

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

PEDRO FRANCISCO SANGUINO ORTIZ

**COMPACTAÇÃO E QUALIDADE FÍSICA DO SOLO EM SISTEMAS DE
COLHEITA MECANIZADA E SEMI-MECANIZADA DE CANA-DE-
AÇÚCAR**

Recife
2020

PEDRO FRANCISCO SANGUINO ORTIZ

**COMPACTAÇÃO E QUALIDADE FÍSICA DO SOLO EM SISTEMAS DE
COLHEITA MECANIZADA E SEMI-MECANIZADA DE CANA-DE-
AÇÚCAR**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal Rural de Pernambuco como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia agrícola

Orientador: Prof. Dr. Mario Monteiro Rolim

Recife
2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- O89c Ortiz, Pedro Francisco Sanguino
Compactação e qualidade física do solo em sistemas de colheita mecanizada e semi-mecanizada de cana-de-açúcar /
Pedro Francisco Sanguino Ortiz. - 2020.
177 f. : il.
- Orientador: Mario Monteiro Rolim.
Inclui referências.
- Tese (Doutorado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola,
Recife, 2020.
1. Agricultura. 2. Falhas de cana-de-açúcar. 3. Multifractalidade. 4. Saccharum spp.. 5. tráfego agrícola. I. Rolim,
Mario Monteiro, orient. II. Título

CDD 630

PEDRO FRANCISCO SANGUINO ORTIZ

Compactação e qualidade física do solo em sistemas de colheita mecanizada e semi-mecanizada de cana-de-açúcar

Tese apresentado ao Programa de Engenharia Agrícola da Universidade Federal Rural de Pernambuco para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Agrícola.

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Mario Monteiro Rolim

Universidade Federal Rural de Pernambuco

Dr. Djalma Euzébio Simões Neto

Universidade Federal Rural de Pernambuco

Prof. Dr. Maurício Roberto Cherubin

Universidade de São Paulo

Prof. Dr. Antônio Paz Gonzalez

Universidade da Coruña

Prof^{ta}. Dr^a. Juliana Pinheiro Dadalto

Universidade Federal Rural de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela força, sabedoria, e serenidade, que sempre me mantém firme, frente aos diferentes desafios da vida. Eterno agradecimento para meus pais pelo amor, sacrifício, e principalmente pela confiança, motivação, força incondicional, e por acreditarem sempre nas minhas decisões.

Agradeço ao Brasil por ter me acolhido, educado e permitido aperfeiçoar-me profissionalmente e como pessoa, e também agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), agradeço pela concessão da bolsa de estudo e as pessoas envolvidas que contribuem para que estes programas de formação estejam sempre em vigência.

Meus mais sinceros agradecimentos à Universidade Federal Rural de Pernambuco e a todo o pessoal que a compõe, pois, graça a esse amor e trabalho, a convertem em um segundo lar, ao programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola pela colaboração durante todo este tempo e pela oportunidade de realização do curso de Doutorado.

Agradeço ao Professor e Orientador Mário Rolim, pela paciência, acompanhamento, trabalho e esforço em conjunto, para poder, não só, cumprir a todos objetivos da pesquisa, senão também, pelas experiências compartilhadas e aprendidas ao longo dessa caminhada. Agradeço também a todo corpo de docentes de Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola pelo apoio e disponibilidade.

Especial agradecimento à Usina São Jose Agroindustrial, sua Diretoria por abrir as portas, com empatia, interesse e apoio na pesquisa agrícola, oferecidas pelo Engenheiro Marcelo Nicácio da Silva Júnior, e aos técnicos de campo Aldair Pereira e amigos, pela incondicional ajuda, colaboração, que permitiram que este projeto de pesquisa se torne uma realidade.

Meus mais sinceros agradecimentos ao grupo do Laboratório de Mecânica de Solos e Aproveitamento de Resíduos-UFRPE, especialmente Roberta Queiroz Cavalcanti, Matheus Tolêdo, Renato Lima, Raguiara Primo, Camila e todo os estagiários pelo esforço e colaboração. Também agradeço aos meus amigos e colegas da pós-graduação de Engenharia Agrícola, Jhon Lennon, Diego Araújo, Ivis Campos, Carol Lima, Breno Lima, Daniel Dantas, e aqueles que não mencionei, mas que de alguma maneira me ajudaram, deixo aqui meu muito obrigado.

Finalmente total gratidão a minha namorada Juliane Carolina Silva Santos por todo o amor, motivação, colaboração, compreensão; a senhora Andrea, o senhor Davi, Deive, por tornar-se minha família Brasileira, por todo a amizade, carinho, especial agradecimento.

Muito obrigado a todos.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....	IV
LISTA DE FIGURAS.....	VI
RESUMO.....	IX
ABSTRACT	X
INTRODUÇÃO.....	1
1. A cultura da cana-de-açúcar no Brasil	4
2. Mecanização agrícola nas áreas de cana-de-açúcar	6
3. Colheita convencional e mecanizada de cana-de-açúcar	7
4. Compactação dos solos agrícolas e qualidade física do solo	8
4.1 Geometria Fractal no estudo da compactação solo	10
4.2 Qualidade de solos agrícolas	12
4.3 Qualidade física de solo agrícolas	14
5. Falhas no plantio de cana-de-açúcar	16
5.1 Falhas por ações mecânicas.....	17
5.2 Identificação de falhas em cana-de-açúcar.....	18
Bibliografia	20
- CAPÍTULO I - Mudanças temporais das propriedades físico-mecânicas e matéria orgânica de um Argissolo sob diferentes sistemas de colheita de cana-de-açúcar.....	28
RESUMO:.....	29
ABSTRACT	30
1. Introdução	31
2. Material e métodos.....	32
2.1 Sítio experimental.....	32
2.2 Áreas de Estudo	32
2.3 Variáveis estudadas e experimento	34
2.4 Análises dos dados	36
3. Resultados e discussão	36
3.1. Efeito geral dos sistemas de colheita nas propriedades físico-mecânicas e orgânica do solo	36
3.2. Efeito dos sistemas de colheita nas propriedades físico-mecânicas e matéria orgânica do solo na linha e entrelinha da cana-de-açúcar.....	47
4. Conclusões	62
Bibliografia	63

- CAPÍTULO II - Mudanças na qualidade física num Argissolo com cana-de-açúcar em diferentes fases e sistemas de colheita.....	68
RESUMO:.....	69
ABSTRACT	70
1. Introdução	71
2. Material e métodos.....	72
2.1 Sítio experimental.....	72
2.2 Áreas de Estudo	73
2.3 Variáveis estudadas e experimento	74
2.4 Indicadores (IFQs) e Índice de qualidade físico do solo (IQFS).....	76
2.5 Análises dos dados	77
3. Resultados e discussão	78
4. Conclusões	98
Bibliografia	98
- CAPÍTULO III – Falhas na cultura de cana-de-açúcar e qualidade física de um Argissolo sob colheita semi-mecanizada e mecanizada	103
RESUMO.....	104
ABSTRACT:	105
1. Introdução	106
2. Material e métodos.....	107
2.1 Sítio experimental.....	107
2.2 Áreas de Estudo	108
2.3 Variáveis estudadas e experimento	111
2.4 Análises estatísticas	114
3. Resultados e discussão	114
4. Conclusões	125
Bibliografia	126
- CAPÍTULO IV- Multifractalidade da resistência à penetração e conteúdo de água de um Argissolo sob um sistema de cana-de-açúcar semi-mecanizado	130
RESUMO.....	131
ABSTRACT:	132
1. Introdução	133
2. Material e métodos.....	134
2.1 Sítio experimental.....	134
2.2 Áreas de Estudo	135
2.3 Resistência à penetração (Rp) e conteúdo de água no solo (U)	136

2.4	Análises estatísticas	137
2.5	Análises multifractal.....	137
3.	Resultados e discussão	141
3.1	Análises da resistência a penetração (Rp) e conteúdo de água (U) do solo. 141	
3.2	Multifractalidade da resistência à penetração (Rp) e conteúdo de água (U) no solo 148	
4.	Conclusões	159
	Bibliografia	159

LISTA DE TABELAS

- CAPÍTULO I –

Mudanças temporais das propriedades físico-mecânicas e matéria orgânica de um Argissolo sob diferentes sistemas de colheita de cana-de-açúcar

Tabela 1. Caracterização do solo e da área de cana-de-açúcar.	34
Tabela 2. Estatística descritiva da densidade (ρ_d) e resistência à penetração (R_p) em duas camadas de um Argissolo, em diferentes fases da cultura e sistemas de colheita de cana-de-açúcar.	37
Tabela 3. Estatística descritiva da macroporosidade (P_{mac}) e água disponível (θ_{DIS}) em duas camadas de um Argissolo, em diferentes fases da cultura e sistemas de colheita de cana-de-açúcar.	42
Tabela 4. Estatística descritiva do carbono orgânico (CO) em duas camadas de um Argissolo, em diferentes fases da cultura e sistemas de colheita de cana-de-açúcar.	44
Tabela 5. Estatística descritiva da densidade (ρ_d) em duas camadas de um Argissolo, na entrelinha e linha, em diferentes fases da cultura e sistemas de colheita de cana-de-açúcar.	48
Tabela 6. Estatística descritiva da resistência à penetração (R_p) em duas camadas de um Argissolo, na entrelinha e linha, em diferentes fases da cultura e sistemas de colheita de cana-de-açúcar.	51
Tabela 7. Estatística descritiva do conteúdo de água (θ) em duas camadas de um Argissolo, na entrelinha e linha, em diferentes fases da cultura e sistemas de colheita de cana-de-açúcar.	53
Tabela 8. Estatística descritiva da macroporosidade (P_{mac}) em duas camadas de um Argissolo, na entrelinha e linha, em diferentes fases da cultura e sistemas de colheita de cana-de-açúcar.	56
Tabela 9. Estatística descritiva da água disponível (θ_{DIS}) em duas camadas de um Argissolo, na entrelinha e linha, em diferentes fases da cultura e sistemas de colheita de cana-de-açúcar.	58
Tabela 10. Estatística descritiva do carbono orgânico (CO) em duas camadas de um Argissolo Amarelo distrocoeso, na entrelinha e linha, em diferentes fases da cultura e sistemas de colheita de cana-de-açúcar.	60

- CAPÍTULO II -

Mudanças na qualidade física num Argissolo com cana-de-açúcar em diferentes fases e sistemas de colheita

Tabela 1. Caracterização do solo e da área de cana-de-açúcar.	74
Tabela 2. Modelo aditivo para a determinação do índice de qualidade física do solo (IQFS).	77
Tabela 3. Estatística descritiva da densidade (ρ_d) resistência à penetração (R_p), macroporosidade (P_{mac}), água disponível para as plantas (θ_{DIS}) e conteúdo de carbono orgânico (CO) para as duas camadas de um Argissolo em dois sistemas de colheita e diferentes fases da cultura de cana-de-açúcar.	79

