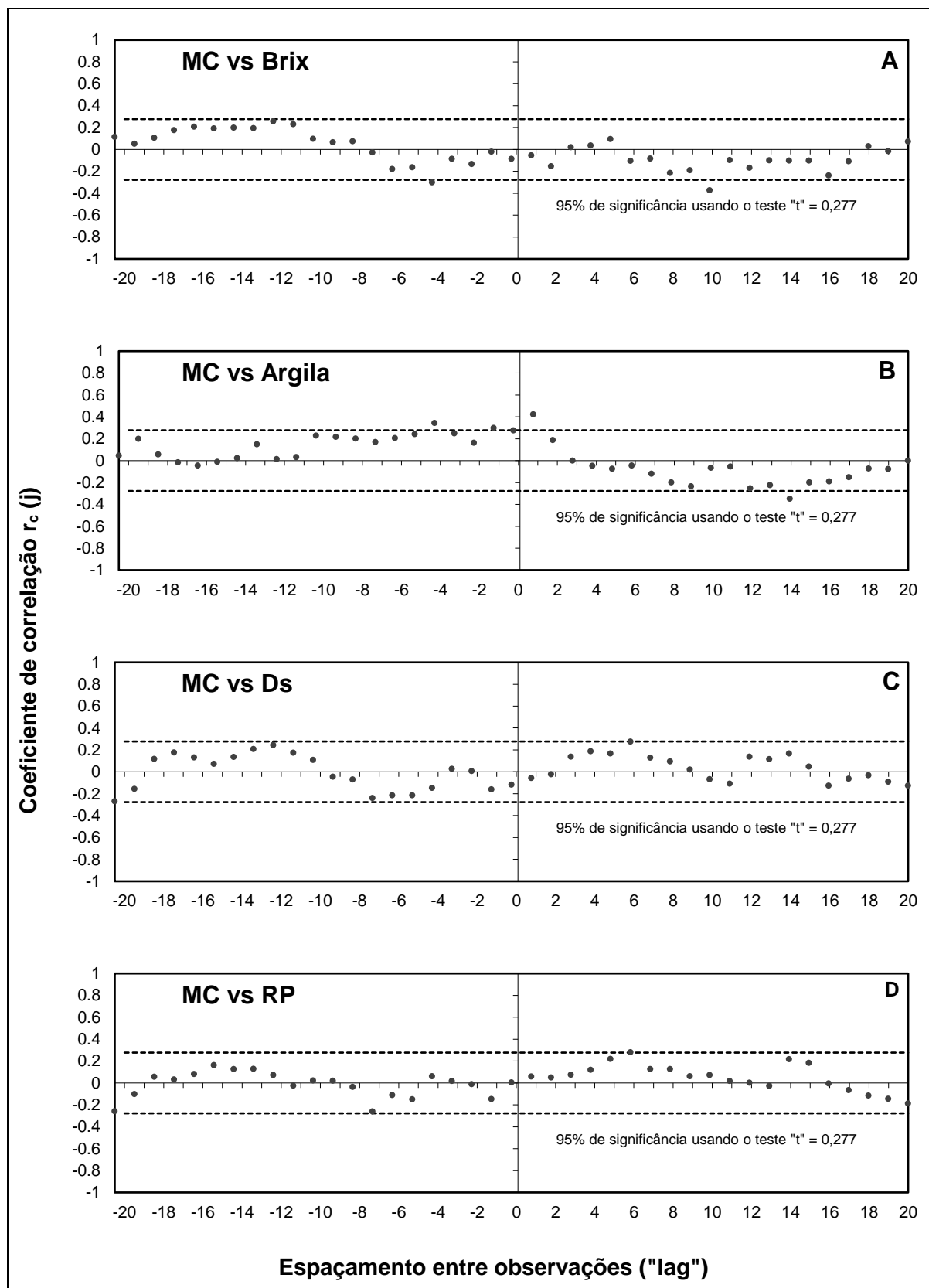


Figura 47 – Crosscorrelograma amostral entre massa do colmo (MC) e: A) sólidos solúveis totais (Brix); B) teor de argila; C) densidade do solo (Ds); e D) resistência à penetração (RP) no espaçamento duplo em ciclo de cana de segunda soca.

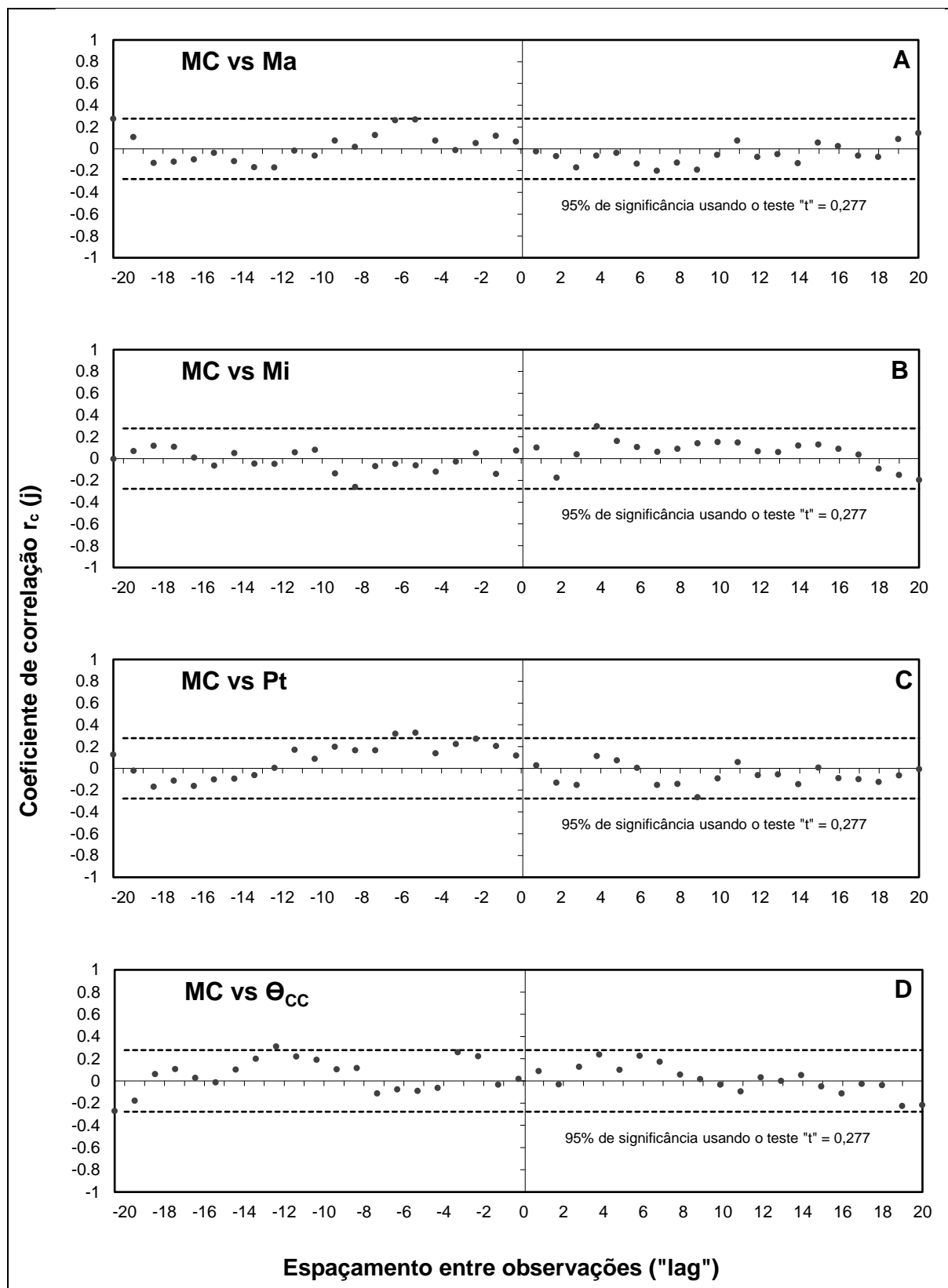


Figura 48 – Crosscorrelograma amostral entre massa do colmo (MC) e: A) macroporosidade (Ma); B) microporosidade (Mi); C) porosidade total (Pt); e D) conteúdo de água a base de volume na capacidade de campo ( $\theta_{cc}$ ) no espaçamento duplo em ciclo de cana de segunda soca.

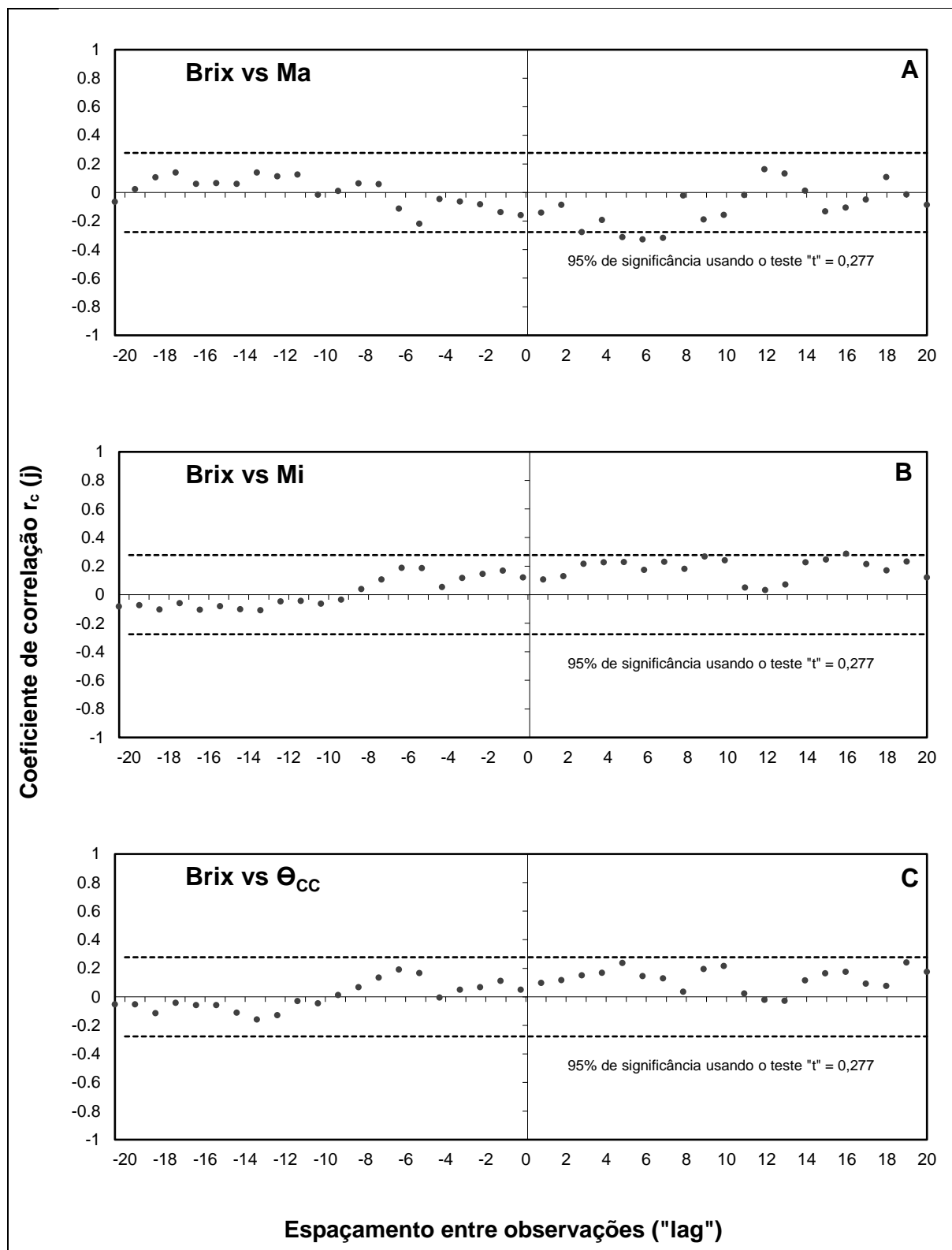


Figura 49 – Crosscorrelograma amostral entre sólidos solúveis totais (brix) e: A) macroporosidade (Ma); B) microporosidade (Mi); e C) conteúdo de água a base de volume na capacidade de campo ( $\theta_{cc}$ ) no espaçamento triplo em ciclo de cana de segunda soca.



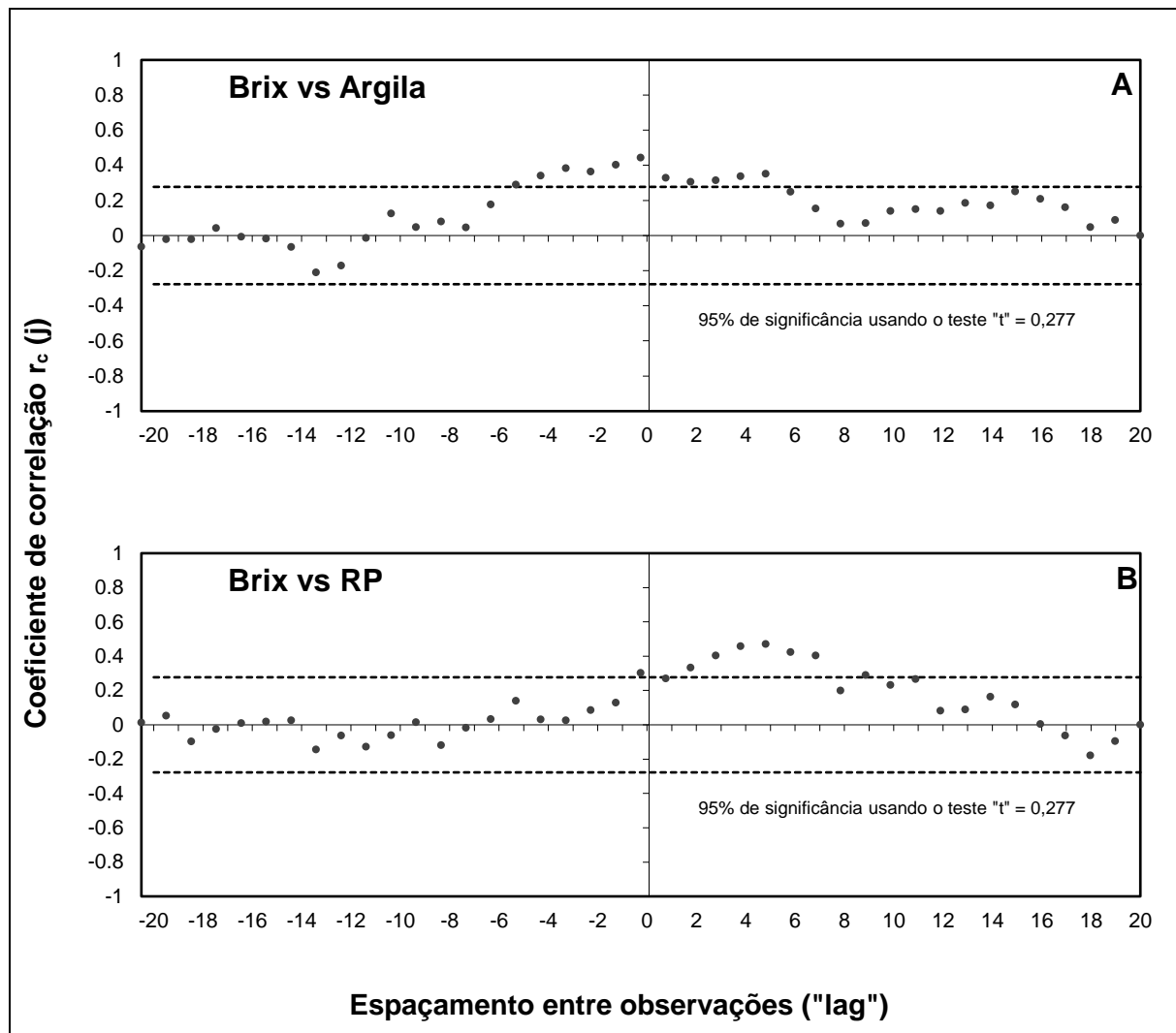


Figura 50 – Crosscorrelograma amostral entre sólidos solúveis totais (brix) e: A) teor de argila; e B) resistência à penetração (RP) no espaçamento triplo em ciclo de cana de segunda soca.

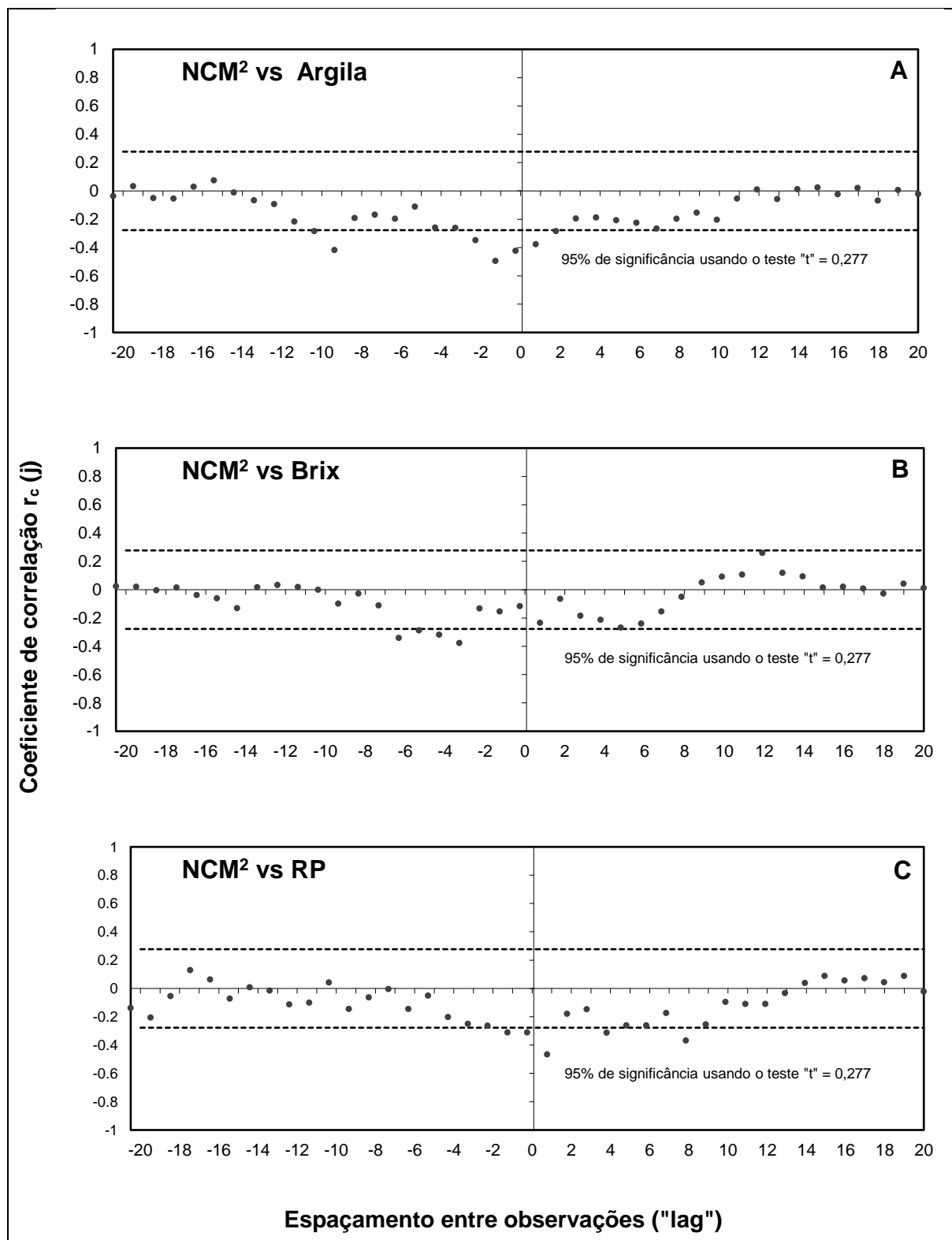


Figura 51 – Crosscorrelograma amostral entre número de colmos por metro quadrado (NCM<sup>2</sup>) e: A) teor de argila; B) sólidos solúveis totais (Brix); e C) resistência à penetração (RP) no espaçamento triplo em ciclo de cana de segunda soca.

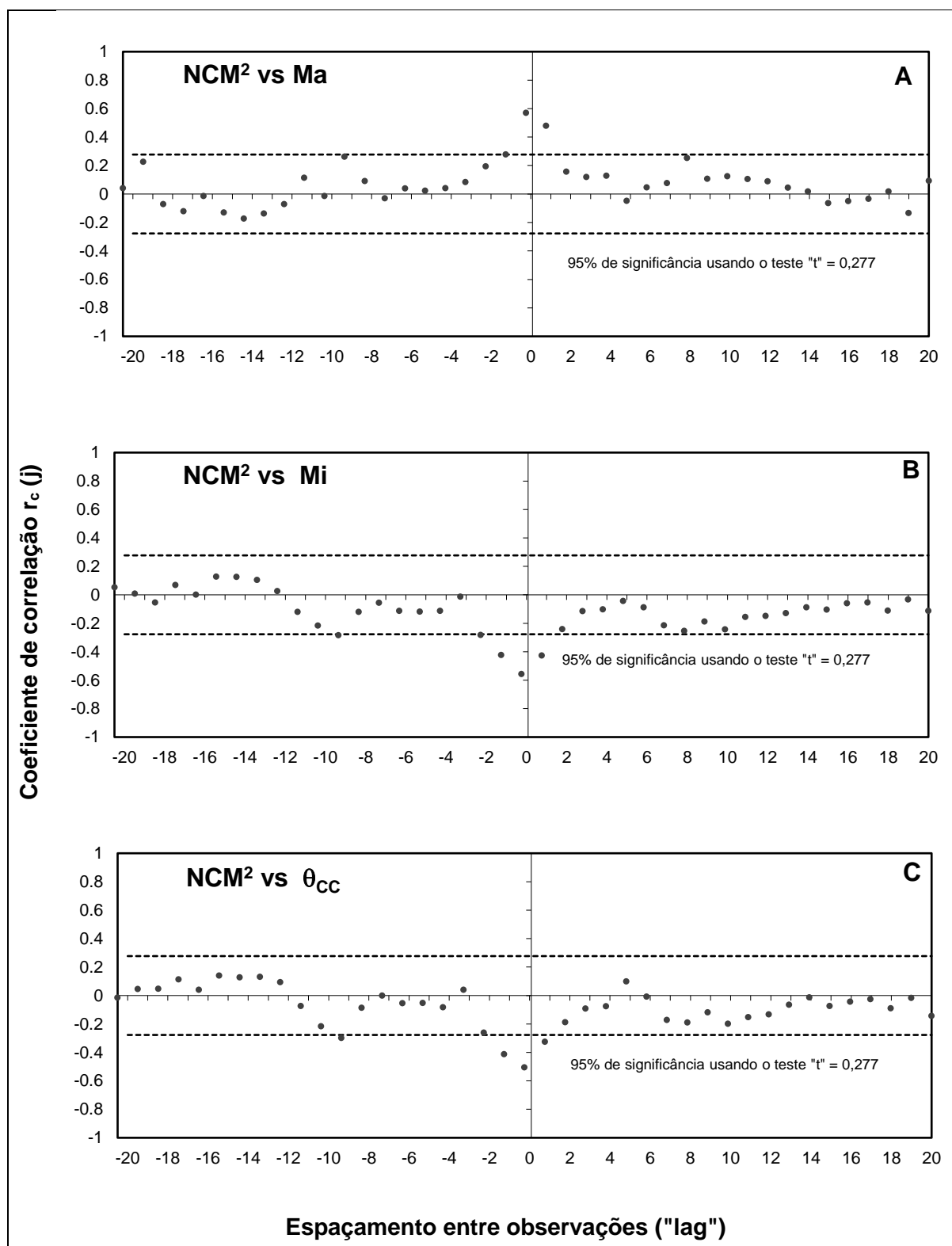


Figura 52 – Crosscorrelograma amostral entre número de colmos por metro quadrado (NCM<sup>2</sup>) e: A) macroporosidade (Ma); B) microporosidade (Mi); e C) conteúdo de água em base de volume na capacidade de campo ( $\theta_{cc}$ ) no espaçamento triplo em ciclo de cana de segunda soca.