Tabela 4. Modelos de ajuste para água disponível (θ_{DIS}) nas diferentes densidades (ρ_d) para duas camadas de um Argissolo Amarelo distroceso com cana-de-açúcar.....	82
Tabela 5. Modelos de Indicadores físicos de qualidade (IQF) para um Argissolo Amarelo distroceso em duas profundidades.	83

- CAPÍTULO III –

Falhas na cultura de cana-de-açúcar e qualidade física de um Argissolo sob colheita semi-mecanizada e mecanizada

Tabela 1. Caracterização do solo e da área de cana-de-açúcar.	108
Tabela 2. Modelos para determinar os conteúdos de água disponível (θ_{DIS}) e macroporosidade (P_{mac}) para diferentes densidades do solo (ρ_d) e para duas camadas em um Argissolo com cana-de-açúcar.....	112
Tabela 3. Modelos para a resistência à penetração do solo (R_p) conforme o modelo de Busscher (1997) para duas camadas em um Argissolo com cana-de-açúcar.	113
Tabela 4. Modelos de Indicadores físicos de qualidade (IFQs) para um Argissolo em duas camadas.....	113
Tabela 5. Modelo aditivo para a determinação do Índice de qualidade física do solo (IQFS).	114
Tabela 6. Estatística descritiva das propriedades física, em duas camadas, de um Argissolo com cana-de-açúcar, após Plantio (PL) e colheitas mecanizada (CMz) e semi-mecanizada (CSM).	115
Tabela 7. Estatística descritiva e teste de normalidade para os diferentes parâmetros de quantificação de falhas de cana-de-açúcar, após Plantio (PL) e colheitas mecanizada (CMz) e semi-mecanizada (CSM).	117
Tabela 8. Teste de t entre as diferentes variáveis de falhas de cana-de-açúcar após Plantio (PL) e colheitas mecanizada (CMz) e semi-mecanizada (CSM).	118
Tabela 9. Estatística descritiva e Teste de Shapiro-Wilk para os índices físicos de qualidade (IQFS) em duas camadas de um Argissolo com cana-de-açúcar após Plantio (PL) e colheitas mecanizada (CMz) e semi-mecanizada (CSM).	121
Tabela 10. Teste de t para os índices de qualidade física do solo (IQFS) em duas camadas de um Argissolo cultivado com cana-de-açúcar após Plantio (PL) e colheitas mecanizada (CMz) e semi-mecanizada (CSM).	122

- CAPÍTULO IV -

Multifractalidade da resistência à penetração e conteúdo de água de um Argissolo sob um sistema de cana-de-açúcar semi-mecanizado

Tabela 1. Caracterização do solo e da área de cana-de-açúcar.	135
Tabela 2. Estatística descritiva da Resistência à penetração (R_p) e Conteúdo de água (U) um Argissolo em três profundidades ao longo do transecto da entrelinha (E) e Linha (L), antes e após a colheita semi-mecanizada de cana-de-açúcar.	143
Tabela 3. ANOVA da resistência à penetração (R_p) e conteúdo de água (U), nos transectos do solo e nos diferentes Fases da cana-de-açúcar sub colheita semi-mecanizada.....	145

Tabela 4. Parâmetros multifractais da dimensão generalizada (D_{min} , D_0 , D_1 , D_2 e D_{max}) para a resistência à penetração (R_p) e conteúdo de água do solo (U) em três profundidades do transecto na entrelinha (E) antes e após a colheita de cana-de-açúcar.	150
Tabela 5. Parâmetros multifractais da dimensão generalizada (D_{min} , D_0 , D_1 , D_2 e D_{max}) para a resistência à penetração (R_p) e conteúdo de água do solo (U) no transecto da linha (L) antes e após a colheita de cana-de-açúcar.....	150
Tabela 6. Análises de variância para dimensão generalizada (D_{min}) da resistência à penetração (R_p) e conteúdo de água do solo (U) nos transectos da linha e entrelinha, antes e após a colheita de cana-de-açúcar.	153
Tabela 7. Comparação de médias (Teste de Tukey) da dimensão generalizada (D_{min}) do conteúdo de água no solo (U) nos transectos da linha e entrelinha, antes e após a colheita cana-de-açúcar.	154
Tabela 8. Espectro de singularidade da resistência à penetração (R_p) e conteúdo de água (U) do solo no transecto da entrelinha (E) antes e após a colheita cana-de-açúcar.	155
Tabela 9. Espectro de singularidade da resistência à penetração (R_p) e conteúdo de água do solo (U) em três profundidades do transecto na linha (L) antes e após a colheita cana-de-açúcar.	155

LISTA DE FIGURAS

- CAPÍTULO I –

Mudanças temporais das propriedades físico-mecânicas e matéria orgânica de um Argissolo sob diferentes sistemas de colheita de cana-de-açúcar

Figura 1. Localização experimental, área agrícola da cana-de-açúcar e delimitações da área após plantio em Igarassu, PE, Brasil.	33
Figura 2. Esquema da malha e pontos amostrais nas linhas e entrelinhas na área de cana-de-açúcar.	35
Figura 3. Densidade (ρ_d) e resistência à penetração (R_p) em duas camadas de um Argissolo, em diferentes fases da cultura e sistemas de colheita de cana-de-açúcar.....	38
Figura 4. Conteúdo de água (θ) em duas camadas de um Argissolo, em diferentes fases da cultura e sistemas de colheita de cana-de-açúcar.	40
Figura 5. Macroporosidade (P_{mac}) e água disponível (θ_{DIS}) em duas camadas de um Argissolo, em diferentes fases da cultura e sistemas de colheita de cana-de-açúcar.....	43
Figura 6. Carbono orgânico (CO) em duas camadas de um Argissolo, em diferentes fases da cultura e sistemas de colheita de cana-de-açúcar.	45
Figura 7. Densidade (ρ_d) em duas camadas de um Argissolo, na entrelinha e linha, em diferentes fases da cultura e sistemas de colheita de cana-de-açúcar.	49
Figura 8. Resistencia à penetração (R_p) em duas camadas de um Argissolo, na entrelinha e linha, em diferentes fases da cultura e sistemas de colheita de cana-de-açúcar.	52
Figura 9. Conteúdo de água (θ) em duas camadas de um Argissolo, na entrelinha e linha, em diferentes fases da cultura e sistemas de colheita de cana-de-açúcar.	54
Figura 10. Macroporosidade (P_{mac}) em duas profundidades de um Argissolo, na entrelinha e linha, em diferentes fases da cultura e sistemas de colheita de cana-de-açúcar.	57

Figura 11. Água disponível (θ_{DIS}) em duas camadas de um Argissolo, na entrelinha e linha, em diferentes fases da cultura e sistemas de colheita de cana-de-açúcar.	59
Figura 12. Carbono orgânico (CO) em duas camadas de um Argissolo, na entrelinha e linha, em diferentes fases da cultura e sistemas de colheita de cana-de-açúcar.	61

- CAPÍTULO II -

Mudanças na qualidade física num Argissolo com cana-de-açúcar em diferentes fases e sistemas de colheita

Figura 1. Localização experimental, área agrícola da cana-de-açúcar e delimitações da área após plantio em Igarassu, PE, Brasil.	73
Figura 2. Esquema da malha e pontos amostrais nas linhas e entrelinhas na área de cana-de-açúcar.	75
Figura 3. Água disponível (θ_{DIS}) em diferentes densidades (ρ_d) para duas camadas de um Argissolo Amarelo distroceso com cana-de-açúcar.	81
Figura 4. Curvas dos indicadores físico de qualidade da camada superficial para Argissolo Amarelo distroceso com cana-de-açúcar.	84
Figura 5. Curvas dos Indicadores Físico de qualidade da camada subsuperficial para Argissolo Amarelo distroceso com cana-de-açúcar.	86
Figura 6. Radares dos indicadores físicos da qualidade (IFQs) para duas camadas de um Argissolo Amarelo distroceso em dois sistemas de colheita e diferentes fases da cana-de-açúcar.	88
Figura 7. Capacidades suporte ao crescimento radicular das plantas e armazenamento de água em duas camadas de um Argissolo distroceso em dois sistemas de colheita e diferentes fases da cana-de-açúcar.	92
Figura 8. Índice de qualidade física para duas camadas de um Argissolo distroceso em dois sistemas de colheita e diferentes fases da cana-de-açúcar.	95

- CAPÍTULO III -

Falhas na cultura de cana-de-açúcar e qualidade física de um Argissolo sob colheita semi-mecanizada e mecanizada

Figura 1. Localização experimental, área agrícola da cana-de-açúcar e delimitações da área após plantio em Igarassu, PE, Brasil.	109
Figura 2. Esquema do plantio de cana-de-açúcar, sistema de colheita mecanizado (colheitadeira e transbordo e trator) e sistema de colheita semi-mecanizado (carregadeira e trator com reboque convencional).	110
Figura 3. Parcelamento das áreas de cana-de-açúcar, medição de falhas de cana-de-açúcar.	111
Figura 4. Esquema amostrais de solo nas parcelas de cana-de-açúcar.	112
Figura 5. Distribuição dos parâmetros de falhas de cana-de-açúcar após Plantio (PL), colheita mecanizada (CMz) e semi-mecanizada (CSM).	117
Figura 6. Comparação de médias pelo teste de Tukey do número de falhas em 100 m, falha total e porcentagem de falhas de cana-de-açúcar após Plantio (PL) e colheitas mecanizada (CMz) e semi-mecanizada (CSM).	119

Figura 7. Comparação de médias pelo teste de Tukey entre os índices de qualidade física do solo (IQFS) em duas camadas de um Argissol, cultivado com cana-de-açúcar, em diferentes fases da cultura..... 122

Figura 8. Correlação entre os índices de qualidade físicos (IQFS) das camadas de um Argissol e os parâmetros de quantificações de falhas de cana-de-açúcar nas diferentes fases da cultura..... 124

- CAPÍTULO IV -

Multifractalidade da resistência à penetração e conteúdo de água de um Argissol sob um sistema de cana-de-açúcar semi-mecanizado

Figura 1. Localização experimental e área agrícola de cana-de-açúcar e fotos da marcação da área na fase de plantio em Igarassu, PE, Brasil. 135

Figura 2. Desenho dos transecto na entrelinha (E) e linha (L) do plantio de cana-de-açúcar e respectivos pontos de avaliação. 137

Figura 3. Resistência à penetração (R_p) de um Argissol em três profundidades ao longo do transecto da entrelinha (E) e Linha (L), antes e após a colheita semi-mecanizada de cana-de-açúcar. 141

Figura 4. Conteúdo de água (U) em um Argissol em três profundidades ao longo do transecto da entrelinha (E) e Linha (L), antes e após a colheita semi-mecanizada da cana-de-açúcar..... 142

Figura 5. Comparação de médias das interações das fases, transectos e profundidades da resistência à penetração (R_p) do solo sub colheita semi-mecanizada de cana-de-açúcar. 146

Figura 6. Comparação de médias das interações dos transectos e profundidade do conteúdo de água no solo (U) do solo sub colheita semi-mecanizada de cana-de-açúcar. 147

Figura 7. Função de partição $\chi(q, \delta)$ para tamanhos de segmentos sucessivos em Fases diferentes, q [-10, 10], com incrementos de 2, para resistência à penetração (R_p) do solo em três profundidade do transecto na entrelinha (E) antes e após a colheita cana-de-açúcar..... 149

Figura 8. Dimensão generalizada da resistência à penetração (R_p) e conteúdo de água (U) do solo em três profundidades do transecto na entrelinha (E) antes e após a colheita de cana-de-açúcar (PL e PC). 151

Figura 9. Dimensão generalizada da resistência à penetração (R_p) e conteúdo de água (U) do solo em três profundidade do transecto na linha (L) antes e após a colheita de cana-de-açúcar (PL e PC). 152

Figura 10. Espectro multifractal da resistência à penetração (R_p) e conteúdo de água (U) do solo em três profundidades do transecto na entrelinha (E) antes e após a colheita de cana-de-açúcar (PL e PC) calculados nas fases estatísticas de ordem q_+ , 1, q_- , 2. 156

Figura 11. Espectro multifractal da resistência à penetração (R_p) e conteúdo de água (U) do solo no transecto da linha (L) antes e após a colheita de cana-de-açúcar (PL e PC) calculados nas Fases estatísticas de ordem q_+ , 1, q_- , 2..... 158

RESUMO

O decréscimo da produção da cana-de-açúcar, ao longo dos ciclos, pode estar ligado com o aumento de falhas e perda de qualidade física do solo, que por sua vez, relaciona-se, entre vários fatores, com a compactação do solo pelo tráfego de máquinas agrícolas nas fases de colheita, bem como os danos diretos nos colmos da cana. Quando esse tráfego é realizado sem controle ou sem ajuste ao plantio, as máquinas trafegam não só na entre linhas da cana, mas também, sobre as linhas de cana, elevando o risco de compactação e perda da qualidade do solo, que envolve mudanças nas propriedades físicas do solo, como aumento da densidade e resistência à penetração do solo. Essas propriedades do solo usualmente respondem com alta variação, impedindo compreender a compactação, pois, além dessa variação, diferentes fatores incidem na compactação, como: uso e manejo do solo, variação espaço-temporal, textura etc. Várias técnicas têm sido utilizadas (estatística clássica, geoestatística) para seu estudo, mas ainda se faz necessário utilizar outras técnicas, como por exemplo, as análises multifractais que permitam avaliar essas respostas a múltiplas escalas. Nesse sentido, objetivou-se comparar as mudanças físico-mecânicas do solo, a qualidade física do solo, a ocorrência de falha, em diferentes fases da cana-de-açúcar e a multifractalidade da resistência à penetração e umidade do solo sob diferentes sistemas de colheita. Em um talhão de 18 ha foram eleitas duas áreas de 1 ha, para comparar a compactação do solo e a ocorrência de falhas, em diferentes fases da cana-de-açúcar e sob colheita mecanizada e semi-mecanizada. Para avaliação da compactação foram consideradas principalmente a densidade, conteúdo de água no solo, macroporosidade, água disponível para as plantas, resistência à penetração e conteúdo de carbono orgânico; para a ocorrência de falhas foi considerado o número, tamanho e porcentagem. Após a primeira colheita de cana-de-açúcar, o tráfego no sistema semi-mecanizado causou principalmente o aumento da densidade do solo, resistência à penetração e diminuição da macroporosidade, provocando redução na qualidade física do solo, principalmente na capacidade de suporte ao crescimento radicular; essa redução da qualidade teve correlação negativa com o aumento das ocorrências de falhas na cana-de-açúcar, evidenciando aumento de 30% das falhas com a primeira colheita. As análises fractais evidenciaram ambientes multifractais da resistência à penetração e conteúdo de água no solo, destacando que após o tráfego da colheita semi-mecanizada homogeneizaram as escalas dos valores tornando as respostas monofractais.

Palavras-chaves: Agricultura, falhas de cana-de-açúcar, multifractalidade, *Saccharum spp.*, tráfego agrícola.

ABSTRACT

The decrease in sugarcane production, throughout the cycles, may be linked to the increase in gaps and loss of soil physical quality and this is related, among several factors, to soil compaction, the traffic of agricultural machinery in the harvesting phases, as well as the direct damage to the sugarcane stalks. When this traffic is carried out without control or adjustment to the plantation, the machines travel not only between the sugarcane lines, but also over the sugarcane lines, increasing the risk of compaction and loss of soil quality, which involves changes in the physical properties of the soil, increased density and soil penetration resistance. These soil properties usually respond with high variation, making it difficult to understand compaction, because, in addition to this variation, different factors affect compaction, such as: soil use and management, spatial-temporal variation, texture, etc. Several techniques have been used (classical statistics, geostatistics) for their study, but it is still necessary to use other techniques, such as, for example, the multifractal analysis that allows to evaluate these responses at multiple scales. In this sense, the objective was to compare the physical-mechanical changes of the soil, the physical quality of the soil, the occurrence of gaps, in different phases of the sugarcane and the multifractality of the soil penetration resistance and moisture under different harvest systems. In an 18 ha plot, two 1 ha areas were elected to compare the compaction of the soil and the occurrence of gaps, in different phases of sugarcane and under mechanized and semi-mechanized harvesting. For the evaluation of the compaction, the density, water content in the soil, macroporosity, water available for the plants, penetration resistance and organic carbon content, were mainly analyzed; the occurrence of gaps was also evaluated by determining the number, size and percentage of gaps. After the first sugarcane harvest, the traffic in the semi-mechanized system caused mainly an increase in soil density, penetration resistance and decrease in macroporosity, causing reduction in soil physical quality, mainly in the capacity to support root growth. This reduction in quality had a negative correlation with the increase in the occurrence of gaps in sugarcane, showing an increase of 30% in gaps with the first harvest. Fractal analyses showed multifractal environments of penetration resistance and water content in the soil, highlighting that after the semi-mechanized harvest traffic homogenized the scales of values making the responses monofractal.

Keywords: Agriculture, sugarcane gaps, multifract, *Saccharum spp.*, agricultural traffic.

INTRODUÇÃO

Atualmente, o Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar. Na Safra 2020 foram produzidos 63 milhões de toneladas de cana-de-açúcar em uma área plantada de 8,5 milhões de hectare, processando cerca de 29,8 milhões de toneladas de açúcar (CONAB, 2020). As áreas cultivadas encontram-se distribuídas em quase todo o território nacional, porém, segundo o IBGE (2020), três regiões são principais: Sudeste (63,3%), Centro-oeste (20,3%) e Nordeste (9%), e segundo a Conab (2020) a média produtiva nacional de cana-de-açúcar 75 t ha^{-1} .

Porém ainda há regiões abaixo dessa média, como a região Nordeste com 56 t ha^{-1} , sendo os Estados de Alagoas e de Pernambuco apresentam a maior área plantada de cana, produzindo ambos próximos, $59,6$ e $51,6 \text{ t ha}^{-1}$, respectivamente.

Entre as técnicas para melhorar a eficiência do trabalho em campo, destaca-se o preparo do solo, crucial para reduzir os limitantes edáficas (solos tabuleiros, susceptíveis ao adensamento) melhorar as condições físicas e facilitar o crescimento da cana-de-açúcar. Para otimizar o processo da colheita de cana, no Estado de Pernambuco, vem sendo implementado o sistema de colheita totalmente mecanizada, pois tradicionalmente, o sistema semi-mecanizado tem prevalecido na região.

O sistema semi-mecanizado é caracterizado pela queima antecipada da cana para o corte manual, o qual é executado linha a linha, e para o carregamento é utilizado um trator com um braço hidráulico e no transporte, utiliza-se os reboques e caminhões convencionais, percorrendo a totalidade da área plantada.

Diferentemente do sistema anterior, o sistema mecanizado utiliza máquinas mais robustas, a colhedora e transbordos tracionados por tratores, realizando corte e transporte, efetuando a colheita sem queima da cana. A colhedora é uma máquina sobre esteiras, equipada com um sistema de corte, e o transbordo formado por um trator agrícola, equipado com dois vagões para a carga e transporte. As máquinas trabalham simultaneamente e em paralelo, deslocando-se ao longo das entrelinhas da área de cana.

Nessa transição entre os sistemas de colheita, discussões têm sido levantadas sobre as vantagens e desvantagens de cada um dos sistemas, que incluem os efeitos de compactação, degradação do solo e a deterioração do canavial ao longo dos ciclos. Apesar das diferenças e a maneira de executar a colheita da cana-de-açúcar, ainda é recorrente a compactação do solo pelo tráfego dessas máquinas, pois trafegam intensivamente, com elevadas cargas que transmitem tensões ao solo, rearranjando suas partículas e causando

mudanças nas propriedades físicas do solo, como altas densidades e resistências à penetração, conseqüentemente, diminuição dos espaços porosos.

Nessas áreas de cana é usual observar redução da produção ao longo dos ciclos e a redução da longevidade e produtividade, podendo estar relacionadas com as práticas de colheita utilizadas, que causam danos físicos diretos sobre a cana, aumentando a ocorrência de falha, ou indiretamente pela compactação do solo que diminui progressivamente sua qualidade física e cria condições desfavoráveis para o desenvolvimento das rebrotas da cana-de-açúcar após cada colheita.

Nesse contexto, prevenir a ocorrência generalizada da compactação, confinando-a em locais específicos, como o tráfego nas entrelinhas do sistema mecanizado, tem sido uma estratégia utilizada. Assim, a compactação do solo pode ser estudada a partir dos diferentes efeitos causados nas propriedades físicas do solo e para avaliar os impactos desses sistemas de colheita podem ser desenvolvidos índices de qualidade física do solo em torno as capacidades de armazenamento de água e suporte ao crescimento radicular.

Atualmente com o desenvolvimento de indicadores de qualidade e o geoprocessamento de imagens, obtida via drone, para o monitoramento das falhas nos canaviais, podem ser gerados estudos mais precisos de maneira espacial e temporal, viabilizando encontrar relações entre a ocorrência dessas falhas, com a compactação gerada pelo tráfego das máquinas agrícola.

Entretanto é vidente que as respostas físicas do solo, como a resistência à penetração e conteúdo de água no solo têm apresentado alta heterogeneidade de maneira espacial e temporal, somadas com as variações que acontecem, por exemplo, quando trafegam máquinas, e que dificultam ainda mais o entendimento da compactação. Em função dessas heterogeneidades, a análises multifractal têm-se tornado uma alternativa para poder descrever essa complexidade, pois através da segmentação em diferentes escalas procura-se encontrar auto similaridade entre os objetos estudados.