Para melhor visualização dos resultados apresentados nas figuras de 30 a 52, as tabelas 9 e 10 apresentam um resumo da análise de correlação espacial cruzada. Nota-se na tabela 9 que não houve nenhuma correlação espacial significativa considerando as variáveis massa do colmo (MC), sólidos solúveis totais (Brix) e altura do colmo (HC) como variáveis preditas em nenhum tipo de espaçamento no ciclo de cana de primeira soca.

Tabela 9 – Análise de correlação espacial cruzada em ciclo de cana de primeira soca.

Variável predita	Variáveis preditoras	Resultado*
<i>Linha simples</i>		
MC	Argila	SCC
<i>Linha dupla</i>		
Brix	$\theta_{CC}$	SCC
	$\theta_{PMP}$	SCC
	AD	SCC
	Ds	SCC
	RP	SCC
	Argila	SCC
	Ma	SCC
	Mi	SCC
	Pt	SCC
	HC	SCC
HC	Ds	SCC
	RP	SCC
	Argila	SCC
	Ma	SCC
	Mi	SCC
	Pt	SCC
	$\theta_{CC}$	SCC
	$\theta_{PMP}$	SCC
	AD	SCC
	<i>Linha tripla</i>	
Brix	$\theta_{CC}$	SCC
	$\theta_{PMP}$	SCC
	AD	SCC
	HC	SCC
	Argila	SCC
	Ma	SCC
HC	$\theta_{CC}$	SCC
	$\theta_{PMP}$	SCC
	AD	SCC
	Argila	SCC
	Ma	SCC

\*SCC – Ausência de correlação espacial cruzada significativa.

Tabela 10 – Análise de correlação espacial cruzada em ciclo de cana de segunda soca.

Variável predita	Variáveis preditoras	Resultado*
<i>Linha simples</i>		
Brix	Argila	SCC
	HC	SCC
	RP	SCC
	Pt	SCC
	Ma	SCC
	$\theta_{cc}$	SCC
MC	Argila	SCC
	Brix	SCC
	HC	1lag
	RP	SCC
	Pt	1lag
	Ma	SCC
$\theta_{cc}$	SCC	
<i>Linha dupla</i>		
Brix	Argila	SCC
	Ds	SCC
	RP	SCC
	$\theta_{cc}$	SCC
	Ma	SCC
	Mi	SCC
Pt	SCC	
MC	Brix	SCC
	Argila	SCC
	Ds	SCC
	RP	SCC
	Ma	SCC
	Mi	SCC
Pt	SCC	
$\theta_{cc}$	SCC	
<i>Linha tripla</i>		
Brix	Ma	SCC
	Mi	SCC
	$\theta_{cc}$	SCC
	Argila	5lag
	RP	scc
NCM <sup>2</sup>	Argila	2lag
	Brix	SCC
	RP	1lag
	Ma	1 lag
	Mi	1lag
$\theta_{cc}$	1lag	

\*SCC – Ausência de correlação espacial significativa.

Já no ciclo de segunda soca a massa do colmo (MC) correlacionou-se espacialmente com as variáveis altura do colmo (HC) e porosidade total (Pt) no espaçamento linha simples, podendo ser observado nos crosscorrelogramas apresentados nas Fig. 43C e 44B, respectivamente. No espaçamento linha tripla (LT) em ciclo de segunda soca a variável sólidos dissolvidos totais (Brix) se correlacionou espacialmente com a Argila (Fig. 50A). Nesse mesmo espaçamento e ciclo a variável número de colmos por metro quadrado (NCM<sup>2</sup>) se correlacionou significativamente com Argila (Fig. 51A), resistência a penetração (RP) (Fig. 51C), macroporosidade (Ma) (Fig. 52A), microporosidade (Mi) (Fig. 52B) e conteúdo de água a base de volume na capacidade de campo ( $\theta_{cc}$ ) (Fig. 52C).

Considerando os resultados da análise de correlação espacial apresentados em forma de resumo nas tabelas 9 e 10, é possível inferir em uma tendência de maior contribuição sobre os componentes de produção das variáveis físicas do solo nos espaçamentos LS e LT em ciclo de segunda soca. Esse comportamento pode estar associado as restrições físicas, consequência da compactação do solo ocasionada pelo tráfego de máquinas, que podem ter sido mais pronunciadas nos espaçamentos LS e LT em comparação com LD.

Observando a análise de crosscorrelação da variável MC em ciclo de cana de segunda soca nos espaçamentos LS e LD, nota-se que houve correlação com o atributo Pt no espaçamento LS e não houve no espaçamento LD. Desta forma, é possível constatar a influência do tipo de espaçamento sobre as relações espaciais entre as variáveis. SCHAFFRATH et al. (2008) avaliando dois sistemas de preparo do solo em cultivo de grãos, observaram variações nas relações espaciais entre atributos físicos do solo, utilizando como ferramenta de análise o semivariograma cruzado, mostrando que o manejo interfere nas relações espaciais entre as variáveis.

Como requisito para compor o modelo de espaço de estados é necessário haver a correlação espacial entre a variável predita e as variáveis predictoras. Observando as tabelas 9 e 10, nota-se que apenas no ciclo de segunda soca houve correlação espacial entre as variáveis. Assim, no espaçamento LS o modelo será composto pelas variáveis HC e Pt e a MC será a variável predita. No espaçamento LT um dos modelos será composto com o Brix como variável predita e com a argila

como variável preditora. O Outro modelo para esse espaçamento será com o NCM<sup>2</sup> como variável predita e a Argila, RP, Ma, Mi e  $\Theta_{cc}$  como variáveis preditoras.

#### 6.1.4 Abordagem de espaço de estados

Como já discutido no item anterior, os modelos só puderam ser confeccionados no ciclo de segunda soca, pois foi somente nos espaçamentos LS e LT deste ciclo que as variáveis atenderam à pressuposição de correlação espacial entre a variável predita e as variáveis preditoras. No espaçamento LS, em ciclo de cana de segunda soca, a variável considerada como predita foi a MC que se correlacionou espacialmente com as variáveis altura do colmo (HC) e porosidade total (Pt), as quais foram consideradas variáveis preditoras. A equação 14 apresenta a estimativa da MC por um modelo autorregressivo de espaço de estados no espaçamento LS em ciclo de segunda soca. Nota-se que a maior contribuição na estimativa da MC é por ela mesma na posição  $i-1$ , explicando 74% da variação desta variável na posição  $i$ . Em segundo lugar em contribuição está a variável HC na posição  $i-1$ , com aproximadamente 20%. Já a Pt na posição  $i-1$  contribui com 11% na estimativa da variável MC.

$$(MC)_i = 0,7428*(MC)_{i-1} + 0,1975*(HC)_{i-1} + 0,1147*(Pt)_{i-1} + u_{(MC)_i} \quad \text{Equação 14}$$

Analisando a dispersão dos dados ao longo da transeção (Fig. 53), 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. Nota-se que nenhum valor observado está fora dos limites de confiança calculados para cada estimativa, fato este corroborado pelo alto valor do coeficiente de determinação ( $R^2 = 0,971$ ) da análise de regressão entre os valores observados e estimados pela equação de estados (Fig. 54).

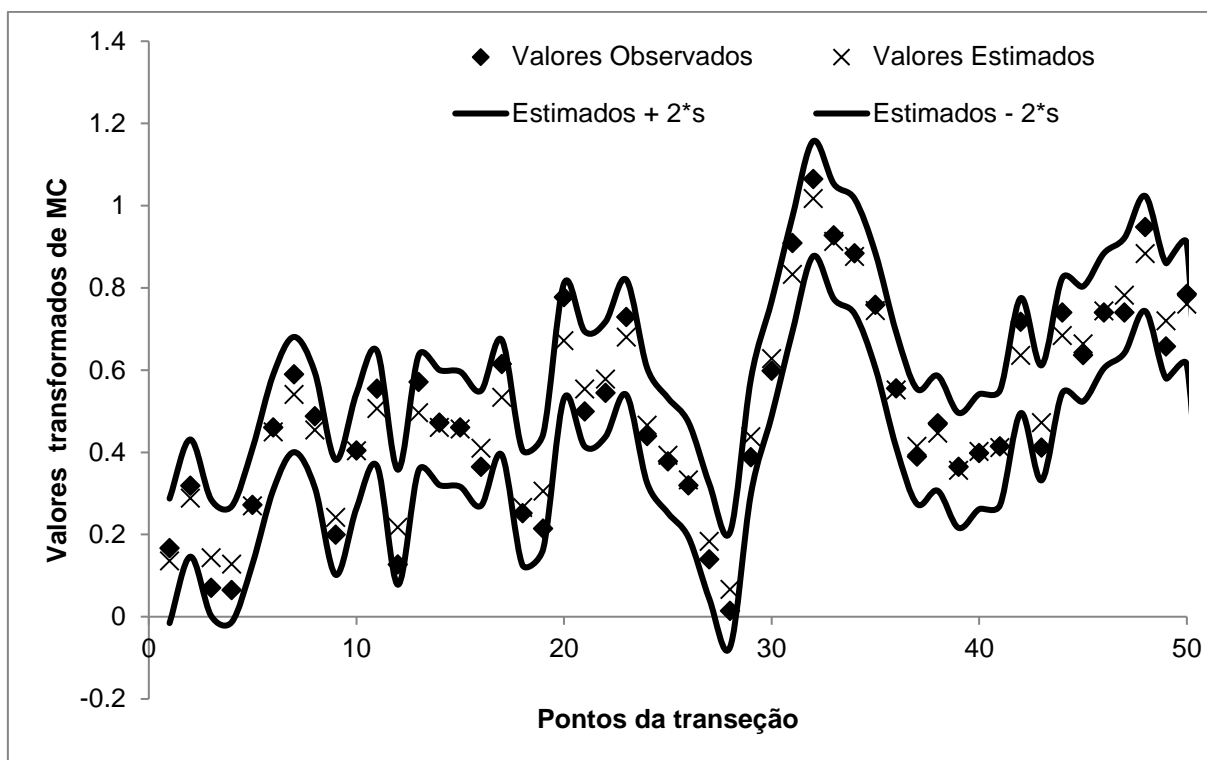


Figura 53 - Análise de espaço de estados aplicada a variável massa do colmo na posição  $i$  em função da altura do colmo e porosidade na posição  $i-1$ , no espaçamento LS em ciclo de segunda soca.

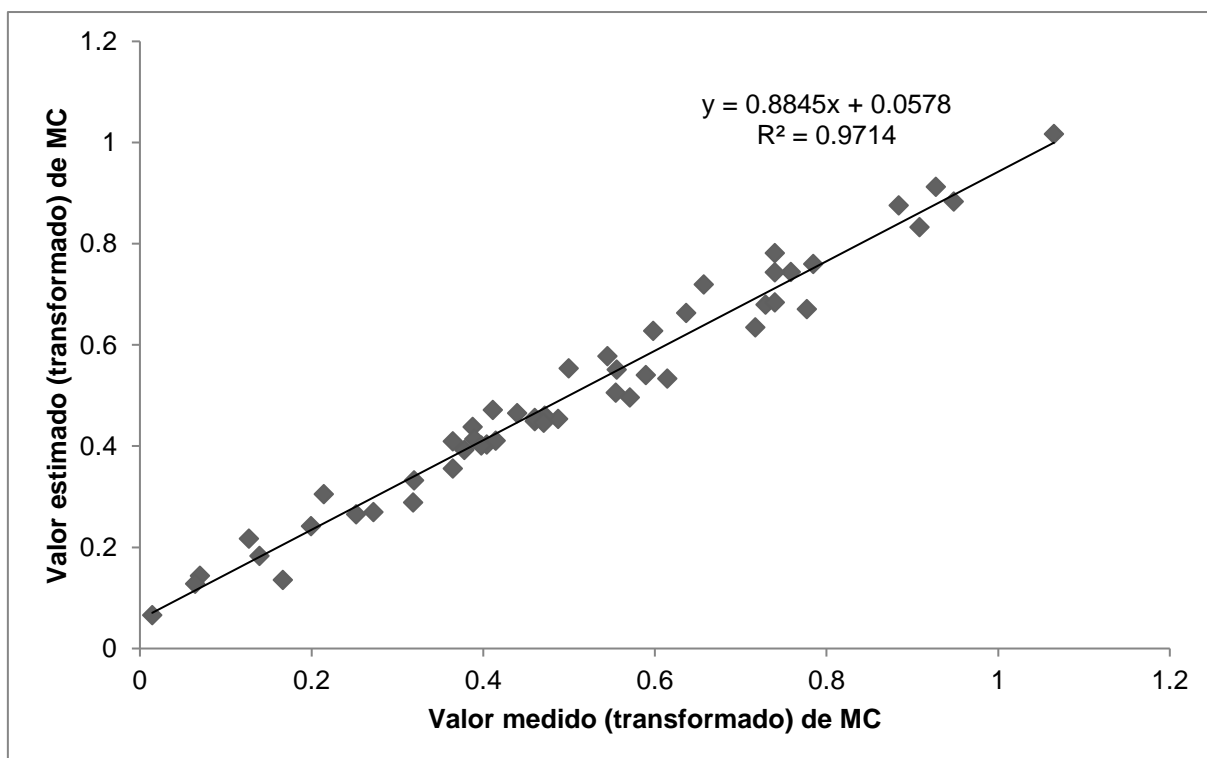


Figura 54 - Regressão linear entre os valores transformados observados e estimados de massa do colmo (MC) para o modelo de estimativa de MC no espaçamento LS em ciclo de segunda soca.



Para a avaliação da contribuição individual das variáveis que se correlacionaram espacialmente com MC no espaçamento LS em ciclo de segunda soca (HC e Pt) foram confeccionados modelos autorregressivos de espaço de estados estimando a MC com apenas uma variável preditora. A equação 15 apresenta o modelo considerando a MC como variável predita e a HC como variável preditora. Percebe-se uma contribuição de 48% da HC na posição  $i-1$  na estimativa da MC na posição  $i$ . Essa contribuição e a relação positiva com a MC já se esperava, pois a HC é um dos principais componentes da MC, sendo que quanto mais alto o colmo maior a massa.

$$(MC)_i = 0,5031*(MC)_{i-1} + 0,4838*(HC)_{i-1} + u_{(MC)_i} \quad \text{Equação 15}$$

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 (Fig. 55), corroborado pelo alto valor do coeficiente de determinação ( $R^2 = 0,99$ ) da regressão entre os valores observados e estimados pela equação de estado (Fig. 56).

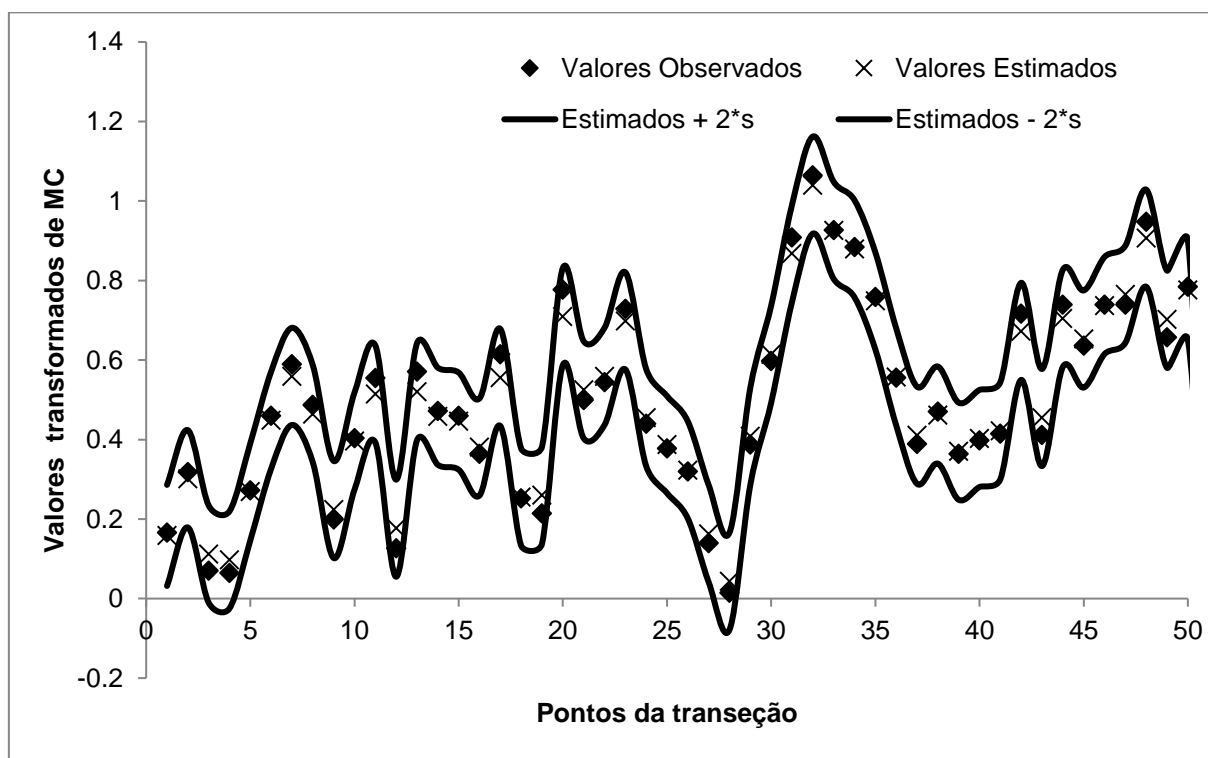


Figura 55 - Análise de espaço de estados aplicada a variável massa do colmo na posição  $i$  em função da altura do colmo na posição  $i-1$ , no espaçamento LS em ciclo de segunda soca.

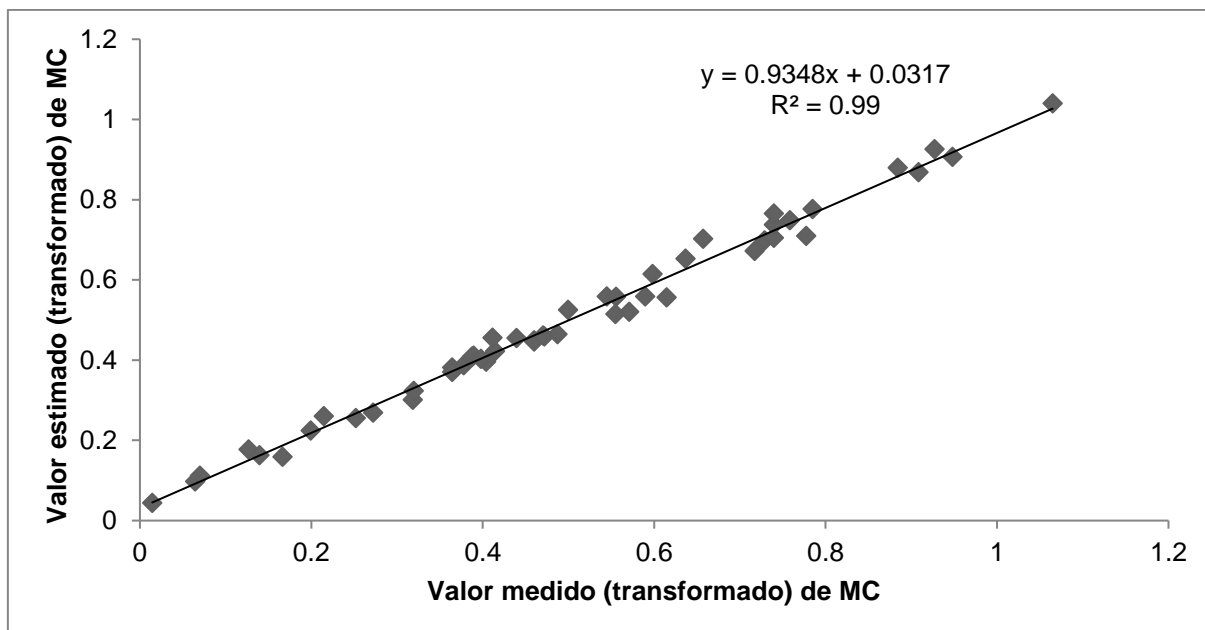


Figura 56 - Regressão linear entre os valores transformados observados e estimados de massa do colmo (MC) para o modelo de estimativa de MC considerando só a HC como variável preditora no espaçamento LS em ciclo de segunda soca.

Diante dos resultados obtidos pela estimativa da MC através da HC é possível afirmar que o modelo (equação 15) conseguiu detectar com acurácia as variações deste atributo podendo ser utilizado com exatidão na estimativa da MC na posição  $i$  por meio da HC na posição  $i-1$ .