Nessa transição de sistema colheita semi-mecanizado para mecanizado e com o atual aumento das áreas mecanizadas de cana-de-açúcar, tornam-se importantes todas as análises e avaliações, pois pode-se esperar que com a transição para o sistema mecanizado, os efeitos de compactação do solo e a ocorrência de falhas diminuam, permitindo otimizar de maneira sustentável o sistema canavieiro. Sendo assim, objetivou-se avaliar e comparar a compactação, qualidade física do solo e ocorrência de falhas nas diferentes fases da cana-de-açúcar sob o sistema de colheita mecanizado e semi-mecanizado.

- REVISÃO DE LITERATURA –

REVISÃO DE LITERATURA

1. A cultura da cana-de-açúcar no Brasil

Depois do milho e da soja, a cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum L.*) vem se destacando desde sua entrada no Brasil, entre as principais culturas do país, pois, é uma das grandes alternativas e de importância para a agroindústria sucro-alcooleira, com destaque no setor de biocombustíveis para a produção de etanol, tornando-a em uma das principais fontes de renda e emprego (CONAB, 2020).

Atualmente, o Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, com destaque para a exportação de açúcar, seguido pela Índia e China. Na Safra 2020, o Brasil produziu cerca de 29,8 milhões de toneladas de açúcar, em 63 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, com área plantada de, aproximadamente, 8,5 milhões de hectare de cana (CONAB, 2020).

A produção no Brasil encontram-se distribuídas em quase todo o território nacional, segundo o IBGE (2020), em 5 grandes regiões, sendo as três principais: Sudeste (63,3%), Centro-oeste (20,3%) e Nordeste (9%). Essa diferença na participação na produção de cana-de-açúcar está muito envolvida e principalmente com a quantidade de área colhida, mas também com a produtividade de cada região.

Para o ano de 2020, segundo a Conab (2020) o Brasil, em média, terá uma produtividade 75 t ha^{-1} , e as regiões com a maior produtividade são o Sudeste e Centro-oeste (77 t ha^{-1}), e a mais baixa na região Nordeste (56 t ha^{-1}).

Na região Nordeste, os maiores produtores de cana-de-açúcar são os Estados de Alagoas e de Pernambuco, e em produtividade, ambos se encontram bastante próximos, sendo o Estado de Alagoas com média de $59,6 \text{ t ha}^{-1}$ e Pernambuco $51,6 \text{ t ha}^{-1}$ (CONAB, 2020).

Nesse contexto, o Estado de Pernambuco conta com 252 mil hectares de cana, 93% de área colhida, 5% renovada e 2% em mudas, com o qual, a Safra de 2020 teve uma produção de 12 milhões de toneladas de cana, produzindo 1,6 milhões de toneladas de açúcar e destinando 34% para produção de etanol (CONAB, 2020; IBGE, 2020).

Na região Nordeste duas variedades de cana-de-açúcar são amplamente exploradas, a RB86 7515 e a RB92 579. A variedade RB86 7515 apresenta crescimento rápido, maturação tardia, considerada de alta produtividade agrícola e adapta-se bem em solos arenosos de média/baixa fertilidade. A colheita é realizada a meados da safra ou bem no final, além disso, é tolerante à seca; da mesma maneira, variedade RB92 579 é

considerada também muito produtiva, mas, em contrapartida, altamente exigente em água (MARQUES & SILVA, 2008; TAVARES *et al.*, 2015).

A fase de crescimento da cana pode durar entre 400 e 500 dias após plantio, embora pode ser dividido em três fases principais: na primeira fase, o crescimento da planta é lento, durando em torno de 200 dias após plantio; na segunda fase, o crescimento se torna mais rápido (<200 dias) e a planta acumula 75% do total de sua massa, e na fase final, o crescimento se torna novamente lento, o acúmulo de massa total pode chegar em 11% (OLIVEIRA & FREITAS, 2008; ALMEIDA *et al.*, 2008).

Entre as técnicas para melhorar a eficiência do trabalho em campo, destaca-se o preparo do solo, sendo crucial e entre as práticas mais utilizadas no Estado de Pernambuco, principalmente para reduzir os limitantes edáficas (solos tabuleiros, susceptíveis ao adensamento), por exemplo, tratores equipados com diferentes implementos são utilizados para realizar a desestruturação da camada de 0,0 a 0,40 m do solo, e tem como objetivo, melhorar as condições físicas e facilitar o crescimento da cana-de-açúcar contribuído para o aumento da produtividade (HASAN, 2012; SOUZA, 2012).

Dentre os implementos utilizados está o sulcador, que com as abas metálicas têm a finalidade abrir e delimitar o espaçamento das linhas e entrelinhas do cultivo, bem como a largura e profundidade do sulco (0,30 – 0,40 m) propiciando melhor distribuição das plantas na área (BALASTREIRE, 1987; VIZZOTTO, 2014). Na etapa de plantio é utilizado um caminhão para carregar e transportar os colmos da cana, o qual desloca-se na área de plantio e manualmente os colmos de cana são dispostos sobre os sulcos.

Após 12 meses, a colheita de cana é realizada, sendo necessário corte, carregamento e transporte, e nesse momento, pode ser feita a colheita em duas formas, cana-queimada e cana-crua, ou seja, podem ser utilizados dois diferentes sistemas de colheita, a colheita mecanizada ou semi-mecanizada, respectivamente.

Na colheita semi-mecanizada, tratores, reboques e carregadeira são utilizadas para realizar a colheita de cana-de-açúcar; os cortes da cana são realizados manualmente, porém, anteriormente ao corte é realizada a queima, com o propósito de agilizar e facilitar o corte, logo a após, a carregadora percorre a área para carregar a cana e coloca-la nos reboques dos tratores ou caminhões.

No sistema mecanizado são utilizadas, somente, a colhedora e transbordos; essas duas máquinas executam a colheita sem a necessidade de queima, nem o corte manual, pois a colhedora realiza o corte, picado e transferência da cana aos transbordos (máquina de

carga e transporte) para o respectivo transporte da cana, além da separação da palha e depositá-la como cobertura vegetal sobre o solo.

Segundo Ortiz *et al.* (2017) em termos gerais o ciclo da cana poderia ser compreendido assim: o primeiro ano é o começo, iniciando com o preparo solo, utilizando a gradagem aradora e gradagem de nivelamento, logo após, sulcada para delimitar o espaçamento entre as linhas de plantio (1,0 – 1,5 m) para realizar o plantio da cana-de-açúcar; durante 12 meses após plantio, lavouras de manutenção e tratos culturais (irrigação, controle de pragas, etc.) são realizadas e finalmente a primeira colheita é realizar, com o corte, carregamento e com transporte mecanizado da cana-de-açúcar. Nos 4 anos seguintes os processos de manejo são repetidos, não havendo preparo de solo, nem plantio, pois, a cana-de-açúcar tem a capacidade rebrotas que permitem a continuidade e produção, e em condições favoráveis podem ser aproveitadas colheitas até por 5 anos.

2. Mecanização agrícola nas áreas de cana-de-açúcar

Durante as últimas décadas, a agropecuária brasileira apresentou evoluções importantes na produtividade da cana-de-açúcar. Em 1960 a produtividade foi cerca de 34 t ha⁻¹, e mais recentemente, em 2010 aumentou para 79 t ha⁻¹ (AMATO NETO, 1985; MOLINA, 2017).

Embora, nesse mesmo período também existiram áreas utilizadas na agropecuária em 64,8% da área total, coincidentemente, a mecanização agrícola também aumentou, por exemplo, o número de tratores, desde o ano 1950 até 2006, aumento 1.184,6%, superando as 780 mil unidades (MOLINA, 2017).

Segundo Nogueira (2001) pelos dados de 1999 da ANFAVEA, a frota de tratores de rodas, que era de 62,7 mil em 1960, atingiu um valor máximo histórico de 551 mil em 1985, e desde então apresenta decréscimo, atingindo cerca de 460 mil unidades em 1998.

Com a necessidade de modernizar e aumentar as produções e produtividades agrícolas, desde a década de 60, os índices da mecanização foram elevados, promovendo a indústria das colhedoras na região Sul do país. Dez anos depois (1970) o governo estimulou a produção de cana-de-açúcar para a geração de álcool, principalmente no Estado de São Paulo e algumas regiões do Nordeste; desde então, a quantidade de áreas plantadas em todo o país vem aumentando, e com isso, a mecanização da cana com destaque para a colheita mecanizado (AMATO NETO, 1985; TEIXEIRA, 2005).

Após o aumento do uso dessas tecnologias, o sistema de colheita mecânica da cana-de-açúcar tem se intensificado pela necessidade de produção, e segundo Guimarães

Júnnyor *et al.* (2019) essa mecanização na cana-de-açúcar, que anos depois, também foi ainda mais intensificada com a proibição da prática de queima; e segundo Lisboa *et al.* (2019) que desde 2007, ~90% da colheita no Brasil já é realizada mecanicamente e sem queima, porém na região Nordeste o panorama ainda é totalmente contrário, ou seja, ainda são utilizadas as colheitas semi-mecanizadas que precede a queima da palha.

3. Colheita convencional e mecanizada de cana-de-açúcar

A colheita mecanizada da cana-de-açúcar está cada vez mais presente no Brasil, atualmente todo sistema de produção de cana-de-açúcar utiliza alguma máquina agrícola, por exemplo, durante a fase inicial, todo o processo de preparo do solo utiliza tratores equipados com alguma ferramenta para o revolvimento do solo; mas durante a fase de colheita ainda existem diferentes manejos, podendo ser: totalmente manual, ou seja, corte e transporte realizados só por operários (fora de uso), semi-mecanizada (corte manual, carregamento e transporte mecanizado) ou totalmente mecanizada, incluído o corte (RIPOLI, 1996; SILVA & GARCIA, 2009).

O sistema semi-mecanizado é caracterizado pela queima antecipada da cana para o corte manual, realizada para facilitar e agilizar o processo de corte, o qual é executado por operário utilizando ferramentas de corte (facões) (SOUZA *et al.*, 2005; CASTRO *et al.*, 2014).

A prática de queima dos canaviais é amplamente utilizada no Nordeste brasileiro, porém, tal sistema de colheita vem sendo eliminado pelos impactos ambientais. Nesse contexto, priorizando os impactos agrícolas, Tomasini *et al.* (2010) e Castioni *et al.* (2018) reportaram que a queima promove a degradação físicas do solo pela redução de matéria orgânica. Após a queima da cana, o corte manual é executado, sendo realizado linha a linha, organizando-a sobre o solo, em apilhados de cana a cada 7 m; depois disso, a cana é carregada e transportada utilizando a “carregadeira” (trator modificado com um braço hidráulico) para recolhe a cana e transferir aos reboques de caminhões convencionais para seu transporte (RIPOLI, 1996; MASIERO, 2013; ARRUDA, 2016).

No sistema mecanizado, a colheita é realizada sem queima (cana crua) (SILVA & GARCIA, 2009) para o corte da cana é utilizada a colhedora de cana, máquina sobre esteiras, equipada com um sistema de corte, e para a carga e transporte de cana utiliza-se o sistema de transbordo, no qual um trator agrícola está equipado com dois vagões para a carga (NARIMOTO *et al.*, 2019). Em termos gerais o sistema de transbordo conta com

um trator atrelado a dois vagões de transbordo que contam com 4 rodas cada um deles (GALVÃO, 2015).