A equação 16 apresenta o modelo autorregressivo de espaço de estados da estimativa da MC por meio da porosidade total no espaçamento LS em ciclo de segunda soca. Nota-se uma contribuição positiva de 10% da  $Pt$  na posição  $i-1$  na estimativa da MC na posição  $i$ . A maior contribuição é pela própria variável na posição  $i-1$ .

$$(MC)_i = 0,8912*(MC)_{i-1} + 0,1091*(Pt)_{i-1} + u_{(MC)_i} \quad \text{Equação 16}$$

Embora seja pequena a contribuição da  $Pt$  na estimativa da MC, o modelo apresentou boa acurácia na estimativa das variações da MC, evidenciado quando se observa a dispersão dos dados ao longo da transeção, onde a maioria dos valores estimados ficaram próximos dos valores observados e praticamente todos ficaram dentro dos limites de confiança calculados para cada estimativa (Fig. 57). Outro índice de avaliação da qualidade do modelo é o coeficiente de determinação da

análise de regressão entre os valores observados e estimados pela equação de estado (Fig. 58), o qual foi alto, próximo a 1 ( $R^2 = 0,9267$ ).

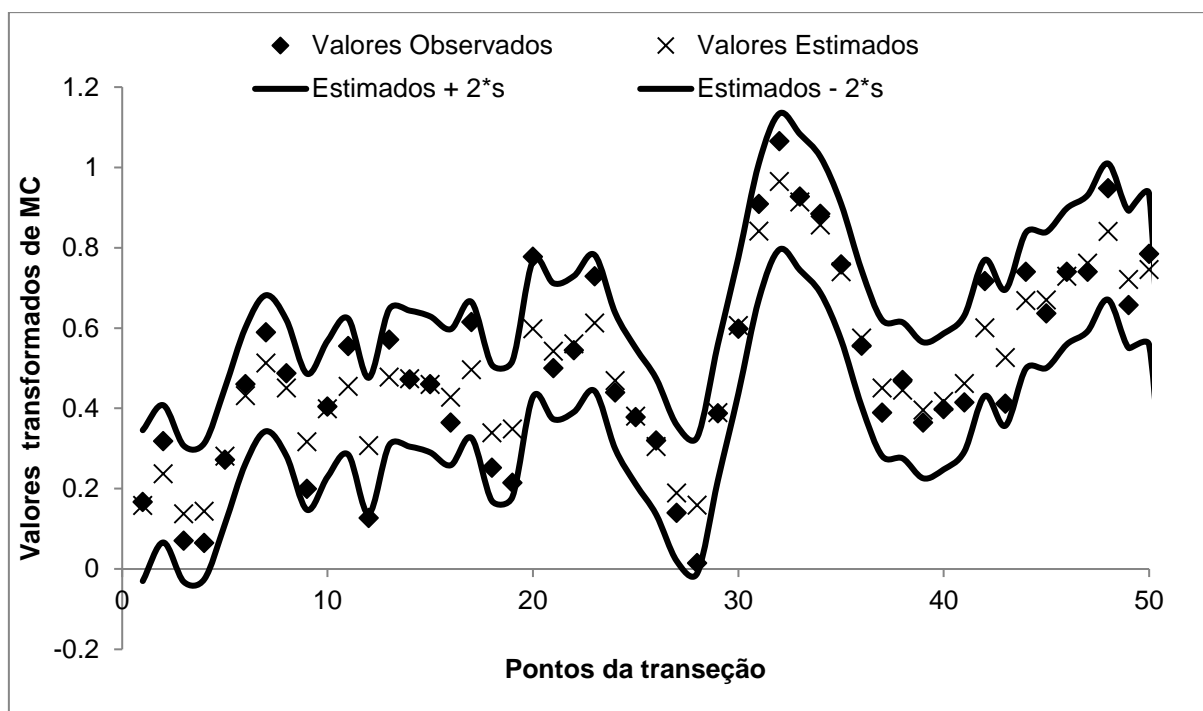


Figura 57 - Análise de espaço de estados aplicada a variável massa do colmo na posição  $i$  em função da porosidade total na posição  $i-1$ , no espaçamento LS em ciclo de segunda soca.

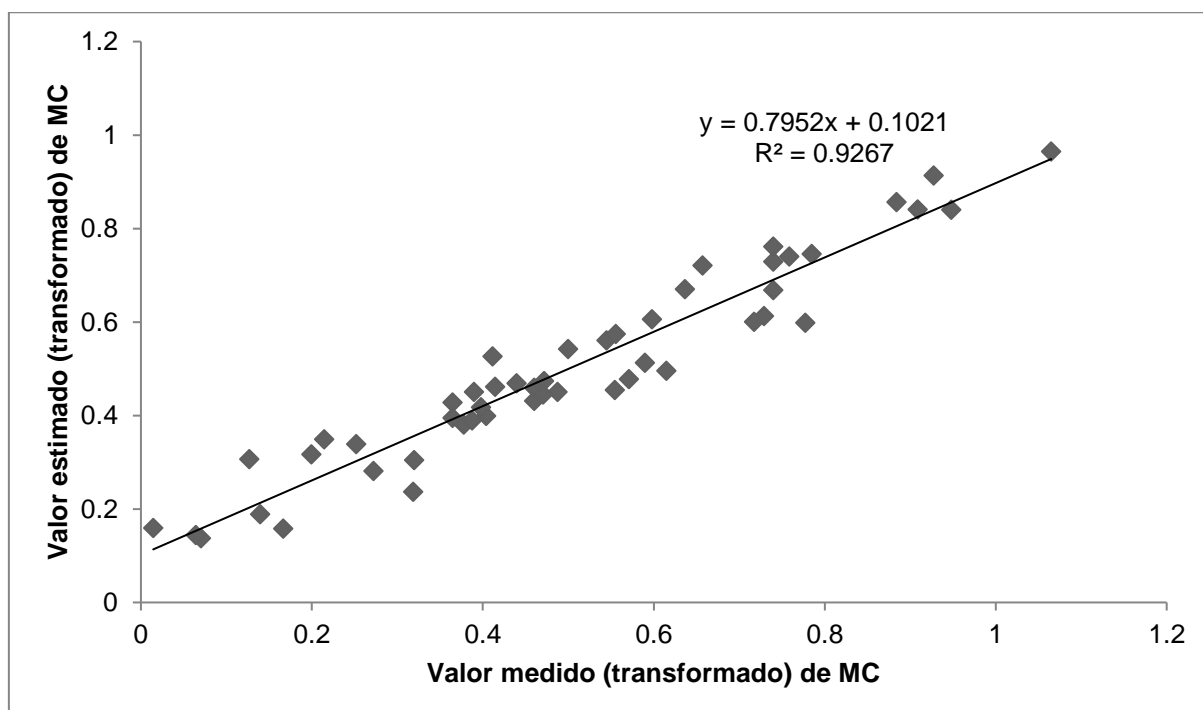


Figura 58 - Regressão linear entre os valores transformados observados e estimados de massa do colmo (MC) para o modelo de estimativa de MC considerando só a Pt como variável preditora no espaçamento LS em ciclo de segunda soca.

Nota-se que houve um menor coeficiente de determinação da equação de regressão em comparação com aquele obtido quando se estimou os valores de MC pela equação em que se considera as variáveis HC e Pt como preditoras e quando só se considera HC como variável preditora. Desta forma, a variável HC, quando utilizada como preditora no modelo autorregressivo de espaço de estados para estimar a variável MC, confere melhor qualidade aos modelos, gerando maior acurácia na estimativa. Essa maior contribuição da HC em relação a Pt na qualidade do modelo, pode estar associada a natureza da variável, que por ser um componente de massa do colmo, pois tem uma relação direta com a variável predita, descrevendo melhor o fenômeno. Embora pequena a contribuição da Pt em explicar as variações da MC no espaçamento LS em ciclo de segunda soca, o fato de ter se correlacionado espacialmente já infere em uma influencia deste atributo na produtividade da cana-de-açúcar o que não foi observado no espaçamento LD para esse mesmo ciclo. Este comportamento pode estar relacionado à maiores restrições físicas presentes no espaçamento LS em comparação com o espaçamento LD, provavelmente associado ao tráfego de máquinas.

A equação 17 apresenta o resultado da modelagem pela aplicação do modelo autorregressivo de espaço de estados considerando os sólidos solúveis totais do caldo da cana-de-açúcar (Brix) como variável predita e o teor de argila como preditora. Nota-se que a maior contribuição na estimativa da variável Brix é por ela mesmo na posição  $i-1$ . Porém destaca-se uma contribuição de 27% do teor de argila na estimativa desta variável.

$$(\text{BRIX})_i = 0,7283 * (\text{BRIX})_{i-1} + 0,2719 * (\text{ARGILA})_{i-1} + u_{(\text{BRIX})_i} \quad \text{Equação 17}$$

Avaliando a qualidade do modelo, observa-se na Fig. 59 uma proximidade dos valores observados e estimados na dispersão dos dados ao longo da transeção. Destaca-se ainda que a maioria dos valores observados ficaram dentro dos limites da 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  $i$ .

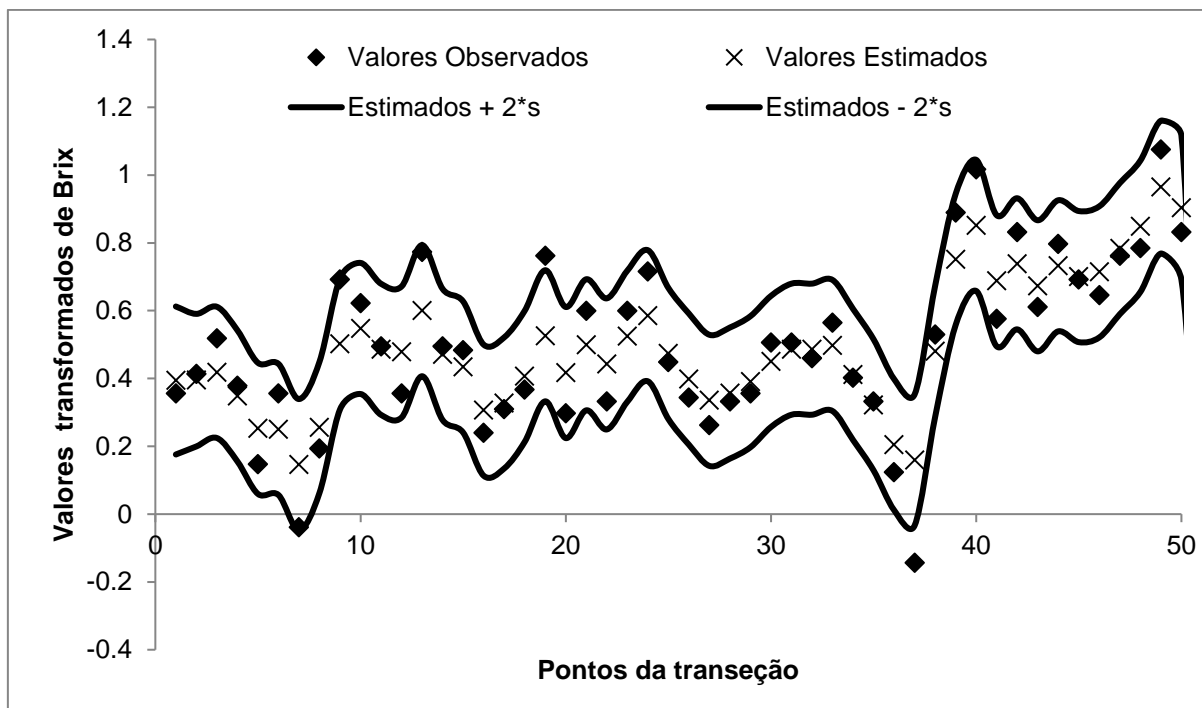


Figura 59 - Análise de espaço de estados aplicada a variável Sólidos solúveis totais (Brix) na posição  $i$  em função do teor de argila na posição  $i-1$ , no espaçamento LT em ciclo de segunda soca.

Outro índice de avaliação da qualidade do modelo é o coeficiente de determinação da análise de regressão entre os valores observados e estimados pela equação de estado. Nota-se na Fig. 60 que o valor do coeficiente de determinação foi de 0,8589, inferindo em uma boa acurácia do modelo na estimativa da variável Brix pelo teor de argila. Os principais componentes dos sólidos solúveis totais do caldo da cana-de-açúcar são os açúcares, sendo entre eles o de maior presença a sacarose. 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. Porém, encontrou-se uma contribuição positiva de 27% do teor de argila na estimativa do Brix, inferindo que a característica do solo pode influenciar nessa qualidade tecnológica da cana. Essa contribuição da argila no Brix pode estar associada a questão da adubação, onde a maior quantidade de argila pode gerar uma melhor eficiência da adubação, com menor lixiviação dos nutrientes e melhor disponibilidade para as plantas. Santos et al. (2010) encontrou um aumento significativo do Brix com o incremento da adubação fosfatada, evidenciando a resposta do Brix à adubação.

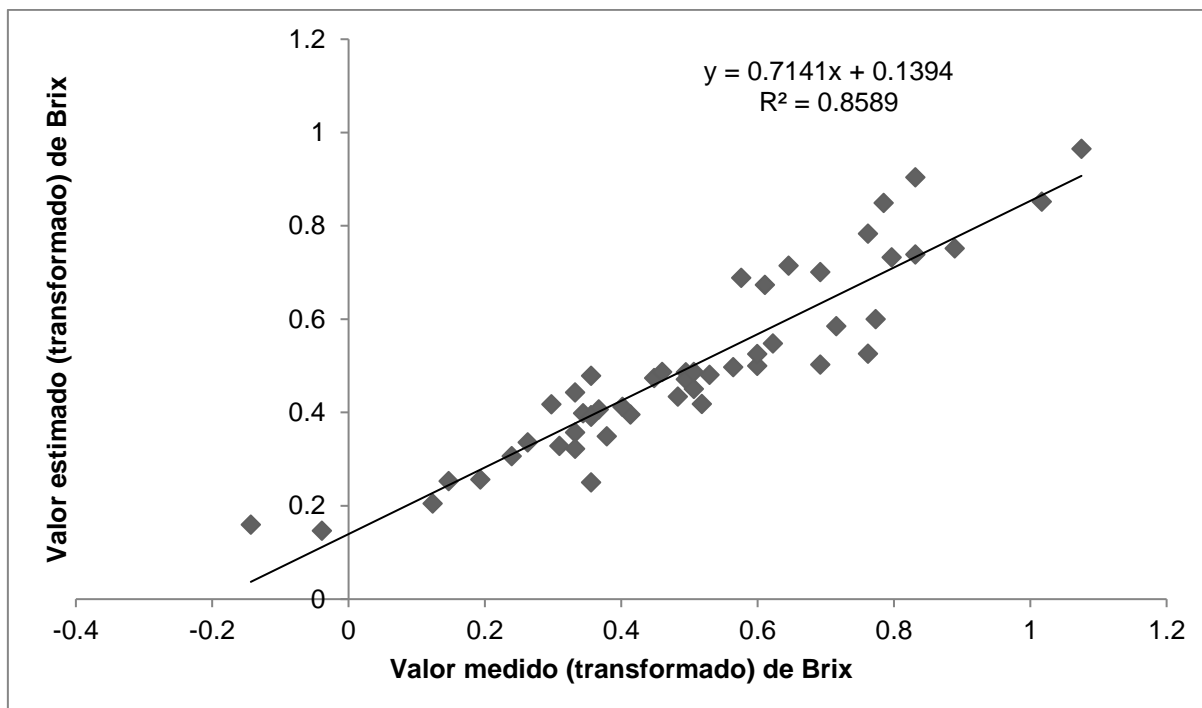


Figura 60 -Regressão linear entre os valores transformados observados e estimados de Sólidos solúveis totais (Brix) para o modelo de estimativa de Brix considerando a argila como variável preditora no espaçamento LT em ciclo de segunda soca.

No espaçamento LT, outra variável que foi considerada como predita e estimada pelo modelo autorregressivo de espaço de estados é o número de colmos por metro quadrado ( $NCM^2$ ). Esta variável se correlacionou espacialmente com outras variáveis, sendo elas: teor de argila (Argila), resistência a penetração (RP), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi) e conteúdo de água a base de volume na capacidade de campo ( $\Theta_{cc}$ ). Assim, foi confeccionado o modelo utilizando a  $NCM^2$  como variável predita e todas as outras variáveis que se correlacionaram espacialmente como predictoras, sendo apresentado na equação 18. Nota-se que as maiores contribuições na estimativa do  $NCM^2$  são pelas variáveis Ma e  $\Theta_{cc}$ .

$$\begin{aligned} (NCM^2)_i = & 0,0086*(NCM^2)_{i-1} - 0,2845*(ARGILA)_{i-1} + \\ & 0,1173*(RP)_{i-1} + 0,8313*(Ma)_{i-1} - 0,3725*(Mi)_{i-1} + \\ & 0,6835*(\Theta_{cc})_{i-1} + u_{(NCM^2)_i} \end{aligned} \quad \text{Equação 18}$$

Na avaliação da qualidade do modelo, percebe-se na dispersão dos valores observados e estimados ao longo da transeção uma proximidade entre eles em cada ponto, sendo praticamente todos os valores encontrados dentro da faixa dos limites de confiança calculados para cada estimativa, com exceção apenas do valor

observado no ponto 1, o qual teve o maior desvio entre o valor observado e o valor estimado (Fig. 61).

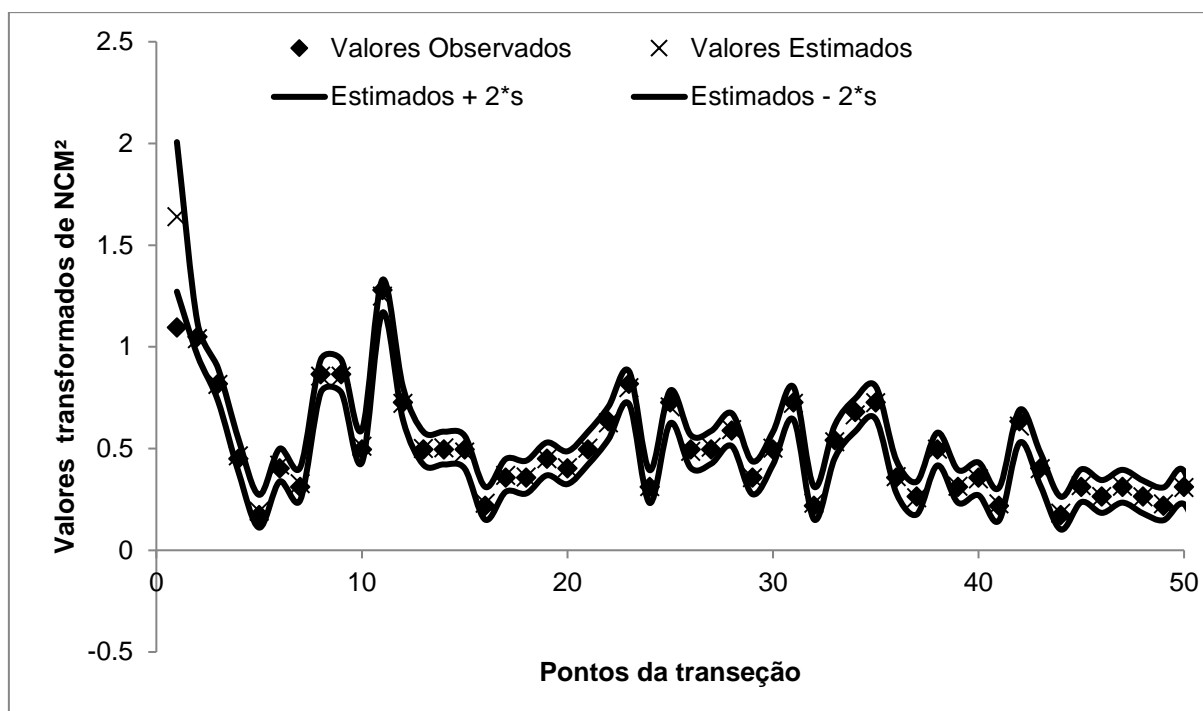


Figura 61 - Análise de espaço de estados aplicada a variável número de colmos por metro quadrado ( $NCM^2$ ) na posição  $i$  em função do teor de argila (Argila), resistência a penetração (RP), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi) e conteúdo de água a base de volume na capacidade de campo ( $\theta_{CC}$ ) na posição  $i-1$ , no espaçamento LT em ciclo de segunda soca.

Observando a Fig. 62, que apresenta a análise de regressão entre o valor observado e o valor estimado pelo modelo para cada ponto ao longo da transeção, nota-se um coeficiente de regressão alto, superior a 0,9, inferindo em uma acurácia na estimativa do  $NCM^2$  a partir do modelo autorregressivo de espaço de estados considerando as variáveis Argila, RP, Ma, Mi e  $\theta_{CC}$  como predictoras.

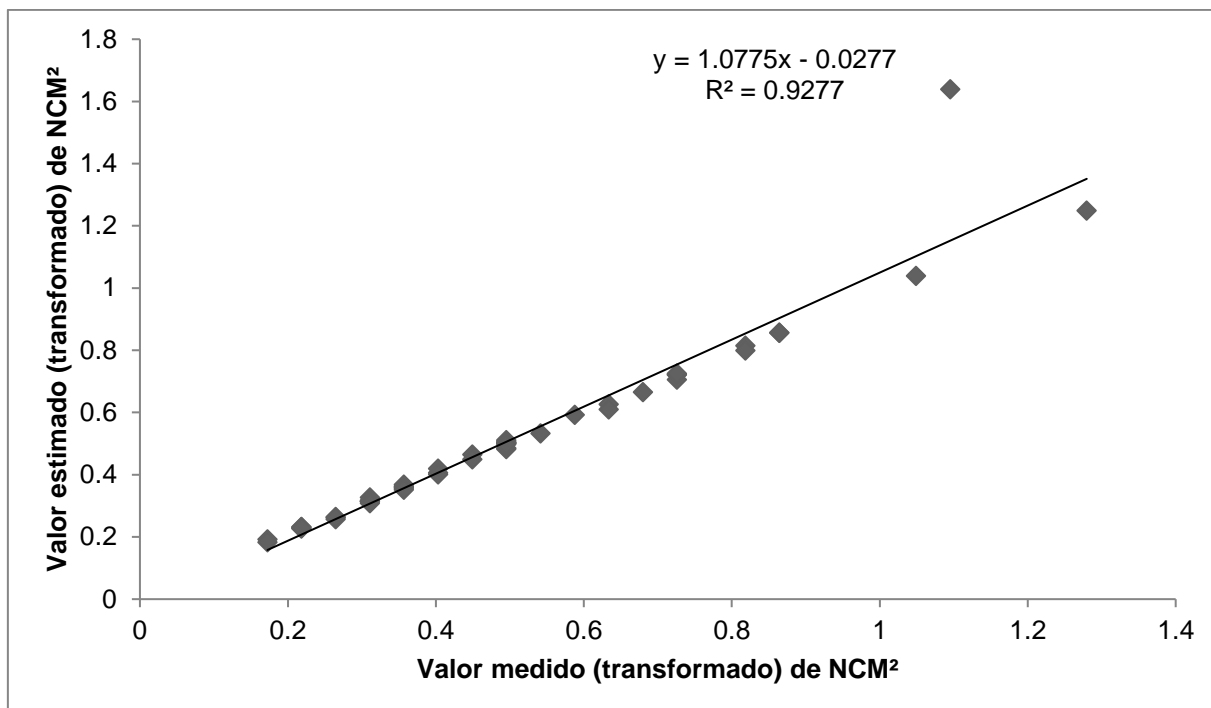


Figura 62 - Regressão linear entre os valores transformados observados e estimados de número de colmos por metro quadrado (NCM<sup>2</sup>) para o modelo de estimativa de NCM<sup>2</sup> considerando o teor de argila (Argila), a resistência a penetração (RP), a macroporosidade (Ma), a microporosidade (Mi) e o conteúdo de água a base de volume na capacidade de campo ( $\Theta_{CC}$ ) como variáveis preditoras no espaçamento LT em ciclo de segunda soca.

Para avaliação das contribuições individuais das variáveis preditoras na estimativa do NCM<sup>2</sup> no espaçamento LT em ciclo de segunda soca e também para verificar a qualidade da estimativa do NCM<sup>2</sup> a partir de modelos construídos para cada variável preditora, foi confeccionado o modelo autorregressivo de espaço de estados com apenas cada uma das variáveis preditoras.

A equação 19 apresenta o modelo autorregressivo de espaço de estados considerando a argila como variável preditora. Nota-se que a contribuição desta variável na estimativa da NCM<sup>2</sup> foi baixa, inferior a 10%, sendo a maior contribuição associada a variável NCM<sup>2</sup> na posição  $i-1$ . Desta forma, infere-se que essa característica do solo possui pouca influência sobre o componente de produção NCM<sup>2</sup>, sendo as principais variações obtidas dessa variável associadas a outros fatores. Demattê (1986), cita que a textura do solo pode levar a potenciais produtivos distintos. Porém, os efeitos da textura do solo podem ser mais pronunciados sobre outros componentes de produção da cana-de-açúcar em comparação com o NCM<sup>2</sup>.



$$(\text{NCM}^2)_i = 0,8608 * (\text{NCM}^2)_{i-1} + 0,0923 * (\text{ARGILA})_{i-1} + u_{(\text{NCM}^2)_i}$$

Equação 19

Observando a dispersão dos valores observados e estimados pelo modelo autorregressivo de espaço de estados (Fig. 63), nota-se maiores desvios entre esses valores, representados pela maior faixa dos limites de confiança calculados para cada estimativa e pela presença de valores fora dessa faixa.

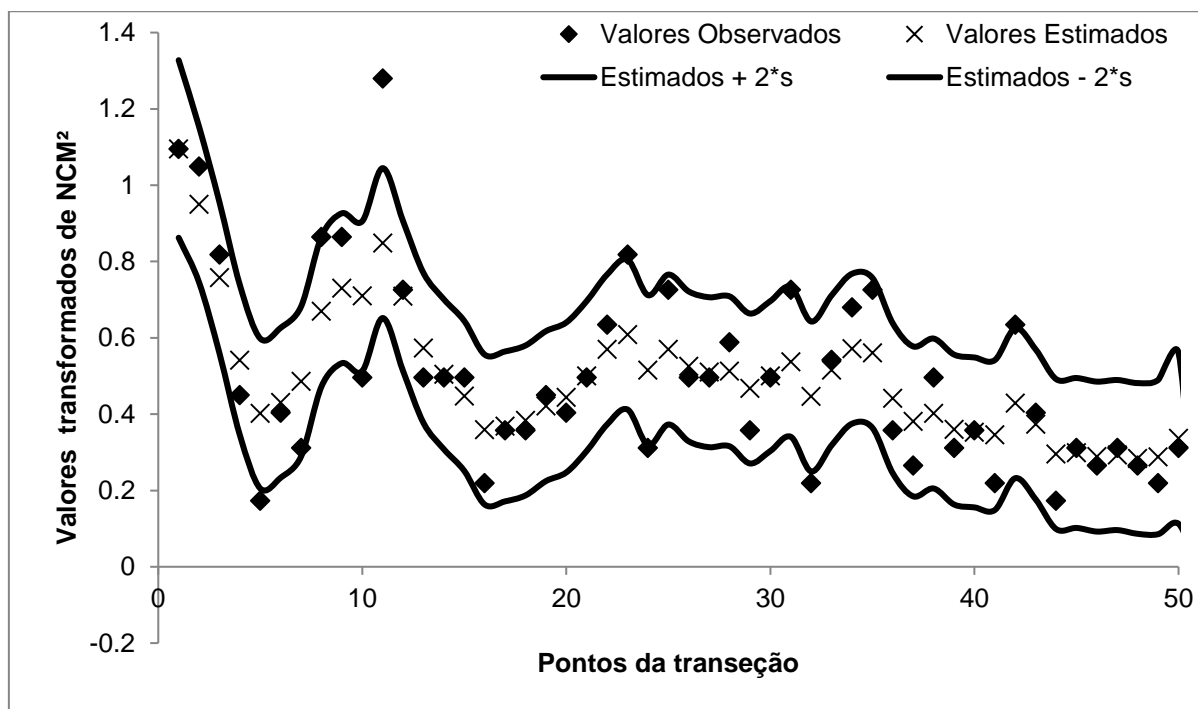


Figura 63 - Análise de espaço de estados aplicada a variável número de colmos por metro quadrado ( $\text{NCM}^2$ ) na posição  $i$  em função do teor de argila (Argila), na posição  $i-1$ , no espaçamento LT em ciclo de segunda soca.

A menor eficiência do modelo composto só pela variável argila como preditora na estimativa do  $\text{NCM}^2$  em comparação com o modelo apresentado na equação 18, fica evidenciada pelo coeficiente de determinação da análise de regressão entre os valores transformados observados e os valores transformados medidos em cada ponto ao longo da transeção (Fig. 64). Observa-se na Fig. 64 uma maior dispersão dos valores na representação gráfica, o que culminou em um coeficiente de determinação de 0,7776.

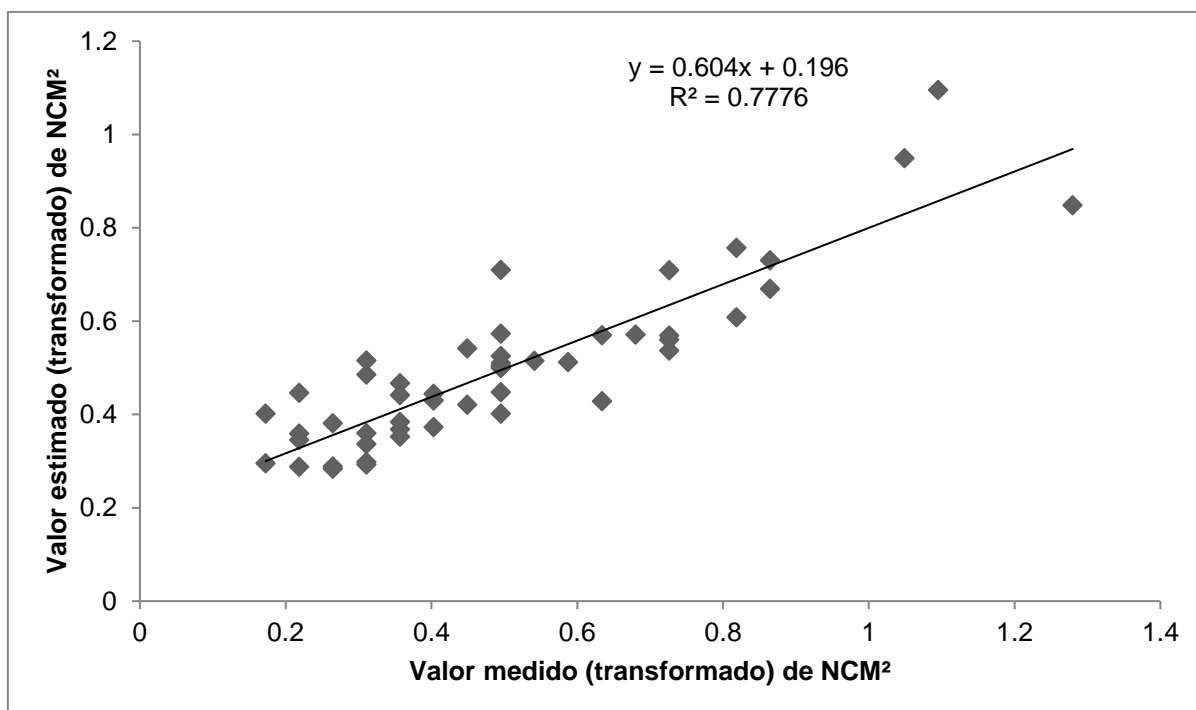


Figura 64 - Regressão linear entre os valores transformados observados e estimados de número de colmos por metro quadrado (NCM<sup>2</sup>) para o modelo de estimativa de NCM<sup>2</sup> considerando o teor de argila Argila como variável preditora no espaçamento LT em ciclo de segunda soca.

Considerando somente a resistência a penetração como variável preditora na estimativa do NCM<sup>2</sup> pelo modelo autorregressivo de espaço de estados, percebe-se na equação 20 uma contribuição de 11%, semelhante à da variável argila (equação 19). A maior contribuição da variação do NCM<sup>2</sup> foi por ela mesma na posição  $i-1$ , com 84%. Desta forma, infere-se em uma pequena influência da RP, ainda que existente, sobre o componente de produção NCM<sup>2</sup>. O coeficiente de espaço de estados para a variável RP foi positivo, mostrando que há uma contribuição positiva deste atributo sobre o NCM<sup>2</sup>. Essa contribuição positiva pode estar associada a um efeito mascarado do teor de argila sobre a RP, pois em locais onde há maior teor de argila pode haver maior RP. Com o incremento desta partícula do solo há o aumento das forças de coesão, que aumentam a RP. Sendo que como discutido anteriormente, o teor argila pode influenciar no NCM<sup>2</sup>, justificando essa contribuição positiva da RP sobre o NCM<sup>2</sup> ao longo da transeção.

$$(\text{NCM}^2)_i = 0,8416 * (\text{NCM}^2)_{i-1} + 0,1108 * (\text{RP})_{i-1} + u_{(\text{NCM}^2)_i}$$

Equação 20

Na avaliação da qualidade do modelo composto somente pela RP como variável preditora, percebe-se desvios entre os valores observados e estimados ao longo da transeção, representado na Fig. 65. Contudo, são poucos valores que se encontram fora da faixa do limite de confiança.

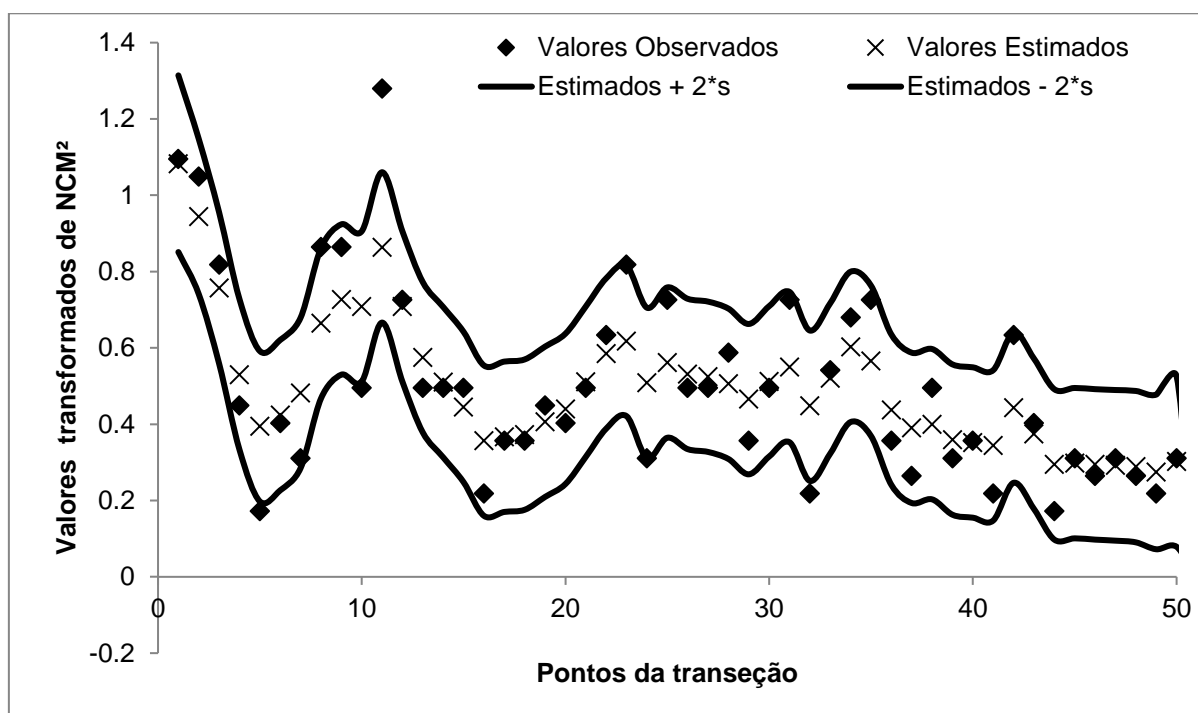


Figura 65 - Análise de espaço de estados aplicada a variável número de colmos por metro quadrado ( $\text{NCM}^2$ ) na posição  $i$  em função da resistência à penetração (RP), na posição  $i-1$ , no espaçamento LT em ciclo de segunda soca.

Considerando a análise de regressão entre os valores observados e estimados pela equação 20, observa-se uma dispersão dos valores que conferiram um coeficiente de determinação de 0,7907. Comparando os coeficientes de determinação da análise de regressão entre os valores observados e estimados pelos modelos em que as variáveis preditoras são argila e RP, nota-se uma melhor acurácia na estimativa do  $\text{NCM}^2$  pelo modelo composto com a RP, embora seja uma diferença ligeiramente maior.

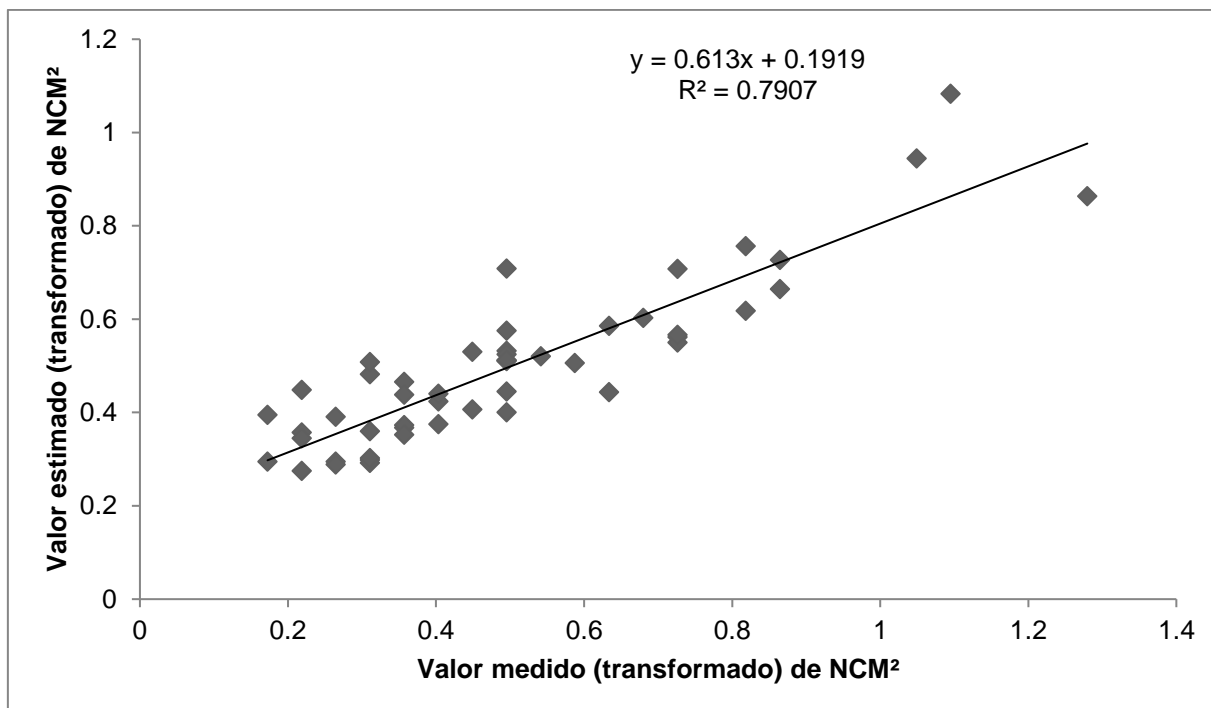


Figura 66 - Regressão linear entre os valores transformados observados e estimados de número de colmos por metro quadrado (NCM<sup>2</sup>) para o modelo de estimativa de NCM<sup>2</sup> considerando a resistência à penetração como variável preditora no espaçamento LT em ciclo de segunda soca.

Na equação 21 é apresentado o modelo autorregressivo de espaço de estados para estimar o NCM<sup>2</sup> considerando a  $Ma$  como variável preditora. Percebe-se uma contribuição de 47,6% da  $Ma$  na variabilidade espacial do NCM<sup>2</sup> ao longo da transeção. Essa contribuição pode estar associada aos benefícios dos maiores valores de macroporosidade no desenvolvimento dos perfilhos de cana-de-açúcar. Fagundes et al. (2014) observou a redução do número de perfilhos de uma variedade de cana-de-açúcar com o aumento dos níveis de compactação do solo, cujo fenômeno foi descrito por equação linear de regressão. Com o aumento da macroporosidade há o favorecimento da aeração e drenagem do solo, o que pode ter influenciado no aumento do NCM<sup>2</sup> e ter resultado na contribuição de 47,6% da variabilidade espacial deste componente de produção da cana-de-açúcar ao longo da transeção no espaçamento LT em ciclo de segunda soca. Essa contribuição elevada da  $Ma$  na variabilidade do NCM<sup>2</sup> no espaçamento LT em ciclo de segunda pode estar associado a maiores restrições físicas deste espaçamento em relação aos espaçamentos LS e LD, provavelmente associada a degradação da qualidade física do solo pelo tráfego de máquinas após dois eventos de colheita mecanizada.

$$(\text{NCM}^2)_i = 0,4644 * (\text{NCM}^2)_{i-1} + 0,4765 * (\text{Ma})_{i-1} + u_{(\text{NCM}^2)_i}$$

Equação 21

As Fig. 67 e 68 apresentam informações sobre a qualidade do modelo. Observa-se na Fig. 67 alguns valores fora da faixa do limite de confiança e desvios dos valores estimados em relação aos valores observados. Essa menor acurácia do modelo fica ainda mais evidente na avaliação do coeficiente de determinação da análise de regressão entre os valores observado e estimado, cujo valor foi de 0,69 (Fig. 68). Essa menor acurácia do modelo com a variável Ma como preditora em comparação com os outros modelos para estimar  $\text{NCM}^2$  pode estar associado a natureza da variável Ma, que apresenta elevada variabilidade espacial.

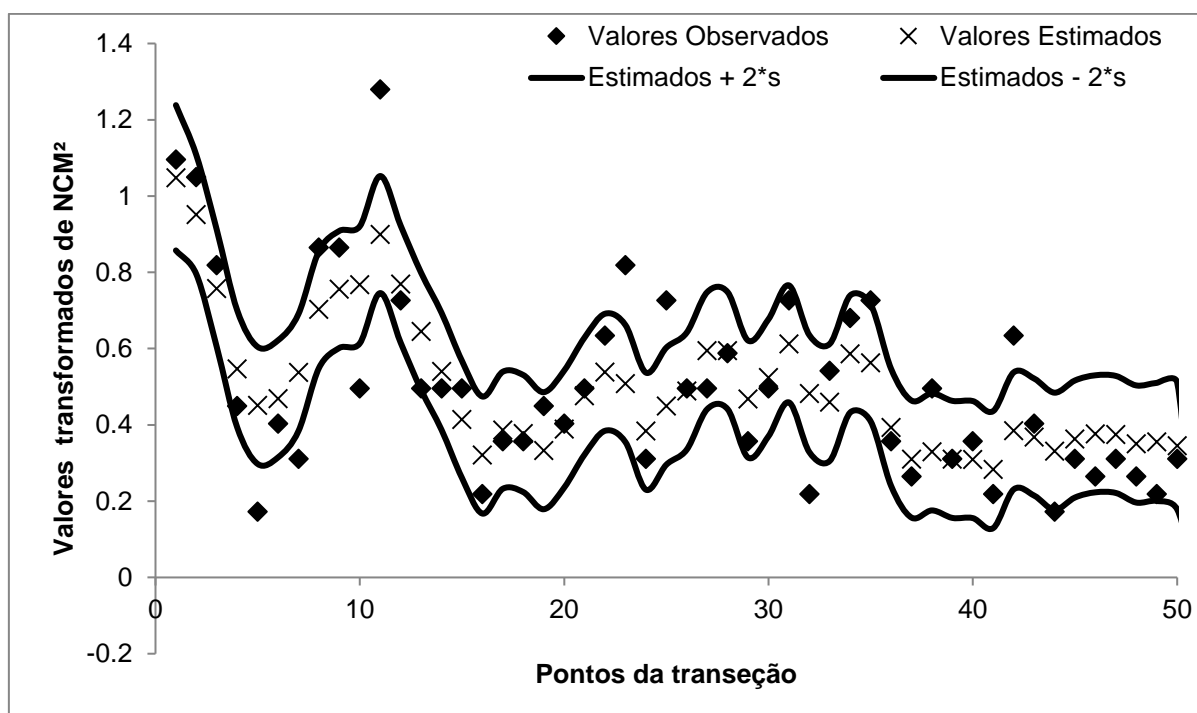


Figura 67 - Análise de espaço de estados aplicada a variável número de colmos por metro quadrado ( $\text{NCM}^2$ ) na posição  $i$  em função da macroporosidade (Ma), na posição  $i-1$ , no espaçamento LT em ciclo de segunda soca.