Estas duas máquinas trabalham simultaneamente e em paralelo da seguinte maneira, a colhedora desloca-se entre e ao longo das entrelinhas de cana, paralelamente o transbordo acompanha o percurso da cortadora para receber a carga de cana e transportá-la, pois, a colhedora realiza o corte e transfere a cana para o transbordo que a carrega e transporta (SCOPINHO *et al.*, 1999; NARIMOTO *et al.*, 2019). Neste sistema de corte, destaca-se a dupla função que realiza a colhedora, elimina os ponteiros e folhas, depositando-os como resíduos culturais sobre a superfície do solo, formando uma cobertura de palha (SOUZA *et al.*, 2005; OLIVEIRA *et al.*, 2014) e a cana como tal é cortada, picada e fracionada e imediatamente transferidos para o sistema de carga e transporte.

Algumas vantagens desse sistema de colheita mecanizado é a eliminação da queima, e com isto disponibilizado a palha e os restos culturais para a cobertura vegetal do solo. Porém, também têm sido identificados problemas agrícolas, referentes a rebrota das socarias e do aumento da compactação do solo (CASTRO *et al.*, 2014; MANHÃES *et al.*, 2015).

De fato, a compactação do solo é um dos problemas que mais repercute no uso intensivo de máquinas, principalmente durante a colheita, onde os veículos agrícolas trabalham intensivamente e com elevadas cargas. Neste contexto, prevenir a ocorrência generalizada da compactação ou confiná-la a locais específicos é uma estratégia que vem sendo avaliada em diversos países, destacando-se a adoção do tráfego controlado como estratégia de solução (GASSEN, 2011; GIRARDELLO *et al.*, 2013).

4. Compactação dos solos agrícolas e qualidade física do solo

As interações entre o solo e máquinas agrícolas muitas vezes pode resultar na compactação do solo, entendida como a diminuição dos espaços porosos que limitam o movimento da água e ar entre o solo, restringindo sua disponibilidade para as plantas. Muitos autores (RAPER, 2005; TAVARES *et al.*, 2011; MENON *et al.*, 2015; MOLINA, 2017) têm definido o fenômeno de compactação, assim: os solos agrícolas estão sujeitos à compactação, devido a fenômenos naturais ou intensificado com o tráfego de máquinas agrícolas que transmitem tensão ao solo e rearranja as partículas, diminuindo os espaços porosos, restringindo a disponibilidade de água e ar para as culturas.

Em termos físicos do solo, a compactação é a modificação estrutural do solo, inicialmente reduz o volume do solo, e diminuindo o número e tamanho de poros, e aumentando a densidade do solo (ESTEBAN *et al.*, 2019; GARCÍA-TOMILLO *et al.*, 2018). Estas mudanças resultam inicialmente na redução da capacidade de infiltração de água no solo e aumento do escoamento superficial (CALONEGO *et al.*, 2017), e em segunda instância, afeta a concentração e distribuição de água nos poros do solo (LIMA *et al.*, 2017).

Vários autores (SOUZA *et al.*, 2014; SORACCO *et al.*, 2015; BURGOS *et al.*, 2019) têm reportado essa relação entre compactação com o aumento da densidade do solo e a diminuição da porosidade, especificamente na redução dos macroporos e aumento de microporos, alterando a capacidade de retenção e disponibilidade água no solo, ou seja, quanto mais baixa a densidade, maior a capacidade de armazenamento de água, e segundo Pires *et al.* (2017), a retenção de água no solo é crucial para o desenvolvimento das plantas, pois, é o meio armazenar água para suprir as plantas, significa que quanto, mas equilibrado seja a quantidade de macro e microporos, maior a capacidade de armazenamento e disponibilidade de água para as plantas.

Segundo Raper (2005) a compactação do solo varia naturalmente com o tipo de solo; solos arenosos têm densidades com volume naturalmente mais altas do que solos argilosos, devido ao maior número de poros de maior tamanho do que nos solos argilosos. Os valores de densidade de solos argilosos ou siltosos variam normalmente de 1,00 a 1,60 Mg m⁻³, dependendo de sua condição e histórico. Areias normalmente variam de 1,20 a 1,80 Mg m⁻³ e solos compactados podem exibir valores de densidade cerca de 2,00 Mg m⁻³ se forem severamente trafegados.

Do ponto de vista do crescimento radicular das plantas, a compactação também limita o crescimento das raízes pelo aumento da resistência a penetração do solo. Segundo Molina (2017) o impedimento por compactação, resulta na concentração radicular nas camadas mais superficiais do solo. Entre outros aspectos relacionados com o crescimento radicular da planta e a compactação; Otto *et al.* (2011) e Ramzan *et al.* (2019) anotaram que a velocidade de germinação das plantas é reduzida e o crescimento afetado pela falta de disponibilidade de água e nutrientes no solo.

Segundo Gorucu *et al.* (2011) a compactação do solo varia em função da profundidade e do preparo e manejo dos solos, pois, através da resistência à penetração tem sido possível medir a força de resistência em camadas mais profundas, do que a superficial (20, 30 e 40 cm) com valores de resistência que podem variar, mas geralmente, quanto

mais elevada (> 3 MPa) maior a compactação e maior a limitação para o crescimento radicular das plantas.

Assim, a compactação do solo pode ser estudada a partir dos diferentes efeitos causados nas propriedades físicas do solo, pois, mostram-se sensíveis aos usos de máquinas agrícolas, e que afetam diretamente a relação água, solo e planta. Desde então, muitos pesquisadores brasileiros (SEVERIANO *et al.*, 2010; LOZANO *et al.*, 2013; LIMA *et al.*, 2015; TAVARES *et al.*, 2015) têm estudado e avaliado a compactação em solos agrícolas, conseguindo definir os efeitos diretos nas propriedades físicas, sua relação com água e componentes orgânicos, como também, os efeitos secundários causados nos processos hidrodinâmicos, biológicos e químicos, influenciando nas produções agrícolas e prejuízos ambientais.

Entre os métodos para detecção da camada compactada do solo, Masiero (2013) dividiu em três grupos principais: i) Visuais, subjetivos ou grosseiros: sinais que indicam o efeito da compactação como, os sintomas que a planta pode expressar (a lenta emergência de plântulas, plantas mais baixas, sistema radicular raso e/ou pouco desenvolvido), mas também, podem ser sinais diretos do solo como, a formação de crosta na superfície, rastros dos tratores, aumento de requerimento de potência para o preparo do solo, etc. ii) Métodos precisos: determinação peso específico do solo e percentagem de poros; iii) métodos intermediários: taxa de difusão de oxigênio, condutividade hidráulica saturada, resistência do solo à penetração.

Vale a pena destacar também que entre os vários estudos (TAVARES *et al.*, 2012; LOZANO *et al.*, 2013; CAMBI *et al.*, 2015; ISMOILOV *et al.*, 2015) também têm analisado e relacionado os processos de transmissão de tensões e a resistência mecânica do solo, causado pelo uso dos veículos agrícolas e o controle de cargas dos veículos, momento e intensidade do tráfego adequado, para reduzir os efeitos negativos da compactação no solo; de fato, a compactação do solo é um dos principais desafios da agricultura contemporânea mundial (GIRARDELLO *et al.*, 2013).

4.1 Geometria Fractal no estudo da compactação solo

A variabilidade espacial e temporal têm sido uma das técnicas mais utilizadas para interpretar a variação e respostas das propriedades do solo ou plantas. Através do semivariograma a geoestatística pretende explicar tendências ou respostas através de ajustes a diferentes modelos matemáticos, porém entre os interesses dos cientistas está a

interpretar e caracterizar através de um único valor a maior quantidade de informação possível.

A heterogeneidade do solo em diferentes escalas foi o principal incentivo para introduzir a geometria fractal, pois, em princípio, permite analisar a complexidade geométrica e a caracterização com pouca carga numérica, como por exemplo, os índices fractais (MIRANDA *et al.*, 1999; CARVALHO *et al.*, 2002; VIDAL-VÁZQUEZ *et al.*, 2013).

A geometria fractal foi proposta em 1978 por Mandelbrot (MANDELBORT, 1978) como nova ideia sobre a topologia dos objetos não regulares. Esta geometria estabelece um conjunto de ferramentas matemáticas para a análises de objetos não regulares e não convencionais. O termo fractal define os objetos ou fenômenos espaciais e/ou temporais e que são contínuos, mas não diferenciáveis, e também apresentam correlação espacial em diferentes escalas (MIRANDA *et al.*, 1999; EMBRAPA, 2008).

Os fractais têm sido classificados como: fractais auto-semelhaça, auto-afins e multifractais, que tomam como princípio a auto-similaridade, ou seja, a propriedade da invariabilidade da escala, ou também, que um fractal possui um número imenso de pequenas cópias dele próprio (KORVIN, 1992; MIRANDA *et al.*, 1999). Porém a maior contribuição do conceito fractal é a dimensão fractal, que permite medir e classificar os objetos heterogêneos.

Entretanto, um fractal apresenta uma forma geométrica de aspecto irregular, que pode ser infinitamente dividido em formas similares, e que podem ser consideradas como uma réplica de um todo (MANDELBORT, 1978).

Entre as técnicas utilizadas para estimar as propriedades de escalonamento do conjunto fractal é a “*Box-counting*”, que utilizando diferentes grades ou malhas construídas a partir do centro de gravidade da estrutura é possível conhecer a dimensão fractal. As malhas são construídas a partir de um quadrado original, onde o centro geométrico coincide com o centro de gravidade da estrutura, e as análises, interpretações são realizadas com espectro fractal (EMBRAPA, 2008).

Em termos básicos, o resultado de uma análise multifractal é um gráfico conhecido como espectro fractal, que representa as distorções que afetam um dado, em diversidades expoentes de escala (CHHABRA & JANSEN, 1989); e diferentes parâmetros, desse espectro, ajudam na interpretação das respostas dos dados, como: curvatura, simetria, número de dimensões fractal, de entropia, de correlação, podendo relacionar esses

parâmetros, por exemplo, com outros parâmetros relacionados com as variações do solo, como a heterogeneidade dos poros (POSADAS *et al.*, 2003).

Sendo assim, uma resposta multifractal pode ser considerada como um fractal desuniforme, caracterizada por um conjunto interligado de infinitos fractais, que por sua vez, estão formados por um conjunto de pontos com o mesmo valor e que apresentam uma dimensão fractal.

Nesse sentido, segundo Miranda, (2006) inicialmente pode ser afirmado que um solo tem características de um fractal perfeito, tornando-se um objetivo de estudo e pode fornecer respostas que permitam descrever com maior precisão os processos que ocorrem no solo, podendo ser comprovados com métodos mais tradicionais, como a geometria euclidiana.