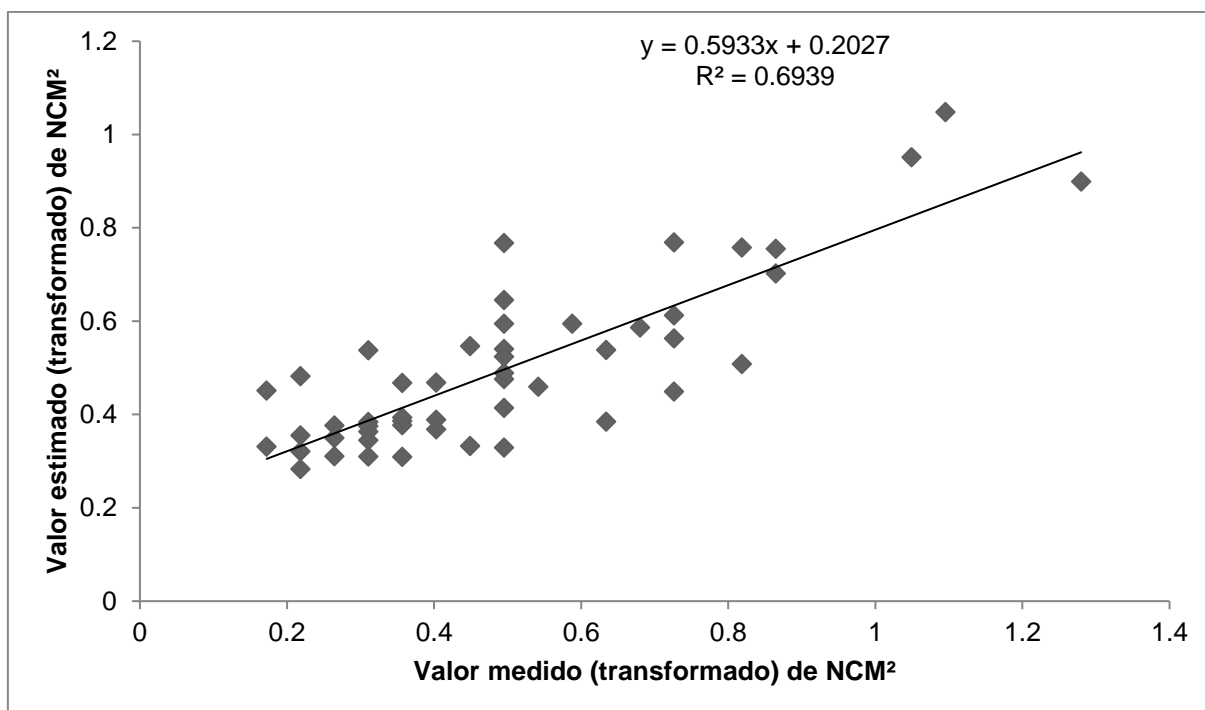


Figura 68 - Regressão linear entre os valores transformados observados e estimados de número de colmos por metro quadrado (NCM<sup>2</sup>) para o modelo de estimativa de NCM<sup>2</sup> considerando a macroporosidade como variável preditora no espaçamento LT em ciclo de segunda soca.

Utilizando a microporosidade e o conteúdo de água a base de volume na capacidade de campo como variáveis preditoras (Equação 22 e 23), observa-se uma contribuição semelhante dessas variáveis na variabilidade espacial do NCM<sup>2</sup> ao longo da transeção. A  $M_i$  contribui com 13,4% na explicação da variabilidade espacial do NCM<sup>2</sup> e a  $\theta_{cc}$  contribui com 15,9%. As maiores contribuições foram da própria variável na posição  $i-1$ , com aproximadamente 80%. Este comportamento semelhante entre as variáveis  $M_i$  e  $\theta_{cc}$  na relação com NCM<sup>2</sup> está relacionado com a natureza dessas variáveis, que por estarem relacionadas com a retenção e disponibilidade de água as plantas influenciam da mesma forma este componente de produção da cana-de-açúcar.

$$(\text{NCM}^2)_i = 0,8230 * (\text{NCM}^2)_{i-1} + 0,1341 * (M_i)_{i-1} + u(\text{NCM}^2)_i \quad \text{Equação 22}$$

$$(\text{NCM}^2)_i = 0,8021 * (\text{NCM}^2)_{i-1} + 0,1591 * (\theta_{cc})_{i-1} + u(\text{NCM}^2)_i \quad \text{Equação 23}$$

Quanto à qualidade dos modelos, ambos apresentaram precisão semelhante na estimativa do NCM<sup>2</sup> (Fig. 69 e 70). Percebe-se nas Fig. 69 e 70 que a maioria dos

valores compreenderam a faixa do limite de confiança, com alguns desvios entre o valor observado e o estimado.

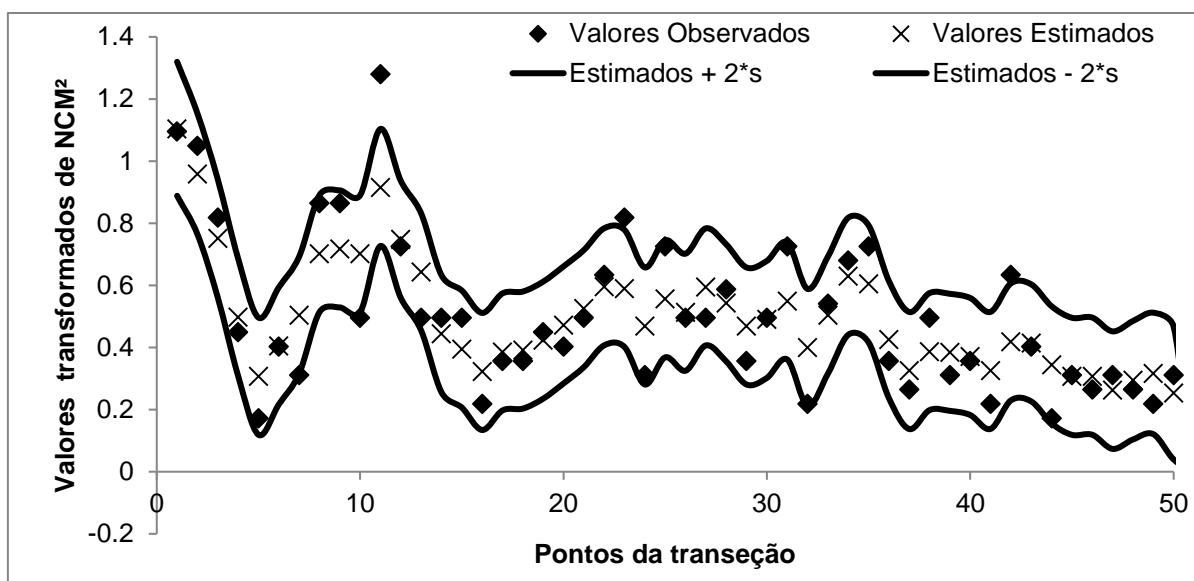


Figura 69 - Análise de espaço de estados aplicada a variável número de colmos por metro quadrado (NCM<sup>2</sup>) na posição  $i$  em função da microporosidade ( $M_i$ ), na posição  $i-1$ , no espaçamento LT em ciclo de segunda soca.

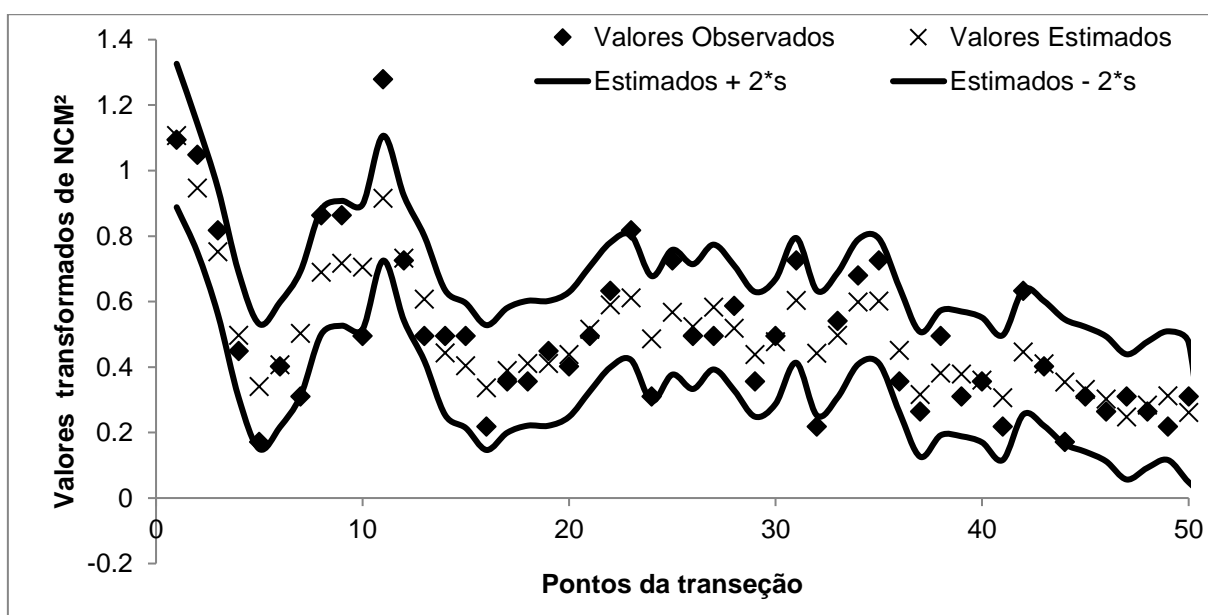


Figura 70 - Análise de espaço de estados aplicada a variável número de colmos por metro quadrado (NCM<sup>2</sup>) na posição  $i$  em função do conteúdo de água a base de volume na capacidade de campo ( $\theta_{cc}$ ), na posição  $i-1$ , no espaçamento LT em ciclo de segunda soca.

Considerando o coeficiente de determinação da análise de regressão entre os valores observados e os valores estimados como parâmetro para inferir sobre a qualidade do modelo, nota-se nas Fig. 71 e 72 que o valor foi de 0,8 para os dois

modelos considerados para estimar o NCM<sup>2</sup>. Desta forma, os dois modelos apresentam boa acurácia em prever os valores de NCM<sup>2</sup> ao longo da transeção no espaçamento LT em ciclo de segunda soca.

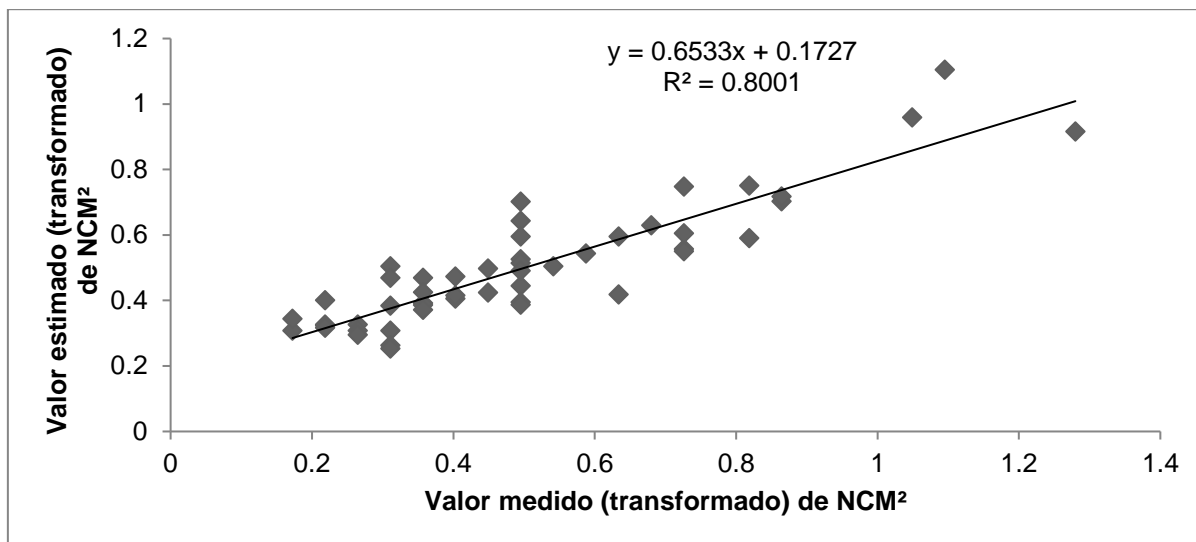


Figura 71 - Regressão linear entre os valores transformados observados e estimados de número de colmos por metro quadrado (NCM<sup>2</sup>) para o modelo de estimativa de NCM<sup>2</sup> considerando a microporosidade como variável preditora no espaçamento LT em ciclo de segunda soca.

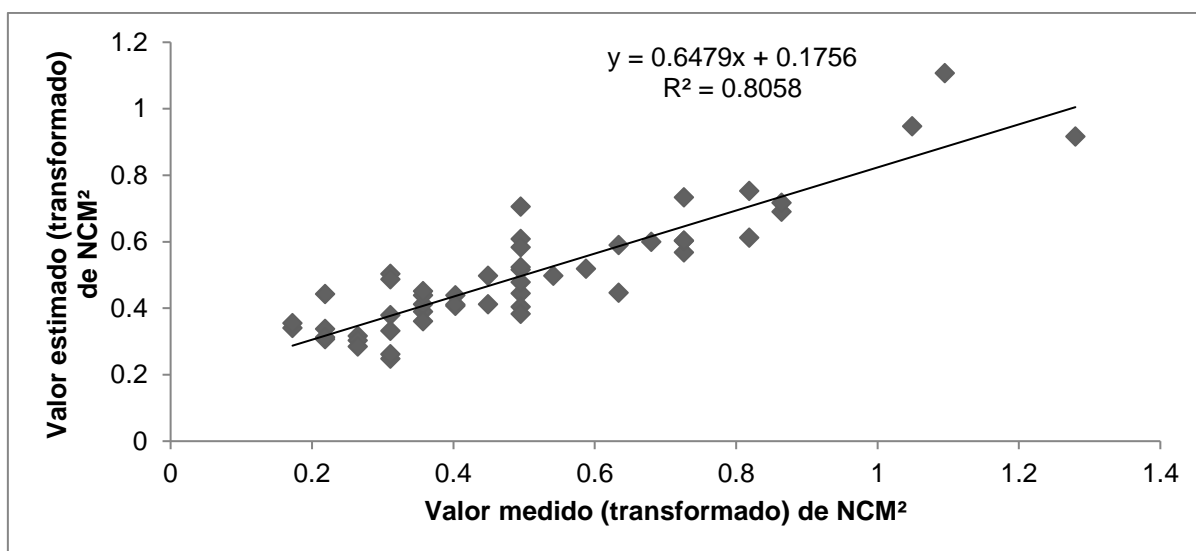


Figura 72 - Regressão linear entre os valores transformados observados e estimados de número de colmos por metro quadrado (NCM<sup>2</sup>) para o modelo de estimativa de NCM<sup>2</sup> considerando a  $\Theta$ CC como variável preditora no espaçamento LT em ciclo de segunda soca.

Desta forma, na avaliação dos modelos de espaço de estado, os atributos físicos do solo explicaram de forma satisfatória a variabilidade espacial dos componentes de produção da cana-de-açúcar nos espaçamentos entrelinhas



simples e tripla em ciclo de segunda soca. Já em ciclo de cana de primeira soca nos três espaçamentos entrelinhas a variabilidade dos componentes de produção da cana-de-açúcar não foi explicada pelos atributos físicos do solo. Com esses resultados, pode-se inferir que há uma tendência de a produtividade da cana-de-açúcar ser influenciada pelas condições físicas do solo a medida que se aumenta os ciclos de cultivo. Essa influência diferente em cada tipo de espaçamento entre linhas, é devido, principalmente, à qualidade física do solo em cada espaçamento e às características intrínsecas do solo na área onde encontram-se instalados os espaçamentos, como a textura.

## **6.2 Estudo 2: Distribuição espacial da compactação de um Latossolo sob dois espaçamentos entrelinhas**

### **6.2.1 Análise exploratória**

A tabela 11 apresenta o resultado da análise estatística descritiva das variáveis físicas do solo avaliadas em dois tipos de espaçamentos entrelinhas (Espaçamento simples – 1,5 m entre as linhas; Espaçamento combinado duplo – 0,4X1,5m). Observando a média dos atributos físicos do solo  $D_s$ ,  $\Theta_{cc}$  e  $P_t$ , nota-se que o espaçamento linha simples (LS) apresentou qualidade física do solo significativamente inferior na comparação com LD, pois obteve maior valor de densidade do solo ( $D_s$ ) e menor valor de porosidade total e conteúdo de água a base de volume na capacidade de campo ( $\Theta_{cc}$ ). Quanto aos atributos RP, Ma e Mi, não houve diferença significativa, porém uma tendência de menor valor de RP e maiores valores de Ma e Mi no espaçamento LD em comparação com LS. Souza (2016) avaliando dois espaçamentos (Simples – 1,5m e duplo – 0,9x1,5) em ciclo de cana soca não observou diferença entre os espaçamentos para os atributos físicos  $P_t$ , Ma, Mi,  $D_s$  e RP. Já Braunak e McGarry (2006) obtiveram menores valores de densidade e resistência mecânica à penetração na configuração do espaçamento entre linhas duplo (0,3 X 1,8m) comparado com o simples (1,5m). Destaca-se que as avaliações foram realizadas em ciclo de segunda soca, onde há o acúmulo de pressões de dois eventos de colheita mecanizada. 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  $1,40 \text{ Mg m}^{-3}$ , bem semelhante ao

encontrado no presente estudo. Quanto as médias da RP, se for considerado o valor crítico de 2,5 MPa (CAMARGO; ALLEONI, 1997) nota-se que no espaçamento LS o valor de RP é superior ao limite considerado crítico e no espaçamento LD a média é ligeiramente menor que o valor crítico. Já as médias da Ma foram superiores a 0,10 m<sup>3</sup>m<sup>-3</sup>, preconizados por Baver et al. (1972) e Reichert et al. (2009) como valor crítico para solos de textura argilosa submetidos a cultivo agrícola.

Tabela 11 – Estatística descritiva das variáveis densidade do solo (Ds), resistência à penetração (RP), porosidade total (Pt), macro (Ma) e microporosidade (Mi) e conteúdo de água a base de volume na capacidade de campo ( $\theta_{cc}$ ) nos espaçamentos simples e duplo.

Variável	Esp. <sup>3</sup>	n	X <sup>1</sup>	Med. <sup>1</sup>	Min. <sup>1</sup>	Max. <sup>1</sup>	S <sup>1</sup>	CV (%) <sup>1</sup>	Ass. <sup>1</sup>	Cur. <sup>1</sup>	Distr. <sup>1</sup>	p <sup>2</sup>	
<b>Ds</b> (Mgm <sup>3</sup> )	LS	100	1,44	a <sup>4</sup>	1,46	1,13	1,72	0,1375	9,57	-0,1302	-0,5553	N	0,7594
	LD	100	1,40	b	1,41	0,96	1,77	0,1486	10,64	-0,0713	0,1172	N	0,9729
<b>RP</b> (MPa)	LS	100	2,68	a	2,36	0,53	7,42	1,4925	55,76	0,8228	0,1948	N	0,1684
	LD	100	2,49	a	2,17	0,50	9,88	1,5614	62,72	1,7348	4,7964	N	0,053
<b>Pt</b> (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	LS	100	0,5394	b	0,5332	0,4674	0,7007	0,0382	7,08	0,9737	2,2647	N	0,2790
	LD	100	0,5610	a	0,5524	0,4962	0,6770	0,0379	6,75	0,9834	0,9417	N	0,2227
<b>Ma</b> (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	LS	100	0,1274	a	0,1115	0,0389	0,2910	0,0539	42,34	0,8193	-0,040	NN	0,0087
	LD	100	0,1409	a	0,1224	0,0312	0,3478	0,0652	46,29	0,9428	0,7647	NN	0,0340
<b>Mi</b> (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	LS	100	0,4120	a	0,4172	0,3181	0,4808	0,0325	7,88	-0,5760	-0,0774	N	0,5096
	LD	100	0,4201	a	0,4215	0,3217	0,4855	0,0332	7,90	-0,4315	-0,1325	N	0,6029
<b><math>\theta_{cc}</math></b> (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	LS	100	0,3878	b	0,3918	0,2933	0,4539	0,0336	8,67	-0,3939	-0,2537	N	0,6392
	LD	100	0,4041	a	0,4058	0,2978	0,4757	0,0366	9,05	-0,3869	-0,3565	N	0,2421

<sup>1</sup>X – média; Med. – mediana; Min. - valor mínimo; Max. - valor máximo; s - desvio padrão; CV - coeficiente de variação; Ass. - coeficientes de assimetria; Cur. - Coeficiente de curtose; Distr. – Formato da curva da função de distribuição de probabilidade: N = Normal, NN = Não normal.

<sup>2</sup>p – 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 significância).

<sup>3</sup> LS - Espaçamento simples (1,5 m entre as linhas da cultura); LD - Espaçamento combinado duplo (0,4X1,5m).

<sup>4</sup> Médias seguidas pelas mesmas letras minúsculas na vertical não diferem estatisticamente entre si ao nível de 95 % de confiança pelo teste de comparação de médias de Tukey.

Observando os valores mínimos e máximos dos atributos físicos do solo, observa-se que para as variáveis Ds, RP, Ma e  $\theta_{cc}$  a amplitude dos valores foi maior no espaçamento LD. Esse comportamento pode estar associado as duas regiões que são criadas quando se utiliza o espaçamento duplo: zona de crescimento radicular e uma zona de tráfego de máquinas. Desta forma, na zona de tráfego de máquinas pode haver elevados valores de Ds e RP e baixos valores de Ma e  $\theta_{cc}$  e na zona de crescimento radicular há baixos valores de Ds e RP e altos valores de Ma e  $\theta_{cc}$ , gerando a maior amplitude em comparação com o espaçamento LS, que não apresenta controle de tráfego.

Quanto ao coeficiente de variação dos atributos físicos do solo, utilizou-se a classificação proposta por Wilding e Dress (1983), sendo  $CV < 15\%$  de baixa variabilidade,  $15\% \leq CV < 35\%$  média variabilidade e  $CV \geq 35\%$  alta variabilidade. Os atributos Ds, Pt, Mi e  $\Theta_{cc}$  apresentaram baixa variabilidade de acordo com a classificação dos seus coeficientes de variação. Já a RP e a Ma apresentaram alta variabilidade por terem CV superior a 35%. A elevada variabilidade dos atributos RP e Ma também foi constatada por Souza et al. (2010) em área de Latossolo vermelho sob cultivo de cana-de-açúcar, sendo da natureza dessas duas variáveis a elevada variabilidade espacial.

Avaliando o coeficiente de assimetria dos atributos Ds, Mi e  $\Theta_{cc}$  nos dois espaçamentos, nota-se na tabela 11 que os valores foram negativos, indicando que a cauda da curva de distribuição de probabilidade acumulada é maior do lado esquerdo que do lado direito. Com relação ao coeficiente de curtose, para as variáveis Mi e  $\theta_{cc}$  nos dois espaçamentos e para a Ds no espaçamento LS os valores foram negativos, permitindo classificar a curva de distribuição em platicúrtica. Para a Ds no espaçamento LD o coeficiente de curtose foi positivo sendo o formato da curva de distribuição de probabilidade classificado em leptocúrtica. Embora apresentando uma assimetria da curva de distribuição em relação a curva de distribuição normal, as três variáveis nos dois espaçamentos apresentaram normalidade dos dados, conforme indica o teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov a 5% de probabilidade.

Observando os coeficientes de assimetria e curtose para as variáveis RP e Pt nos dois espaçamentos, nota-se que os valores foram positivos, indicando um deslocamento da curva de distribuição de probabilidade para a esquerda e uma cauda maior para o lado direito. Nota-se ainda, pelo sinal do coeficiente de curtose que a curva é classificada como platicúrtica, a qual apresenta um achatamento em relação a curva de distribuição normal. Mesmo apresentando essa pequena assimetria, os dados foram considerados normais pelo teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov a 5% de probabilidade. Já a variável Ma nos espaçamentos LS e LD apresentou um formato da curva de distribuição de probabilidade assimétrico, dessemelhante do formato de distribuição normal, sendo rejeitada a hipótese de normalidade dos dados pelo teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov a 5% de probabilidade.

Embora a suposição de normalidade seja necessária para as análises estatísticas, não será realizado nenhum tratamento nos valores da variável  $M_a$ , a qual não apresentou distribuição normal pelo teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov a 5% de probabilidade. A relação entre normalidade e o tamanho amostral está baseada no teorema do limite central. Este teorema prova que a distribuição de probabilidade tende ao padrão normal conforme o tamanho amostral aumenta. O número de observações para cada variável é de 100 ( $N=100$ ), sendo um tamanho amostral considerado adequado para inferir em uma proximidade da distribuição de probabilidade dos dados à normal.

### 6.2.2 Análise de dependência espacial

A variável densidade do solo ( $D_s$ ) apresentou dependência espacial no espaçamento LS e foi independente espacialmente no espaçamento LD, conforme pode ser observado nos semivariogramas apresentados na Fig. 73. O efeito pepita puro, observado no semivariograma da Fig. 73B, fica evidente com a distribuição das semivariâncias ao longo das defasagens  $h$ . Os valores se mantiveram constante com o incremento de  $h$ , sendo que deveriam aumentar, pois a semivariância é uma medida de dissimilaridade e conforme há o incremento da distância entre os pontos vizinhos, deveria ocorrer o aumento da semivariância entre eles até atingir um patamar onde a semivariância torna-se invariante. Desta forma, há a independência espacial das observações e o modelo do semivariograma não pode ser ajustado. O efeito pepita indica uma variabilidade não explicada, considerando a distância de amostragem utilizada (McBratney & Webster, 1986).

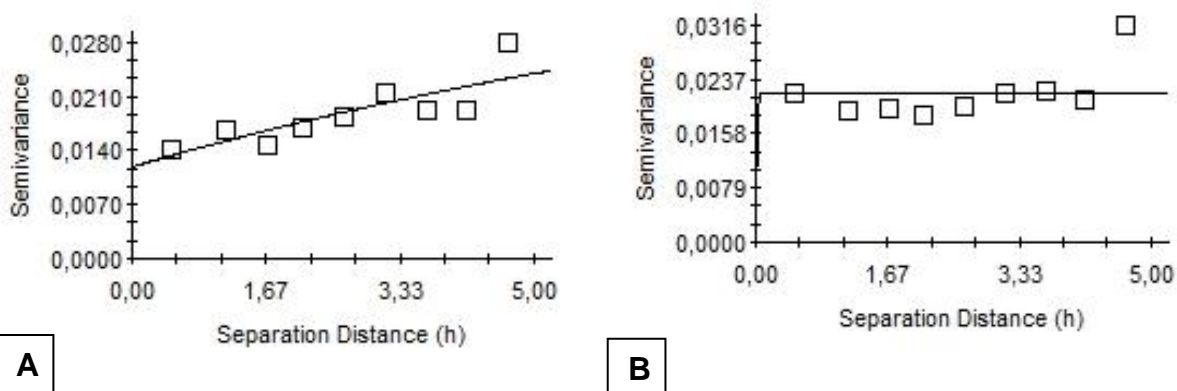


Figura 73 – Semivariograma da densidade do solo ( $D_s$ ) nos espaçamentos LS (A) e LD (B).

Nas variáveis RP, Mi, Pt,  $\theta_{cc}$  e Ma também só foi observada dependência espacial no espaçamento LS, sendo as observações de cada variável independentes espacialmente no espaçamento LD (Fig. 74, 75, 76, 77 e 78). Souza et al. (2004) também observou a presença de dependência espacial das variáveis Ds, Pt, Ma e Mi em áreas cultivadas com cana-de-açúcar no espaçamento convencional (1,5m). Quanto ao comportamento das variáveis no espaçamento LD, a independência amostral fica evidenciada pela presença do efeito pepita puro nos semivariogramas.

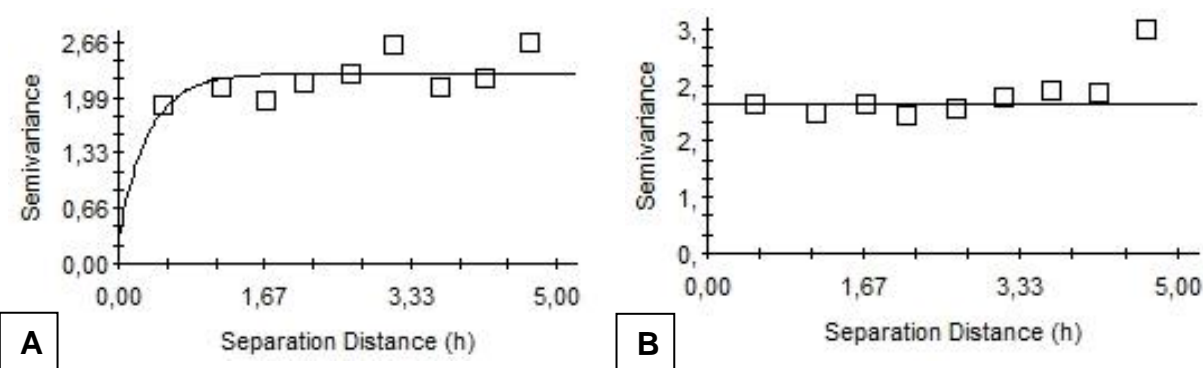


Figura 74 – Semivariograma da variável resistência à penetração (RP) nos espaçamentos LS (A) e LD (B).

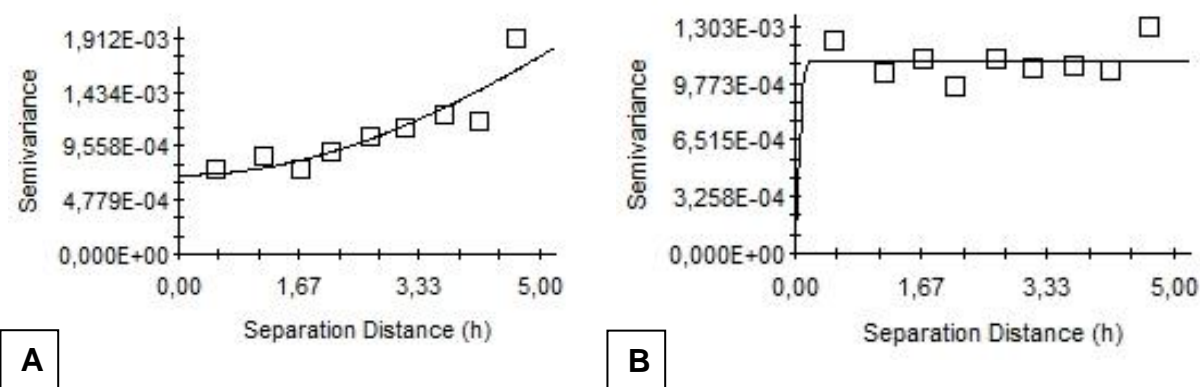
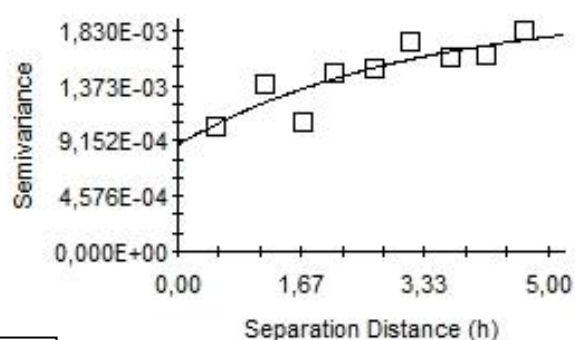
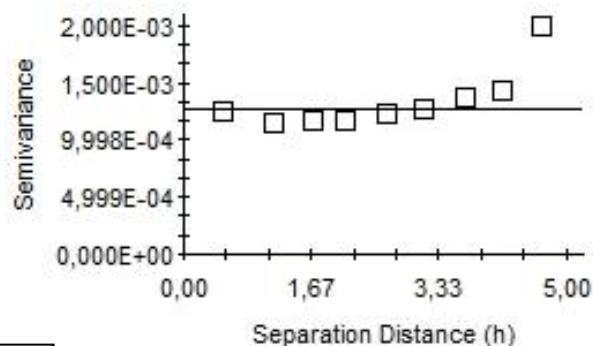


Figura 75 – Semivariograma da variável microporosidade (Mi) nos espaçamentos LS (A) e LD (B).

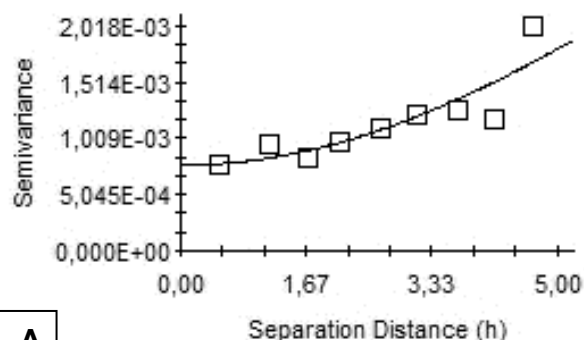


A

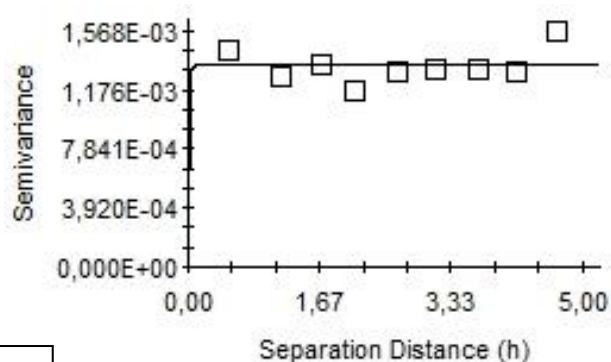


B

Figura 76 – Semivariograma da variável porosidade total (Pt) nos espaçamentos LS (A) e LD (B).

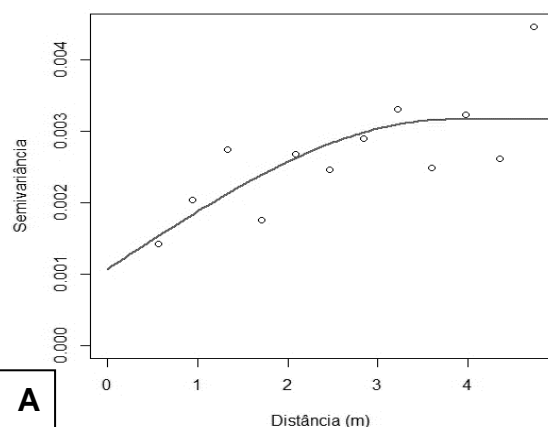


A

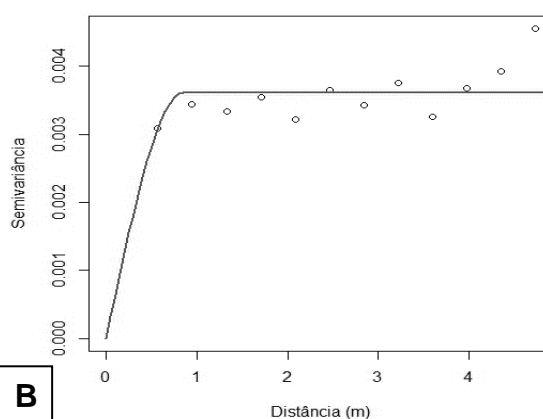


B

Figura 77 – Semivariograma da variável conteúdo de água a base de volume na capacidade de campo ( $\theta_{cc}$ ) nos espaçamentos LS (A) e LD (B).



A



B

Figura 78 – Semivariograma da variável macroporosidade (Ma) nos espaçamentos LS (A) e LD (B).

As diferenças na estrutura de dependência espacial entre os espaçamentos podem estar relacionadas com as características intrínsecas do solo da área onde cada tipo de espaçamento foram implantados, como a textura. Essas características provavelmente se sobressaíram em relação aos efeitos que os espaçamentos teriam

gerado na estrutura de dependência espacial dos atributos, culminando nessas diferenças.

A partir dos ajustes dos modelos aos semivariogramas experimentais, foram determinados os parâmetros dos modelos teóricos para cada variável nos dois espaçamentos entrelinhas, apresentados na Tabela 12. Observa-se que os parâmetros só foram obtidos para as variáveis que apresentaram dependência espacial (todos os atributos avaliados no espaçamento LS), pois somente assim pode-se ajustar o modelo teórico e obter os parâmetros. Destaca-se que para a variável  $Ma$ , o cálculo da semivariância foi realizado utilizando o estimador proposto por Cressie e Hawkins (1980), por ser mais robusto e apresentar menor influência de *outlier* na estimativa da semivariância em comparação com o estimador clássico (Matheron, 1962), visto que essa variável não apresentou distribuição normal de probabilidade dos dados normal.

Tabela 12 – Modelo teórico do semivariograma para os atributos físicos do solo nos dois espaçamentos entrelinhas e seus respectivos parâmetros estimados.

Variável	Esp.	Estimador da semivariância	Modelo	R <sup>2</sup>	SQR	Alcance (a)	Patamar (C0 + C)	Efeito pepita (C0)
Ds	LS	Matheron (1962)	Exponencial	0,682	4,45x10 <sup>-5</sup>	31,29	0,04360	0,01190
(Mgm <sup>3</sup> )	LD	Matheron (1962)	Efeito pepita puro	-	-	-	-	-
RP	LS	Matheron (1962)	Exponencial	0,261	0,414	1,02	2,28300	0,29300
(MPa)	LD	Matheron (1962)	Efeito pepita puro	-	-	-	-	-
Pt	LS	Matheron (1962)	Exponencial	0,764	1,41x10 <sup>-7</sup>	9,60	0,00201	0,00088
(m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	LD	Matheron (1962)	Efeito pepita puro	-	-	-	-	-
Ma	LS	Cressie e Hawkins (1980)	Esférico	0,23*	-	3,80	3,1 x10 <sup>-03</sup>	1,0 x10 <sup>-03</sup>
(m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	LD	Cressie e Hawkins (1980)	Efeito pepita puro	-	-	-	-	-
Mi	LS	Matheron (1962)	Gaussiano	0,820	1,81x10 <sup>-7</sup>	18,98	0,00629	0,00070
(m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	LD	Matheron (1962)	Efeito pepita puro	-	-	-	-	-
$\theta_{cc}$	LS	Matheron (1962)	Gaussiano	0,769	2,47x10 <sup>-7</sup>	18,45	0,00604	0,00077
(m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	LD	Matheron (1962)	Efeito pepita puro	-	-	-	-	-

\*Coeficiente de determinação dos ajustes.

Para analisar o grau de dependência espacial das variáveis em estudo, utilizou-se a classificação de Cambardella et al. (1994). São considerados de dependência espacial forte os semivariogramas com efeito pepita  $\leq 25\%$  do patamar, de dependência espacial moderada quando o efeito pepita está entre 25 e 75% e de dependência espacial fraca quando o efeito pepita é  $>75\%$ . Analisando os resultados dos parâmetros efeito pepita e patamar, apresentados na tabela 12, para as variáveis Ds, Pt e Ma no espaçamento LS, nota-se que essas variáveis apresentaram grau de dependência espacial classificado como moderado, devido ao efeito pepita ter correspondido à 27,29%, 43,78% e 32,25% do patamar, respectivamente. Quanto as variáveis RP, Mi e  $\theta_{CC}$ , essas apresentaram grau de dependência forte, com efeito pepita correspondendo a 12,83%, 11,12% e 12,74%, respectivamente.

O alcance é uma medida importante para o planejamento e avaliação experimental, já que pode auxiliar na definição de procedimentos de amostragem (McBratney & Webster, 1983). Este parâmetro representa a distância em que os pontos amostrais estão correlacionados entre si (Journel & Huijbregts, 1991). Observou-se que as variáveis Ds, Mi,  $\theta_{CC}$  e Pt apresentaram alcances maiores que os outros atributos, de 31 m, 19 m, 18 m e 9,6 m respectivamente. Já as variáveis RP e Ma apresentaram alcances de 1 m e 3,8 m, respectivamente. O conhecimento do alcance da dependência espacial permite que seja definido o raio de amostragem de maneira a garantir, nas próximas amostragens e para as mesmas condições deste estudo, a independência dos pontos amostrais, a minimização do erro padrão da média e também uma maneira de diminuir o número de amostras a serem coletadas. As diferenças de alcance entre as variáveis podem ser atribuídas a variabilidade espacial dos dados, com maior alcance os dados com menor variabilidade, ou seja, menor coeficiente de variação (Ds, Mi,  $\theta_{CC}$  e Pt), devido a maior continuidade espacial desses atributos.

Os modelos esféricos, exponencial e gaussiano foram os que melhor se ajustaram aos semivariogramas das variáveis físicas do solo. As variáveis Ds, RP e Pt, tiveram seus semivariogramas melhor ajustado pelo modelo do tipo exponencial. Já os semivariogramas experimentais de Mi e  $\theta_{CC}$  foram melhor descritos com um modelo gaussiano e a Ma com um modelo esférico. Os critérios de seleção dos



modelos levaram em consideração o coeficiente de determinação e a soma dos quadrados dos resíduos.

### **6.2.3 Mapa da distribuição espacial dos atributos físicos**

Com os modelos de semivariogramas ajustados e de posse dos parâmetros do modelo teórico de cada semivariograma, realizou-se a interpolação dos valores amostrados por meio da krigagem para as variáveis que apresentaram dependência espacial. Já os atributos que não apresentaram dependência espacial não puderam ter um modelo teórico ajustado ao semivariograma. Para essas variáveis foi utilizado como método de interpolação dos dados o inverso do quadrado da distância. Com a interpolação dos dados, pôde-se gerar os mapas que descrevem a variabilidade espacial dos atributos físicos do solo.

Nas Figuras 79A e 79B estão representados os mapas de superfície da densidade do solo para os dois tipos de espaçamentos. Para representação gráfica, foram consideradas 10 classes de valores de  $D_s$ . Nota-se na Fig. 79A uma região com maiores valores de  $D_s$ , entre 1,46 e 1,55  $\text{Mg m}^{-3}$ , indicando uma zona de compactação do solo no espaçamento LS. Já na Fig. 79B, os valores de  $D_s$  ficaram na maior parte da área entre 1,26 e 1,48  $\text{Mg m}^{-3}$ , sem apresentar uma região definida com valores elevados de  $D_s$  no espaçamento LD.

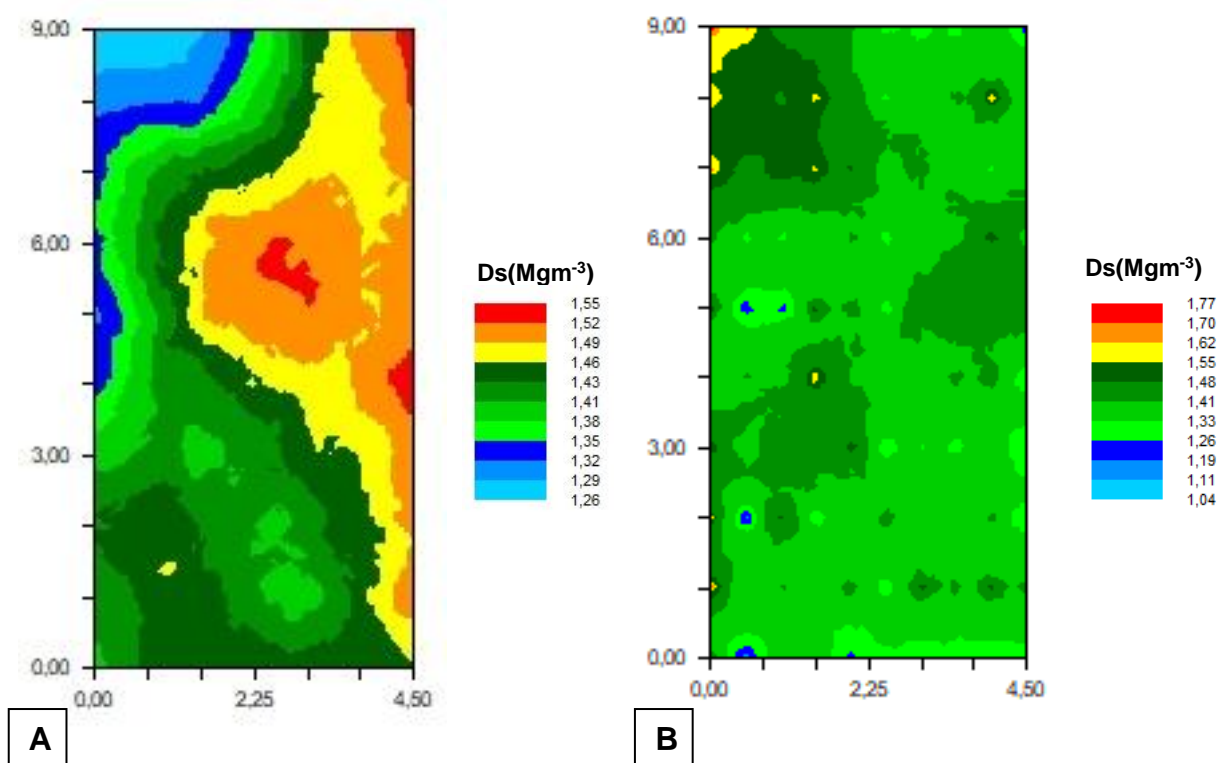


Figura 79 – Mapa da distribuição espacial da variável densidade do solo ( $D_s$ ) nos espaçamentos LS (A) e LD (B).