A geometria fractal tem sido recentemente utilizada nos estudos agrícolas, como por exemplo, para entender a variação espacial das repostas de porosidade e a distribuição dos agregados do solo, como também, o pH, concentração de nutrientes, retenção de água e a condutividade elétrica do solo (CARVALHO *et al.*, 2002). Na ciência do solo, Rieu e Sposito (1991) realizaram o primeiro estudo fractal para as características do solo, surgindo como uma nova alternativa de análise, para o estudo na área de pedologia, principalmente para os estudos físicos do solo.

Mais atualmente, aplicada na agricultura brasileira, Vidal-Vázquez *et al.* (2010) pesquisaram o efeito do preparo do solo na rugosidade da superfície do solo, através das técnicas da geometria fractal aplicada na geoestatística. Outros estudos também, analisaram e compararam os padrões de escala e a heterogeneidade da textura, pH, carbono orgânico etc., mostrando que a heterogeneidade da escala e a variabilidade na distribuição espacial das propriedades do solo estão reforçadas pela interação de várias fontes naturais ou antropogênicas (VIDAL-VÁZQUEZ *et al.*, 2013).

A técnica de multifractal também tem sido importante para o controle e manejo da compactação do solo nas áreas de cana-de-açúcar, segundo Siqueira *et al.* (2013) no estudo da resistência à penetração em solos cultivados com cana-de-açúcar, as análises multifractais sugeriram que essa resistência vertical apresentou satisfatoriamente uma estrutura fractal e descreveu o arranjo e dependência espacial na profundidade do solo.

4.2 Qualidade de solos agrícolas

O solo é um corpo natural que envolve interações dinâmicas que influenciam o planeta como um todo, o clima da terra, o ciclo hidrológico também, pode ser considerado como grande meio de desenvolvimento para uma versatilidade de comunidades de organismos

vivos e, além disso, o solo desempenha um importante papel ambiental, já que se comporta como um grande biorreator de processo físico-químicos que decompõe resíduos e recicla-os como nutrientes para a continuidade da vida na Terra (HILLEL, 1998).

Devido as suas múltiplas funções e da importância para manter efetivamente os serviços nos ecossistemas e para toda a biosfera em geral, Doran e Parkin (1994), Larson e Pierce (1994), MEA (2005), Singer e Ewing (2000), e Stefanoski *et al.* (2013) colocam o solo como um recurso altamente importante e essencial para o bem-estar humano, pois, através desse é possível obter recursos necessários para a sua existência e desenvolvimento, pelo qual o seu estudo torna-se de grande importância para otimizar o uso e sustentabilidade desse recurso.

Nos anos 90 foi introduzido o conceito de qualidade do solo (QS) ou saúde do solo (*soil health*), (Araújo *et al.*, 2012; Melo Filho *et al.*, 2007; Karlen *et al.*, 2003; e Machado e Mielniczuk, 2009), pois muitos autores encontraram que assim como a qualidade do ar e da água têm grandes impactos na saúde, a qualidade do solo também influencia na saúde das pessoas, dando origem aos diferentes significados e holísticos focos para ser definido, mesmo assim, todos têm em comum a capacidade do solo para funcionar efetivamente no presente e no futuro.

Para Doran e Parkin (1994) e Warkentin e Fletcher (1977) a QS tem sido difícil de definir e quantificar, uma vez que pode ser uma característica abstrata (varia com o enfoque de estudo) que depende de fatores externos, tais como: tipo, uso e práticas de manejo do solo, ecossistemas e interações ambientais e prioridades sócio-políticas.

No ano 1997 a Sociedade Americana de Ciências de Solo (KARLEN *et al.*, 1997) conceituaram a QS como “a capacidade de um dado solo funcionar, dentro dos limites de um sistema natural ou manejado, mantendo a produtividade vegetal e animal, possibilitando manter ou melhorar a qualidade da água e do ar, e permitir suportar a saúde humana e habitacional.

Quando se fala de avaliação da QS, também está se referindo à sustentabilidade, de modo que, a QS precisa ser vista com uma perspectiva sistemática, formado por três componentes principais, físico, químico e biológico, e além disso, com os pilares da sustentabilidade (produtividade, segurança, proteção, viabilidade e aceitabilidade) procurando garantir a ótima funcionalidade do solo e do sistema como um todo (ARAÚJO *et al.*, 2012; DEXTER, 2004; NORTCLIFF, 2002; SMYTH & DUMANSKI, 1995; SOJKA & UPCHURCH, 1999; USDA-NRCS, 2015).

De acordo com Chaves *et al.* (2012) e Silva *et al.* (2015), as alterações na QS podem ser avaliadas por comparação das propriedades do solo, medida pela mensuração do estado atual de determinados atributos do solo em comparação com o estado natural do solo (sem interferências antrópicas) ou com estados ideais, através do uso de um conjunto mínimo de indicadores que apresentem características como facilidade de avaliação, aplicabilidade em diferentes escalas, utilização abrangente e sensibilidade a variações de manejo.

4.3 Qualidade física de solo agrícolas

Conservar e manter a viabilidade e uso dos recursos naturais como o solo é de grande preocupação para as pessoas, agricultores, e como também, nas instituições governamentais e não governamentais, mostrando a necessidade de obter os Índices de Qualidade do Solo (IQS) que não só alertam o estado crítico do solo, mas também, estimulem a continuar a necessidade de pesquisar pela sustentabilidade e da qualidade ambiental (DORAN & PARKIN, 1994; DORAN, 1997; HUFFMAN *et al.*, 1998; KARLEN *et al.*, 2001; MACHADO & MIELNICZUK, 2009).

Apesar das crescentes preocupações com a degradação do solo, ainda não existem critérios universais para avaliar as mudanças da qualidade do solo, pelo qual é necessário obter metodologias que permitam registrar essas mudanças, avaliar condições e observar mudanças temporais, e segundo Cruz *et al.* (2004) e Dumanski *et al.* (2005) os indicadores de qualidade devem permitir realizar esse tipo de seguimentos no atual uso e manejo dos solo agrícolas.

O propósito principal, em uma visão mais geral, desses indicadores de qualidade são: *i*) promover a produtividade do sistema sem perder as propriedades físicas, químicas e biológicas; *ii*) diminuir a poluição ambiental; e *iii*) favorecer a saúde da terra, plantas, animais e humana como foi proposto por Karlen *et al.* (1997) e García *et al.* (2012).

Para Karlen *et al.* (2003), e Stefanoski *et al.* (2013) um indicador de qualidade do solo, e mais especificamente no sistema físico, esses indicadores físico de qualidade do solo (IFQS) devem cumprir alguns requisitos: (a) de algum modo influenciar o processo para o qual a avaliação está sendo feita; (b) permitir a comparação com alguma condição definida como padrão; (c) ser sensível e permitir a detecção de diferenças em escala pontual no tempo e no espaço; (d) monitorar os impactos das intervenções antrópicas, e (e) ajudar a determinar a sustentabilidade do sistema.

Para Doran e Parkin (1996), Maserá *et al.* (1999) e Ramírez (2004) os IFQS também deveriam cumprir alguns outros critérios básicos: a) correlacionar-se com os processos naturais do ecossistema (aspecto de funcionalidade), b) ser fácil de utilizar em campo, de modo que, especialistas como também produtores possam usá-los (aspecto de simplicidade nos processos de extensão rural) e, c) ser suscetível às variações climáticas e de manejo.

A utilização do ISQS deveriam permitir relacionar as diversas funcionalidade e contribuir para determinar a qualidade do solo (QS) neste caso, as funcionalidades estariam ligadas diretamente com a relação do sistema água-solo e planta, ou seja: a) reguladora de processos bióticos (suprimento de minerais e água para as plantas); b) reguladora e controladora do fluxo de bio-elementos (ciclagem de nutrientes); c) regulador das trocas gasosas entre a atmosfera; e) condução e distribuição da água em fluxos hidrológicos (KARLEN; STOTT, 1994).

Para Adriaanse (1993), os IFQS devem, além de cumprir as funções nos ambientes, ser instrumentos de análises que permitem simplificar, quantificar os fenômenos complexos. Para Karlen *et al.* (2003) os indicadores potenciais de qualidade do solo em função das propriedades físicas, incluem mais especificamente: a retenção de água, distribuição da água no solo, condutividade hidráulica, como também, propriedades mecânicas, resistência à penetração.

Segundo GARCÍA *et al.* (2012) em base das funções diretamente relacionadas com o uso da água no solo, sugeriu que a estrutura, a densidade do solo, a estabilidade de agregados, a infiltração, suas profundidades (principalmente a camada superficial), a sua capacidade de retenção de água e a condutividade hidráulica, são características físicas do solo que deveriam ser utilizados como IQFS.

O seguinte passo, para dar lugar à avaliação da qualidade do solo, é a sua mensuração, comparação e análises dos IFQS em relação com uma função, propriedade, processos e/ou resposta do solo, pelo qual os IFQS devem de alguma maneira: (a) influenciar a função para a qual está sendo avaliado; (b) sejam mensuráveis e comparados a padrões definidos; e (c) sejam sensíveis o bastante para mostrar diferenças em escala espacial ou temporal (MELO FILHO *et al.*, 2007; KARLEN *et al.*, 1997; LAL, 1999).

No estudo de qualidade Stefanoski *et al.* (2013) propuseram uma classificação hierárquica a partir do grau relativo de dificuldade de obtenção e, além disso, a interdependência das propriedades físicas (a modificação de uma delas, leva a modificação das demais), foram classificadas assim: (I) primários, aqueles mais

facilmente mensuráveis, obtidos por medidas diretas de campo ou de laboratório e (II) secundários, aqueles que, normalmente, são derivados de dados obtidos no campo e/ou no laboratório (indicadores primários), mas que exigem certo grau de tratamento estatístico ou modelagem, sendo de mais difícil interpretação.

Segundo Arshad e Martin (2002), os indicadores físicos primários do solo são: a densidade do solo, resistência à penetração, agregação (>2mm), porosidade total, infiltração, condutividade hidráulica saturada; e para Stefanoski *et al.* (2013), os secundários são: curva de retenção de água, parâmetro ou índice-S, intervalo hídrico ótimo e, índice de Reynolds.

Para Doran e Parkin (1994) os atributos físicos do solo que sofrem mudanças pelos manejos do solo classificam-se como, intermediários, como são: a densidade do solo, a resistência à penetração, permeabilidade, aeração, agregação, porosidade e umidade do solo; isso significa que a qualidade física do solo também estaria governada indiretamente pelo uso de sistemas de cultivo e o uso de matéria orgânica no solo, assim, quando exposto a cultivos intensivos e sem uso de matéria orgânica, aumentam os riscos e problemas no solo, já que, pode perder ou ter sua estrutura original alterada, formação de camadas compactadas, redução no volume dos poros, aumento da densidade e da estabilidade dos agregados (MARIA *et al.*, 2007; RIBON *et al.*, 2014).