O mesmo comportamento é observado para os mapas da distribuição espacial das variáveis  $RP$ ,  $M_i$  e  $\theta_{cc}$  (Fig. 80, 81 e 82). Os valores de  $M_i$  para o espaçamento LS que cobriram a maior parte da área ficaram entre 0,398 e 0,440 (Fig. 80A), evidenciando maior diversidade de classes. Já para o espaçamento LD a maior parte da área apresentou valores de  $M_i$  entre 0,418 e 0,431. Nota-se para a variável  $M_i$  no espaçamento LD (Fig. 80A) uma tendência de apresentar pouca variabilidade de valores, com a maior parte da área com valor de microporosidade em uma classe somente. Destaca-se ainda, que as regiões com maior microporosidade (Fig 80A) e conteúdo de água na capacidade de campo (Fig 81A) coincide parcialmente com as regiões de maior densidade do solo. O mesmo ocorre parcialmente no espaçamento LD. Esta variabilidade pode estar associada com as características intrínsecas do solo de cada área, provavelmente relacionadas com o teor de argila. Além disso, o aumento da densidade do solo pela compactação há a transformação de macroporos em microporos, os quais são responsáveis pela retenção de água no solo. Por apresentarem diâmetro pequeno, há o favorecimento do fenômeno de capilaridade. Assim, com o incremento de microporos há o aumento da retenção de água no solo.

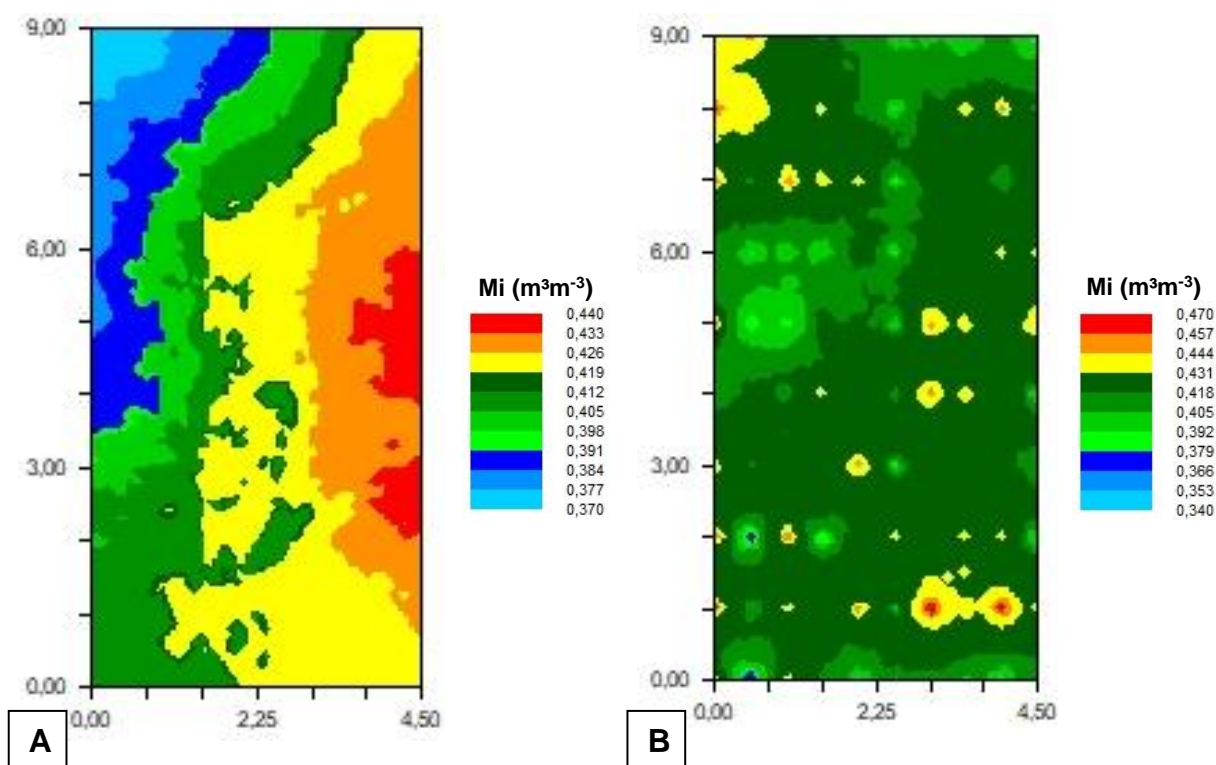


Figura 80 – Mapa da distribuição espacial da variável microporosidade ( $Mi$ ) nos espaçamentos LS (A) e LD (B).

Para a variável  $\theta_{cc}$  (Fig. 81), observou-se um comportamento bem semelhante ao da microporosidade, provavelmente por essas variáveis compartilharem das mesmas causas de variação, ou seja, os processos que as regem são semelhantes. Em condições de compactação do solo há alterações na relação conteúdo de água retida e tensão de retenção. Para tensões iguais e maiores que a correspondente a capacidade de campo (0,01 MPa) há incremento do conteúdo de água retida em solos compactados, provavelmente associado a maior microporosidade que favorece o processo de capilaridade. Porém, o incremento do conteúdo de água em tensões maiores, como a correspondente ao ponto de murcha permanente (1,5 MPa), é mais pronunciado, o que não confere maior disponibilidade as plantas, pois a água estará retida com uma energia maior que a capacidade da planta em extraí-la. Stone et al. (1994) avaliaram alguns atributos físico-hídricos de um Latossolo Vermelho argiloso após sete cultivos sucessivos sob pivô central com arroz e feijão e observaram que a água disponível na camada superficial (0,00 a 0,20 m) diminuiu.

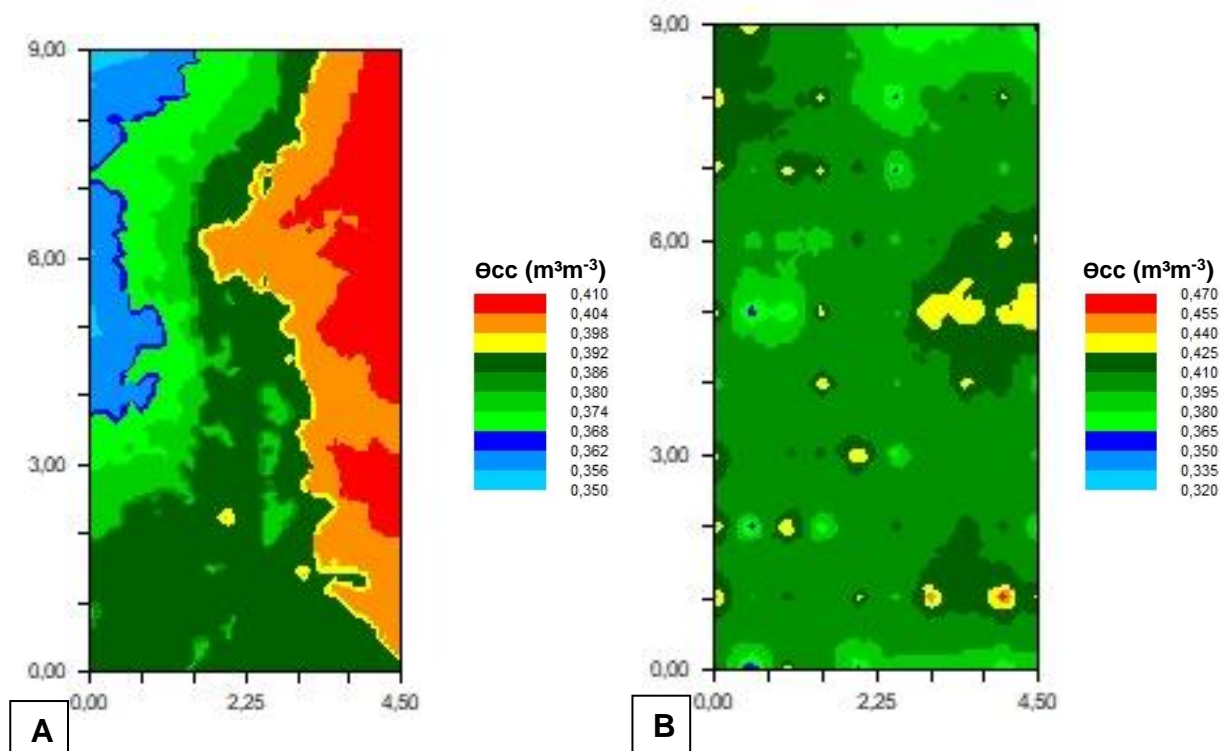


Figura 81 – Mapa da distribuição espacial da variável conteúdo de água a base de volume na capacidade de campo ( $\theta_{cc}$ ) nos espaçamentos LS (A) e LD (B).

Quanto a distribuição espacial da resistência a penetração (RP) apresentada na Fig. 82, nota-se no espaçamento LD que a maior parte da área apresentou RP inferior a 2,56 MPa, sendo que o valor considerado como crítico para o desenvolvimento das plantas é de 2,5 MPa (CAMARGO; ALLEONI, 1997), indicando uma condição adequada de desenvolvimento para as plantas de cana-de-açúcar. Já no espaçamento LS (Fig. 82B) a maior parte da área apresenta RP entre 2,41 e 4,04 MPa, inferindo em uma degradação da qualidade física do solo. Souza et al. (2006) avaliando a dependência espacial da resistência do solo à penetração sob cultivo contínuo de cana-de-açúcar observaram valores de RP na camada de 0 – 0,15 m entre 1,22 e 3,65 MPa. Roque et al. (2010), avaliaram o controle de tráfego agrícola através de atributos físicos do solo em área cultivada com cana-de-açúcar em um Latossolo Vermelho. Os autores observaram valores de RP no tratamento convencional na camada de 0 – 0,30 m de 1,69 MPa na linha de cultivo e de 3,03 MPa na área de rodado das máquinas em ciclo de primeira soca.

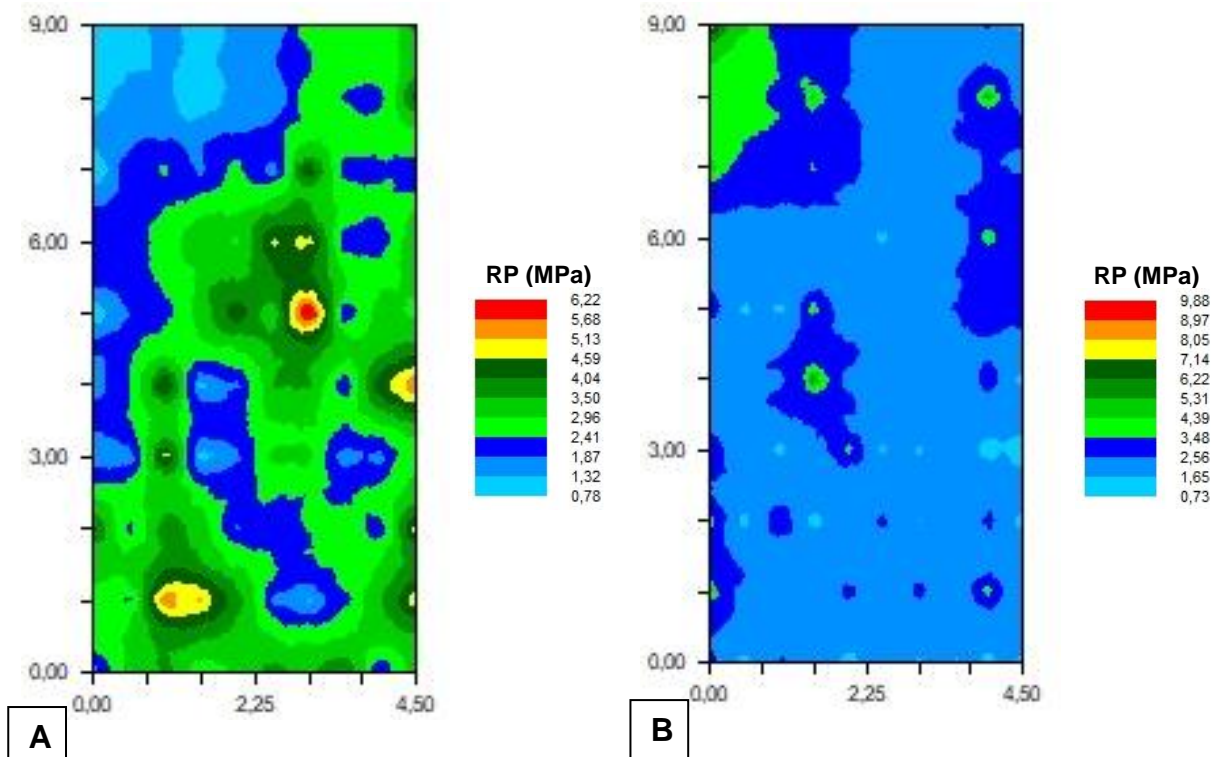


Figura 82 – Mapa da distribuição espacial da variável resistência à penetração (RP) nos espaçamentos LS (A) e LD (B).

Para a variável Pt e Ma observa-se nas Fig. 83 e 84 que o comportamento espacial entre elas para cada espaçamento foi bem semelhante. No espaçamento LS (Fig. 83A e Fig. 84A) nota-se um maior número de classes presentes no mapa, com zonas de altos valores e regiões com baixos valores. No espaçamento LD (Fig. 83B e Fig. 84B) a maior parte da área apresentou valores de Pt entre 0,538 e 0,594  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$  e de Ma entre 0,12 e 0,20  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ . Já o espaçamento LS, apresentou valores de Pt entre 0,51 e 0,55  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$  e de Ma entre 0,08 e 0,15  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$  na maior parte da área, sendo inferiores aos valores do espaçamento LD, indicando maior degradação da estrutura do solo. Destaca-se ainda, no espaçamento LS, que as regiões com maiores valores de Ma (coordenada x entre 0 e 1,5m e coordenada y entre 3 e 9 m) coincidem com as mesmas regiões que apresentam menores valores de Ds, RP e Mi. Quando há o processo de compactação do solo, há a redução do seu volume com a expulsão do ar, resultando em maior Ds. Devido a maior proximidade das partículas do solo há o aumento das forças de coesão que acarretam em aumento da RP. Com o rearranjo das partículas do solo para uma condição de maior proximidade, há a redução dos poros de maior diâmetro (macroporos) e aumento da quantidade de poros de menor diâmetro (microporos), resultando em menor macroporosidade em solos compactados.

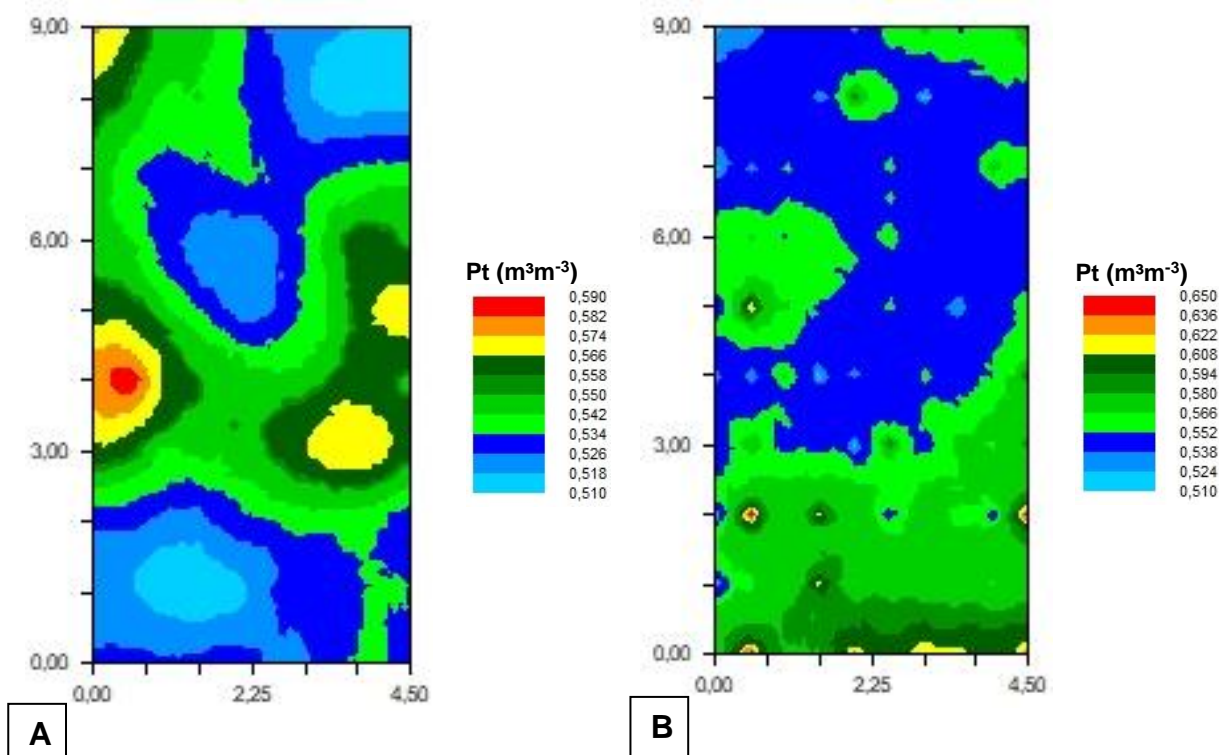


Figura 83 – Mapa da distribuição espacial da variável porosidade total ( $P_t$ ) nos espaçamentos LS (A) e LD (B).

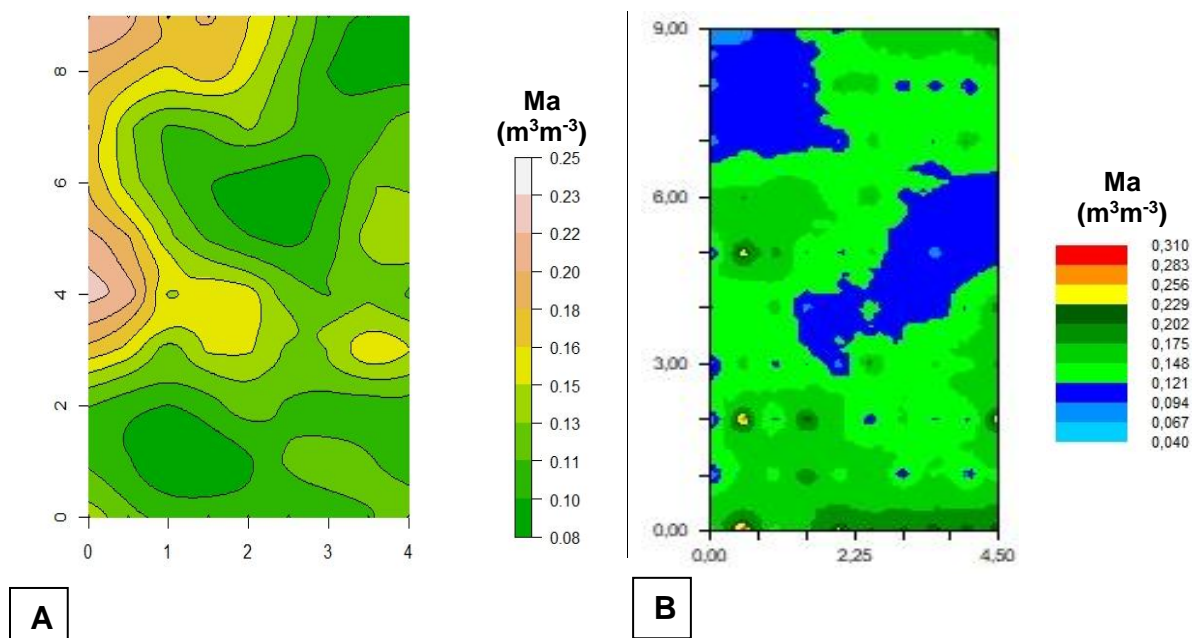


Figura 84 – Mapa da distribuição espacial da macroporosidade ( $M_a$ ) nos espaçamentos LS (A) e LD (B).

Considerando a posição das linhas de cultivo nos mapas de distribuição espacial das variáveis  $RP$  e  $D_s$ , apresentados nas Fig. 85 e 86, respectivamente,

nota-se que não fica nítido as linhas de tráfego tanto no espaçamento LS como LD onde deveria ocorrer maiores valores de Ds e RP. Para representação da linha de cultivo no mapa, foi considerado uma largura de 0,25m. Há o predomínio de valores de RP na linha de cultivo no espaçamento LS entre 2,41 e 2,96 MPa e no espaçamento LD entre 1,65 e 2,56. Nota-se ainda na Fig. 85 algumas regiões com maiores valores de RP localizadas nas entrelinhas nos dois tipos de espaçamentos, porém não formam um padrão de trilha, onde ocorreu o tráfego de máquinas.