Através da avaliação e dos estudos de qualidade do solo, como é mencionado por Doran e Parkin (1994), vem a responsabilidade de devolver a vitalidade atual e assegurar os recurso para as gerações futuras; “À medida que trabalhamos nossas terras para produzir alimentos, vamos deixando um legado de jardim ou deserto?” (HABERERN, 1992). Nossas abordagens para definir e avaliar a qualidade do solo deve ser moldada por esses usos finais.

5. Falhas no plantio de cana-de-açúcar

A compactação dos solos canavieiros está fortemente vinculada com a perda acelerada e sucessiva da produção, pois, são inumeráveis os danos causados, principalmente sobre os colmos, brotes e rebrotes, que afetam a emergência, como também, o nulo crescimento do colmo pela própria morte, reduzindo o número de colmos efetivos por linha (MANHÃES *et al.*, 2015).

O uso intensivo de técnicas como mecanização agrícola, intensificando-se ainda mais com as operação de colheita e, como consequência desse tráfego (inadequado e desorganizado), o crescimento e desenvolvimento das plantas é negativamente alterado,

com a redução da produtividade e até os ciclos culturais (PRIETO, 2010; CAVALIERI *et al.*, 2011), por exemplo, durante os processos de colheita, segundo Benedini e Silva (2010) os problemas mais comuns sobre os colmos são: pisoteio e arranque das soqueiras, ocasionando redução do vigor de rebrota ou deixando perdas permanentes, que podem ser traduzidas em falhas na cana-de-açúcar.

Segundo Neves *et al.* (2004), Magalhães *et al.* (2006), Silva *et al.* (2008) e Roque *et al.* (2010) entre as perdas de matéria prima, podem ser consideradas, as perdas dos colmos, por arranque da soqueira, resultantes do corte basal da colhedora de cana-de-açúcar, as quais resultaram em perdas vegetais no campo e estendendo-se a redução do número de cortes do canavial.

Este problema tem sido estudado desde o início da mecanização agrícola, sendo observado que essas perdas na cana-de-açúcar têm incrementando com o uso das máquinas, desde então, denomina-se como “falha”; segundo Stolf *et al.* (2016) são espaços vazios, sem colmos nas linhas de cana-de-açúcar e ocorre quando um número de gemas deixa de brota, sendo sua ocorrência associadas à diminuição da produtividade.

Este estudo tem como foco avaliar as falhas ocasionadas por ações mecânicas, quer dizer, por uso de máquinas agrícolas durante as fases de colheita que causam danos diretos nas plantas de cana, ou também indiretamente por consequência da compactação, dessas máquinas, no solo; embora as falhas de cana também estão relacionadas com outros tipos de causas, por exemplo, ambiental, fitopatológicas ou intrínsecas da variedade de cana-de-açúcar, que não serão o ponto de avaliação.

5.1 Falhas por ações mecânicas

Um dos maiores problemas apontado no plantio mecanizado é a ocorrência de falhas, ocasionadas pelas ações mecânicas diretamente sobre os colmos da cana-de-açúcar ou indiretamente pelas cargas transmitidas através do solo sobre o colmo (RODRIGUES *et al.*, 2013; RODRIGUES *et al.*, 2014). Para Serafim *et al.* (2013) os danos causados nos colmos de cana, pelas práticas realizadas em campos, por exemplo, a colheita, podem ser consideradas falhas por fatores fitotécnicos.

Alguns autores (MAGRO *et al.* 2011 e MANHÃES *et al.* 2015) consideram que a colheita mecanizada pode causar danos diretos, pelas pisadas sobre os colmos da cana-de-açúcar, mas também, através da compactação do solo, aumentando a resistência à penetração das raízes, ou por outras limitantes como diminuição da disponibilidade de

água para a planta, que resulta em efeitos ao crescimento radicular evitando-se assim a brotação.

O arranque da cana durante as colheitas é outro dano reportado como ação mecânica e acontecendo durante o corte da cana, realizado com as máquinas colhedoras; geralmente, envolvidos com o inadequado ajuste das laminas de corte, gerando grande volume de perdas, tanto de massa, como por deterioração do plantio, que incluem de aumento de falhas ou diminuição de brotes (MELLO & HARRIS, 2003; MELLO, 2005).

Atualmente para a reduzir o efeito das falhas por ações mecânicas, a quantidade de mudas utilizadas no plantio foram progressivamente aumentando, ou seja, no sistema semi-mecanizado de cana-de-açúcar, geralmente 4 t ha⁻¹ de mudas são utilizadas, e com o atual sistema de colheita mecanizado são utilizadas 24 t ha⁻¹ (RODRIGUES *et al.*, 2013; VOLTARELLI, 2013).

5.2 Identificação de falhas em cana-de-açúcar

A identificação de falhas nos plantios de cana-de-açúcar é um tema bastante crucial, embora, com poucas técnicas para serem contabilizadas e avaliadas. No propósito de ter um controle sobre estes problemas, têm sido desenvolvidos metodologias que ajudam identificar, contabilizar e medir.

Entre as primeiras metodologias para a avaliação de falhas no Brasil, pode ser citada o método de Stolf (STOLF, 1986), mais conhecido e utilizado como base para a avaliação de ocorrência de falhas na cana-de-açúcar, basicamente as medições são realizadas em campo e de maneira manual, e considera uma falha como uma projeção da distância entre duas canas consecutivas ao longo da linha, e apresentam uma distância >0,50 m, subsequentemente são contados e acumulados os comprimentos das falhas detectadas.

Segundo Magro *et al.* (2011) o momento mais adequado, para a identificação, avaliação e contagem de falhas, é durante a brotação da cana-de-açúcar; o momento de brotação compreende ao período que vai desde o plantio até a compleição da brotação das gemas, ou seja, após 2 ou 3 meses da brotação, momento propício para realizar as medições.

Com avanço do conhecimento sobre falhas de cana e as novas tecnologias, novas metodologias foram desenvolvidas para sua avaliação e detecção. Frasson *et al.* (2007) propuseram o levantamento manual, mediante a utilização de um sensor ótico ativo, que permitiu, em média a 1,0 m de distância do alvo, passando a pé com o sensor na mão

sobre as linhas de cana-de-açúcar, gerar imagens com dois comprimentos de onda (660 nm vermelho e 770 nm infravermelho próximo) e poder calcular automaticamente o índice de vegetação (NDVI) e correlacionar com as porcentagens de falhas.

Com a técnica de uso de sensores orbitais espectrais (satélites) vários autores têm estudado as respostas da cana-de-açúcar, nas diferentes fase e estágios do plantio, conseguindo aperfeiçoá-la, por exemplo, Aguiar *et al.* (2008) usando imagens do sensor MODIS periodicamente, detectaram 95% das áreas de cana numa região; Picoli *et al.* (2009) através de um agrônômico ajustado, estimaram a produtividade agrícola de talhões de cana-de-açúcar; Cavalcante (2011) comparou os valores de falhas coletados diretamente em campo, com aqueles estimados por sensores, permitindo obter valores de falhas comparáveis àqueles obtidos com a leitura manual; Pereira *et al.* (2016) utilizando imagens do satélite (Landsat 8/OLI) e por meio de um modelo calibrado estimou a área foliar da cana-de-açúcar.

Molin *et al.* (2016) desenvolveram um sistema baseado em um sensor fotoelétrico, que permitiu examinar o canavial, georreferenciando as falhas e apresentando essas informações em forma de mapa. O coletor de dados é instalado em um trator que passa sobre as linhas, com uma velocidade de 1,3 a 3,0 m s⁻¹, finalmente é gerado um mapa e dados com informação das falhas.

Atualmente “veículos aéreos não tripulados”, equipados com sensores vêm sendo empregadas na agricultura, capazes de detectar e registrar a radiação eletromagnética e gerar informações na forma de figura, gráfica ou de tabelas.

Stolf *et al.* (2016) realizou a comparação entre a avaliação de falhas em cana-de-açúcar utilizando o processamento de imagens aéreas de alta precisão e método convencional (terrestre); o processamento de imagem foi dividido basicamente em duas etapas: identificação das linhas de cana-de-açúcar e a etapa de identificação das falhas nas linhas de plantio. Porém a técnica de medição de falhas em cana-de-açúcar ainda precisa ser melhorada.

A detecção, contagem, avaliação e controle das falhas no plantio de cana-de-açúcar, torna-se de grande importância para a sustentabilidade e competitividade desta cultura, pois a modernização das técnicas agrícolas, priorizam a automatização e organização deste processo, exigindo otimizar eficientemente as produções em campo.

Bibliografia

- Adriaanse, A. (1993). Environmental policy performance indicators: A study on the development of indicators for environmental policy in the Netherlands. Ed. Sdu Uitgeverij Koninginnergrach: The Netherlands, p. 175.
- Aguiar, D. A.; Friedrich, B.; Rudorff, T.; Rizzi, R.; Shimabukuro, Y. E. (2008). Monitoramento da colheita da cana-de-açúcar por meio de imagens MODIS. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 60, p. 375–383.
- Almeida, A. C. S.; Souza, J. L.; Teodoro, I.; *et al.* (2008). Desenvolvimento vegetativo e produção de variedades desenvolvimento vegetativo e produção de variedades de cana-de-açúcar em relação à disponibilidade hídrica e unidades térmicas. *Ciência e Agrotecnologia*. v. 32, p. 1441–1448.
- Amato Neto, J. (1985). A indústria de máquinas agrícolas no Brasil: origens e evolução. *Revista de Administração de Empresas*, v. 25, p. 57–69.
- Araújo, E. A.; Ker, J. C.; Neves, J. C. L.; Lani, J. L. (2012). Qualidade do solo: conceitos, indicadores e avaliação. *Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias*, v. 5, p. 187–206.
- Archer, M.; Szklo, A. (2016). Can increasing gasoline supply in the United States affect ethanol production in Brazil. *Renewable Energy*, v. 95, p. 586–596.
- Arruda, E. M.; Almeida, R. F.; Silva Domingues, L. A.; *et al.* (2016) Q. Soil porosity and density in sugarcane cultivation under different tillage systems. *African Journal of Agricultural Research*, v. 11, n. 30, p. 2689-2696.
- Arshad, M. A.; Martin, S. (2002). Identifying critical limits for soil quality indicators in agro-ecosystems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, v. 88, p. 153-160.
- Balastreire, L. A. (1987). Máquinas agrícolas. São Paulo: Manole, 1987. 310p.
- Barros, F. F.; Milan, M. (2010) Qualidade operacional do plantio de cana-de-açúcar. *Bragantia*, v.69, 221-229.
- Benedini, M. S.; Silva, A. L. (2010). Perdas de cana na colheita mecanizada. *Canavieiros: a força que movimenta o setor*. Sertãozinho, v.5, p.28-31.
- Burgos Hernández, T. D.; Slater, B. K.; Tirado Corbalá, R.; Shaffer, J. M. (2019). Assessment of long-term tillage practices on physical properties of two Ohio soils. *Soil & Tillage Research*, v. 186, p. 270–279.
- Calonego, J. C.; Raphael, J. P. A.; Rigon, J. P. G.; *et al.* (2017). Soil compaction management and soybean yields with cover crops under no-till and occasional chiseling. *European Journal of Agronomy*, v. 85, p. 31–37.
- Cambi, M.; Certini, G.; Neri, F.; Marchi, E. (2015). The impact of heavy traffic on forest soils: A review. *Forest Ecology and Management*, v. 338, p. 124–138.
- Campos, L. H.; Carvalho, S. J.; Christoffoleti, P. J.; *et al.* (2010). Sistemas de manejo da palhada influenciam acúmulo de biomassa e produtividade da cana-de-açúcar (var. RB855453). *Acta Scientiarum - Agronomy*, v. 32, p. 345–350.
- Carvalho, J. R. P.; Dechen, Scf; Dufranc, G. (2002). Uso da geometria fractal na avaliação da variabilidade espacial de parâmetros de agregação do solo em São Paulo. *Simpósio Internacional de Agricultura de Precisão*, v. 2, 2002.