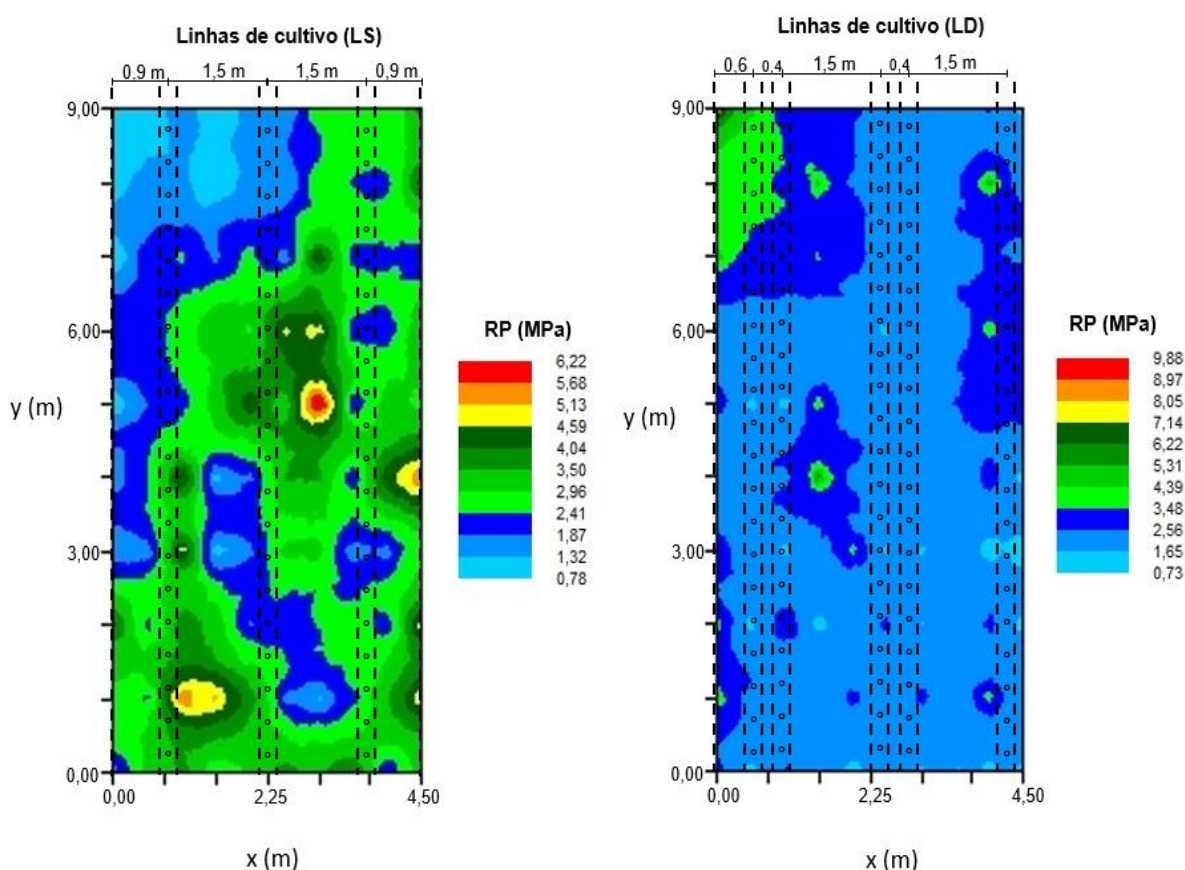


Figura 85 – Representação gráfica das linhas de cultivo no mapa da distribuição espacial da resistência à penetração (RP) nos dois tipos de espaçamentos.

Observa-se na Fig. 86 que os valores de Ds na linha de cultivo no espaçamento LS tiveram variação predominante na faixa de 1,35 a 1,52 Mg m<sup>-3</sup> e no espaçamento LD na faixa de 1,26 a 1,48 Mg m<sup>-3</sup>. Em ambos os espaçamentos, as regiões com maiores valores de Ds estão localizadas nas entrelinhas da cultura, porém não formam um padrão de trilha, que identifica o local de tráfego de máquinas.

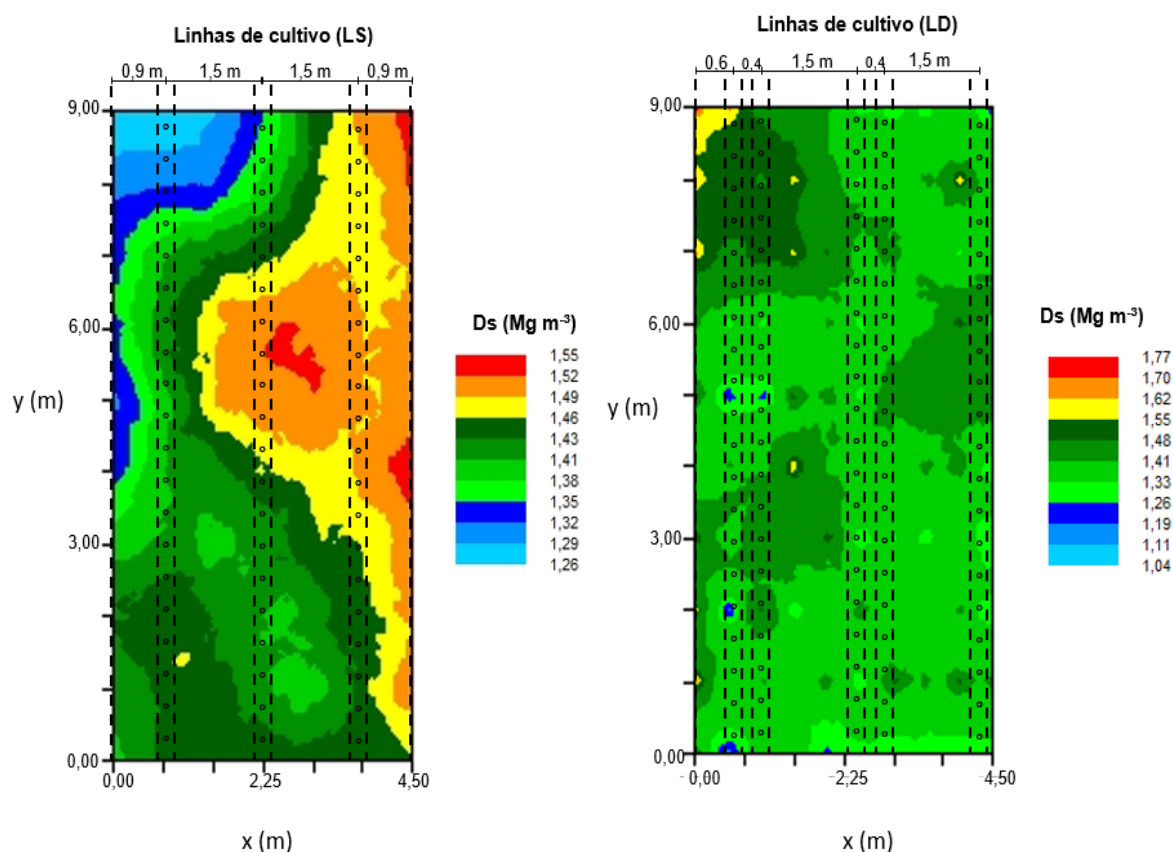


Figura 86 – Representação gráfica das linhas de cultivo no mapa da distribuição espacial da densidade do solo (Ds) nos dois tipos de espaçamento.

A ausência de um padrão da distribuição espacial da compactação do solo bem definido, com a localização clara das zonas de tráfego, pode estar relacionada com a operação de escarificação do solo, que é realizada após a colheita da cana-de-açúcar juntamente com adubação de cobertura, procedimento padrão de manejo do canal na Coopercana. Desta forma, a variabilidade espacial desses atributos pode provavelmente ser explicada pelas características intrínsecas do solo de cada área, como a textura por exemplo, ficando o tráfego de máquinas como um fator secundário nas causas de variação da variabilidade espacial dos atributos físicos avaliados.

## 7. Conclusões

O tipo de espaçamento e o ciclo de cultivo influenciaram nos valores médios e no padrão de dispersão dos atributos físicos do solo e dos componentes de produção da cana-de-açúcar.



A produtividade (TCH) nos espaçamentos linha simples e linha dupla foram semelhantes com menor produtividade no espaçamento linha tripla. Em ciclo de segunda soca houve uma redução da produtividade nos três espaçamentos entrelinhas.

Os atributos físicos do solo explicaram de forma satisfatória a variabilidade espacial dos componentes de produção da cana-de-açúcar nos espaçamentos entrelinhas simples e tripla em ciclo de segunda soca por meio da abordagem de espaço de estado. Em ciclo de cana de primeira soca nos três espaçamentos entrelinhas a variabilidade dos componentes de produção da cana-de-açúcar não foi explicada pelos atributos físicos do solo.

Com o aumento dos eventos de colheita mecanizada houve uma tendência de maior influência dos atributos físicos do solo sobre os componentes de produção da cana-de-açúcar.

O espaçamento linha dupla nos seus dois tipos de configurações (0,4 x 1,7 e 0,4 x 1,5) propiciaram menor degradação da estrutura física do solo após dois ciclos de soqueira, indicando um controle da compactação do solo.

### 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, 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, 2008.

AQUINO, L. S.; TIMM, L. C.; REICHARDT, K.; BARBOSA, E. P.; PARFITT, J. M. B.; NEBEL, A. L. C.; PENNING, L. H. State-space approach to evaluate effects of land levelling on the spatial relationships of soil properties of a lowland area. **Soil and Tillage Research**, v.145, p.135-147, 2015.

BANERJEE, K., PRAMANIK, B. R., PUSTE, A. M..Effect of different row spacing on ratoonability of high sugar genotypes of sugarcane hybrids. **Journal of Crop and Weed**, v. 8, n. 2, p. 77-79, 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.

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: Livroceres, 2006. p.80-91.

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. The penetration resistance in a soil with well-defined structural units. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v.44, p.601-606, 1980.

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.

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.

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

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 palhicho 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, A. M. C.; SANTOS, K. H., MIGLIORANZA, E.; GOMES, C. J. A.; MARCHIONE, M. S. Avaliação de atributos físicos do solo em diferentes anos de cultivo de cana-de-açúcar. **Agrarian**, v.6, n.22, p.415-422. 2013.

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.; ALVES, M. C.; DE SOUZA, Z. M.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo sob diferentes usos e manejos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. p.237-243, 2011.

CAVALIERI, K. M. V.; CARVALHO, L. D.; SILVA, A. D.; LIBARDI, P. L.; TORMENA, C. A. Qualidade física de três solos sob colheita mecanizada de cana-de-açúcar. **R. Bras. Ci. Solo**, v35, p.1541-1549. 2011.

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](http://www.cemet.rs.gov.br/lista/676/Atlas_Clim%C3%A1tico_do_Rio_Grande_do_Sul)> Acesso em: 06 Jan. 2014.

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.

CHAN, K.Y.; OATES, A.; SWAN, A.D.; HAYES, R.C.; DEAR, B.S.; PEOPLES, M.B. Agronomic consequences of tractor wheel compaction on a clay soil. **Soil and Tillage Research**. v.89, p.13-21, 2006.

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.

COLLARES, G.L.; REINER, D.J.; REICHERT, J.M. et al. Compactação de um latossolo induzida pelo tráfego de máquinas e sua relação com o crescimento e produtividade de feijão e trigo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v.32 p.933-942, 2008.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Séries Históricas de Área Plantada, Produtividade e Produção**. Disponível em: <[http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1252&ordem=produto&Pagina\\_objcmsconteudos=2#A\\_objcmsconteudos](http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1252&ordem=produto&Pagina_objcmsconteudos=2#A_objcmsconteudos)>. Acesso em: 15 jul 2017.

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.

CRESSIE N. A. C. *Statistics for spatial data*. New York: J. Wiley, 1993. 900 p.

CRESSIE, N. A. C.; HAWKINS, D. M. Robust estimation of the variogram. *Mathematical Geology*, New York, v. 12, n. 2, p. 115-125, 1980.

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

DEMATTE, J. L. I. Solos arenosos de baixa fertilidade: estratégia de manejo. 5º Seminário Agroindustrial, 29ª Semana “Luiz de Queiroz”. Piracicaba. 1986.

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.

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.

EHSANULLAH, K. J.; JAMIL, M.; GHAFAR, A. Optimizing the row spacing and seeding density to improve yield and quality of sugarcane. **Crop & Environment**. v.2 p.1-5, 2011.

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.

FAGUNDES, E. A.; DA SILVA, T. J.; BONFIM-SILVA, E. M. Desenvolvimento inicial de variedades de cana-de-açúcar em Latossolo submetidas a níveis de compactação do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.18, n.2, 2014.

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 ALCOOLICA "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.

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.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF UNITED NATIONS – FAO. FAOSTAT: Countries by commodity. 2017. Disponível em: <[http://www.fao.org/faostat/en/#rankings/countries\\_by\\_commodity](http://www.fao.org/faostat/en/#rankings/countries_by_commodity)>. Acesso em 15 jul 2017.

GAMMA DESIGN SOFTWARE. GS+: Geostatistics for the Environmental Sciences. Plainwell: Gamma Design Software, 2004.

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.

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.

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.

GUIMARÃES, E.C. **Geoestatística básica e aplicada**. Uberlândia: Faculdade de Matemática-Universidade Federal de Uberlândia, 2004. 77p. (Apostila).

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.

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

ISAAKS, E.H.; SRIVASTAVA, R.M. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford University Press, 1989. 561p.

JIA, X. X.; YANG, Y.; ZHANG, C. C.; SHAO, M. A.; HUANG, L. M. A. State-Space Analysis of Soil Organic Carbon in China's Loess Plateau. **Land Degradation & Development**, v.28, n.3, p.983-993, 2017.

JIA, X.; SHAO, M.; WEI, X.; HORTON, R.; LI, X. Estimating total net primary productivity of managed grasslands by a state-space modeling approach in a small catchment on the Loess Plateau, China. **Geoderma**. v.160, p.281–291, 2010.

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.

JOURNEL, A.G.; HUIJBREGTS, C.J. **Mining geostatistics**. London: Academic Press, 1991. 600 p.

JOURNEL, A.G.; HUIJBREGTS, CH. J. **Mining geostatistics**. New York: Academic Press Inc., 1978. 600p.

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.

LANDIM, P.M.B.; **Sobre Geoestatística e mapas**. DGA, IGCE, UNESP / Rio Claro, Lab. Geomatemática, 2006.

LI D.; LAKE, L. W. A moving window semivariance estimator. *Water Resources Research*, Washington, v.30, n.5, p.1479-1490, 1994.

LIU, Z.P.; SHAO, M.A.; WANG, Y.Q. Estimating soil organic carbon across a large-scale region: a state-space modeling approach. *Soil Sci.*, v. 177, p. 607-618, 2012.

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.

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.

MATHERON, G. *Traité de géostatistique appliquée*. Paris: Technip, v. 14, 1962.

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

McBRATNEY, A. B.; WEBSTER, R. How many observations are needed for regional estimation of soil properties? **Soil Science**, Baltimore, v. 135, n. 3, p. 177-183, 1983. McBRATNEY, A.B.; WEBSTER, R. Choosing functions for semi-variograms of soil properties and fitting them to sampling estimates. *J. Soil Sci.*, 37:617-639, 1986.

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

MCHUGH, A.D.; TULLBERG, J.N.; FREEBAIRN, D.M. Controlled traffic farming restores soil structure. **Soil and Tillage Research**, v.104, p.164-172, 2009.

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.

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.

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.

NIELSEN, D.R.; WENDROTH, O. **Spatial and temporal statistics: sampling field soils and their vegetation.** Reiskirchen: Catena Verlag, 2003. 398p.

NYKO, D.; VALENTE, M. S.; MILANEZ, A. Y.; TANAKA, A. K. R.; RODRIGUES, A. V. P. R. A evolução das tecnologias agrícolas do setor sucroenergético: estagnação passageira ou crise estrutural? **BNDES Setorial**, v.37, p. 399-442, 2013.

OLIVEIRA, M. P. O.; 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 p.97-104, 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.

OTTO, R.; SILVA, A.P.; FRANCO, H.C.J.; OLIVEIRA, E.C.A.; TRIVELIN, P.C.O. High soil penetration resistance reduces sugarcane root system development. **Soil and Tillage Research**, v.117, p.201-210, 2011.

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.

PANZIERA, Wildon. **Parâmetros de solo e de planta em diferentes configurações de espaçamentos entrelinhas 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, 2014.

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.



PMGCA / UFSCar. Variedades RB. 1º edição. 2008. Apostila. Disponível em <[https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/VariedadesRB\\_2008+apostila\\_000fxga3a3302wyiv80soht9hctswek2.pdf](https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/VariedadesRB_2008+apostila_000fxga3a3302wyiv80soht9hctswek2.pdf)>

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2017. URL <https://www.R-project.org/>.

REICHARDT, K. & TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. 3.ed. Barueri: Manole, 2016. 547 p.

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 and Tillage Research**, v. 102, n. 2, p. 242-254, 2009.

RENEWABLE FUELS ASSOCIATION – RFA. World Fuel Ethanol Production. Disponível em: <<http://www.ethanolrfa.org/resources/industry/statistics/#1454099103927-61e598f7-7643>>. Acesso em: 16 jul 2017.

REYNOLDS, W.D.; DRURY, C.F.; TAN, C.S.; FOX, C.A. & YANG, X.M. Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. **Geoderma**, 152:252-263, 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.

RIENZI, E. A.; MAGGI, A. E.; SCROFFA, M.; LOPEZ, V. C.; CABANELLA, P. Autoregressive state spatial modeling of soil bulk density and organic carbon in fields under different tillage system. **Soil and Tillage Research**, v.159, p. 56-66, 2016.  
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.

SÁ, M. A. C. D., JUNIOR, S., FRANZ, C. A. B., & REIN, T. A. Soil physical quality and sugarcane yield with the use of inter-row chiseling. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51(9), p. 1610-1622, 2016.

SANTOS, D. H.; SILVA, M. D. A.; TIRITAN, C. S.; FOLONI, J. S.; ECHER, F. R. Qualidade tecnológica da cana-de-açúcar sob adubação com torta de filtro enriquecida com fosfato solúvel. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. p.443-449, 2011.

SCHAFFRATH, V. R.; TORMENA, C. A.; FIDALSKI, J.; GONÇALVES, A. C. A. Variability and correlation among physical properties of an Oxisol under no-till and conventional tillage. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v.32, n.4, p.1369-1377, 2008.

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.

SHE, D.; TANG, S.; SHAO, M. A.; XIA, Y. Characterizing scale specific depth persistence of soil water content along two landscape transects. **Journal of hydrology**. V.519, p.1149-1161, 2014.

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 JUNIOR, C. A.; DE CARVALHO, L. A.; CENTURION, J. F.; DE OLIVEIRA, E. C. A. Comportamento da cana-de-açúcar em duas safras e atributos físicos do solo sob diferentes tipos de preparo. **Biosci. J.**, v.29, n.5. 2013.

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, 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, SD dos A., et al. **Recomendação de variedades de cana-de-açúcar para o Estado do Rio Grande do Sul**. Embrapa Clima Temperado-Comunicado Técnico (INFOTECA-E). 2012.

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

SINGELS A; SMIT M. A. Sugarcane response to row spacing-induced competition for light. **Field Crop Res**, v.113, p.149-155, 2009.

SOUZA, A. C. M. Atributos físicos do solo e de planta em área de cana-de-açúcar com controle de tráfego em diferentes espaçamentos. 2016. 170p. Tese. UNESP/FCA, Botucatu.

SOUZA, G.S. de; SOUZA, Z.M. de; COOPER, M.; TORMENA, C.A. Controlled traffic and soil physical quality of an Oxisol under sugarcane cultivation. **Scientia Agricola**, v.72, p.270-277, 2015.

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. **Ci. Rural**. v.36, n.1, p.128-134, 2006.

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, 2004.

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.; BENTO, M. J. Spatial variability of physical attributes of Oxisol under sugarcane crop. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.8, n.1, p.51-58, 2004.

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.

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.; 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.

STONE, L.F.; SILVEIRA, P.M.; ZIMMERMANN, F.J.P. Características físico-hídricas e químicas de um latossolo após adubação e cultivos sucessivos de arroz e feijão, sob irrigação por aspersão. **R. bras. Ci. Solo**, v.18, p.533-539, 1994.

STRECK, C.A.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. et al. Modificações em propriedades físicas com a compactação do solo causada pelo tráfego induzido de um trator em plantio direto. **Ciência Rural**. v34. p.755-760, 2004.

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.; RALISCH, R.; GUIMARÃES, M. F.; MEDINA, C. C.; BALBINO, L. C.; NEVES, C. S. V. J. Método do perfil cultural para avaliação do estado físico de solos em condições tropicais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** v.23, n.2, 1999.

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, J.J. Soil strength - Root penetration relations to medium to coarse – textured soil materials. **Soil Science**. v102, p.18-22, 1966.

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.; FANTE JR, L.; BARBOSA, E. P.; REICHARDT, K.; BACCHI, O. O. S. Interação solo-planta avaliada por modelagem estatística de espaço de estados. **Scientia Agricola**, v. 57, n. 4, p. 751-760, 2000.

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. & SA, J. C. M. Propriedades físicas do solo sob plantio direto influenciadas por calagem, preparo inicial e tráfego. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v22, 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.

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.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DA CANA-DE-AÇÚCAR – ÚNICA. Consumo de combustíveis. 2016A. Disponível em: <<http://www.unicadata.com.br/historico-de-consumo-de-combustiveis.php?idMn=11&tipoHistorico=10&acao=visualizar&idTabela=1875&produto=Etanol%2Bhidratado%2Bcombust%2526iacute%253Bvel&nivelAgregacao=3&estado=Rio%2BGrande%2Bdo%2BSul>>. Acesso em 16 jul 2017.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DA CANA-DE-AÇÚCAR – UNICA. Moagem de cana-de-açúcar e produção de açúcar e etanol – safra 2016/2017. 2017B. Disponível em: <<http://www.unicadata.com.br/historico-de-producao-e-moagem.php?idMn=32&tipoHistorico=4&acao=visualizar&idTabela=1884&safra=2016%2F2017&estado=RS%2CSC%2CPR%2CSP%2CRJ%2CMG%2CES%2CMS%2CMT%2CGO%2CDF%2CBA%2CSE%2CAL%2CPE%2CPB%2CRN%2CCE%2CPI%2CMA%2CTO%2CPA%2CAP%2CRO%2CAM%2CAC%2CRR>>. Acesso em 16 jul 2017.

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.

VASCONCELOS, R. F.; DE SOUZA, E. R.; CANTALICE, J. R.; SILVA, L. S. Qualidade física de Latossolo Amarelo de tabuleiros costeiros em diferentes sistemas de manejo da cana-de-açúcar. **R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, v.18, n.4, p.381-386. 2014.

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.

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.

VIEIRA, S.R. **Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo.** In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R. (Eds.). **Tópicos em ciência do solo.** Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v.1. p.1-54.

- 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.
- WEBSTER, R.; OLIVER, M.A. **Geostatistics for environmental scientists**. Chichester: John Wiley & Sons, 2007. 330p.
- 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.
- WILDING, L. P.; DRESS, L. R. Spatial variability and pedology and pedology. In: WILDING, L. P.; SMECK, N. E.; HALL, G. F. Pedogenesis and soil taxonomy: concepts and interactions. New York.
- 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.