- Castioni, G. A.; Cherubin, M. R.; Menandro, L. M. S.; et al. (2018). Soil physical quality response to sugarcane straw removal in Brazil: A multi-approach assessment. *Soil & Tillage Research*, v. 184, p. 301–309.
- Castro, S. G.; Franco, H. C.; Mutton, M. Â. (2014). Harvest managements and cultural practices in sugarcane. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 38, p. 299–306.
- Cavalcante, D. S. (2011). Estudo com sensores para a mensuração de falhas nas fileiras de cana de açúcar (*Saccharum SSP.*). 2011. 74f. Dissertação de Mestrado. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- Cavaliere, K. M.; Carvalho, L. D.; Silva, A. D.; et al. (2011). Qualidade física de três solos sob colheita mecanizada de cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 35, p. 1541-1549.
- Chaves, A. A.; Lacerda, M. P.; Goedert, W. J.; et al. (2012). Indicadores de qualidade de Latossolo Vermelho sob diferentes usos. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v. 42, p. 446-454.
- Chhabra, A.; Jensen, R. V. (1989). Direct determination of the $f(\alpha)$ singularity spectrum. *Physical Review Letters*, v. 62, p. 1327.
- Companhia Nacional De Abastecimento - CONAB. (2020) Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar. Brasília: CONAB, v.6, p. 62.
- Cruz, A. B.; Barra, J. E.; Castillo, R. F.; Gutiérrez, C. (2004). La calidad del suelo y sus indicadores. *Revista Ecosistemas*, v. 13, p. 90-97.
- Dabbas, K. M.; Inês, M.; Ferro, T. (2006). Genes diferencialmente expressos em cana-de-açúcar inoculada com *Xanthomonas albilineans*, o agente causal da escaldadura da folha. *Summa Phytopathologica*, p. 328-338.
- de Lima, R. P.; da Silva, A. P.; Giarola, N. F.; et al. (2017). Changes in soil compaction indicators in response to agricultural field traffic. *Biosystems Engineering*, 162, 1-10.
- Dexter, A. R. (2004). Soil physical quality part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma*, v. 120, p. 201–214.
- Doran, J. W. (1994). Defining soil quality for sustainable environment (No. 631.4 D313d). Wisconsin, US: Soil Science Society of America.
- Doran, J. W. (1997). Soil quality and sustainability. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 26, 1997, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.
- Doran, J. W.; Parkin, T. B. (1994). Defining and assessing soil quality. *Soil Science Society of America Journal*, n. 35, p. 20.
- Doran, J. W.; Parkin, T. B. (1996). Quantitative indicators of soil quality: a minimum data set. In: Doran, J. W.; Jones, A. J. (Ed.). *Methods for assessing soil quality*. Soil Science Society America Journal, v. 49, p.25-37.
- Dumanski, J.; Gameda, S.; Pieri, C. (1998). Indicators of land quality and sustainable land management. Washintong: Library of Congress Cataloging-in-Publication Data.
- Durigan, J. C.; Timossi, P. C; Leite, G. J. (2004). Controle químico da tiririca (*Cyperus Rotundus*), com e sem cobertura do solo pela palha de cana-de-açúcar. *Planta Daninha*, v. 22, p. 127–135.

- EMBRAPA. (2008) Aplicação da Técnica Multifractal para Caracterização de Manejo de Solo. Documentos 41. p.34.
- EMBRAPA. (2017). Solos do Nordeste. 2014. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1003864/solos-do-rdeste>. Acesso em: 05/06/2017.
- Esteban, D. A.; de Souza, Z. M.; Tormena, C. A.; et al. (2019). Soil compaction, root system and productivity of sugarcane under different row spacing and controlled traffic at harvest. *Soil & Tillage Research*, v. 187, p. 60–71,
- Frasson, F.R.; Molin, J.P.; Salvi, J.V.; et al. (2007). Utilização de sensor ótico ativo no diagnóstico de falhas de plantio em cana-de-açúcar. *STAB*, v.26, p. 34-37.
- Galvão, C. B. (2015). Gestão operacional do transbordo de cana-de-açúcar: análise do custo de reparo e manutenção (CRM).
- García, Y.; Ramírez, W.; Sánchez, S. (2012). Indicadores de la calidad de los suelos: una nueva manera de evaluar este recurso. *Pastos y Forrajes*, v. 35, p. 125–137.
- García-Tomillo, A.; Figueiredo, T. de; Dafonte, J. D. (2018). Effects of machinery trafficking in an agricultural soil assessed by Electrical Resistivity Tomography (ERT). *Open Agriculture*, v. 3, p. 378–385.
- Gassen, D. (2011). Tráfego controlado como alternativa para reduzir a compactação do solo. *Revista Plantio Direto*, v.111, p. 4-10.
- Girardello, V. C.; Amado, T. J. C.; Misiewicz, P.; Smith, E. K. (2013). Tráfego controlado de máquinas agrícolas: a experiência inglesa e perspectivas de adoção no Sul do Brasil. *Revista Plantio Direto*, v. 137.
- Gorucu, S.; Khalilian, A.; Han, Y. J.; et al. (2001). Variable Depth Tillage Based on Geo-Referenced Soil Compaction Data in. 2001 ASAE Annual International Meeting, v. 01–1016.
- Haberern, J. (1992). Coming full circle-the new emphasis on soil quality. *American Journal of Alternative Agriculture*, v. 7, p. 3-4.
- Hasan, A. H. (2012). Impact of tractor wheel passage during soil tillage on some soil characteristics and productivity of barely. *Journal of Applied Sciences Research*, v.8, p. 3552-3562.
- HILLEL, D. (1998) Daniel. *Environmental soil physics: Fundamentals, applications, and environmental considerations*. Elsevier. p. 801.
- Huffman, E.; Eilers, R. G.; Padbury, G.; Wall, G.; MacDONALD, B. (2000). Canadian Agri-Environmental indicators related to land quality: Soil cover, soil erosion, soil salinity and risk of water contamination. In *CONGRESS OF SOIL SCIENCE (Vol. 16)*.
- IBGE - Instituto Brasileiro De Geografia E Estatística. (2020). Indicadores IBGE: Levantamento Sistemático da Produção Agrícola, Estatística da Produção Agrícola. v.30 p.44-46.
- Ismoilov, A.; Sellgren, U.; Andersson, K.; Löfgren, B. (2015). A comparison of novel chassis suspended machines for sustainable forestry. *Journal of Terramechanics*, v. 58, p. 59–68.

- Júnnyor, W. D.; Diserens, E.; De Maria, I. C.; et al. (2019). Prediction of soil stresses and compaction due to agricultural machines in sugarcane cultivation systems with and without crop rotation. *Science of the Total Environment*, v. 681, p. 424–434.
- Karlen, D. L.; Andrews, S. S.; Doran, J. W. (2001). Soil quality: current concepts and applications. *Advance in Agronomy*, v. 74, p. 1-40.
- Karlen, D. L.; Ditzler, C. A.; Andrews, S. S. (2003). Soil quality: Why and how? *Geoderma*, v. 114, p. 145–156.
- Karlen, D. L.; Mausbach, M. J.; Doran, J. W.; et al. (1997). Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation. *Soil Science Society of America Journal*, v. 61, p. 4–10.
- Korvin, G. (1992). *Fractal models in the earth sciences* (v. 396). Amsterdam: elsevier.
- Lal, R. (1999). Métodos para a avaliação do uso sustentável dos recursos solo e água nos trópicos. Jaguaríuna: Embrapa Meio Ambiente. p.97.
- Larson, W. E.; Pierce, F. J. (1994). The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management. *Soil Science Society American*, v. 35, p. 68-78.
- Lima, R. (2013). Modelos de capacidade de suporte de carga e suas relações com atributos físicos e mecânicos em Argissolo Amarelo Distrocoeso. 2013. 72f. Dissertação de Mestrado – UFRPE, Recife.
- Lima, R. P.; Rolim, M. M.; Oliveira, V. S.; et al. (2015). Load-bearing capacity and its relationships with the physical and mechanical attributes of cohesive soil. *Journal of Terramechanics*, v. 58, p. 51–58.
- Lisboa, I. P.; Cherubin, M. R.; Satiro, L. S.; et al. (2019). Applying Soil Management Assessment Framework (SMAF) on short-term sugarcane straw removal in Brazil. *Industrial Crops and Products*, v. 129, p. 175–184.
- Lozano, N.; Rolim, M. M.; Oliveira, V. S.; et al. (2013). Evaluation of soil compaction by modeling field vehicle traffic with SoilFlex during sugarcane harvest. *Soil & Tillage Research*, v. 129, p. 61–68.
- Machado, F.; Mielniczuk, J. (2009). Revisão de literatura: uma visão sobre qualidade do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 33, p. 743-755.
- Magalhães, P. S.; Milan, M.; Molin, J. P.; et al. (2006) Colheita de cana-de-açúcar e palha para a produção de Etanol. In: workshop-colheita, transporte e recuperação de palha. Campinas: Universidade Estadual de Campinas.
- Magro, F. J.; Takao, G.; Camargo, P. E.; Takamatsu, S. Y. (2011). Biometria em cana-de-açúcar. 2011. LPV0684: Produção de Cana-de-Açúcar. USP, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, SP.
- Mandelbrot, B. B. *Les objets fractals: La Recherche*. (1978), v.9, p. 5-13.
- Manhães, C.; Garcia, R. F.; Francelino, F. M. A.; et al. (2015). Factors that affect sprouting and tillering of sugar cane. *Revista Vértices*, v. 17, 163–181.
- Maria, I. C.; Kocssi, M. A.; Dechen, S. C. (2007). Agregação do solo em área que recebeu lodo de esgoto. *Bragantia*, v. 66, p. 291-298.
- Marques, T. A.; Silva, W. H. (2008). Crescimento vegetativo e maturação em três cultivares de cana-de-açúcar. *Revista de Biologia e Ciências da Terra*, v.8, p.54-60.

- Masera, O., Astier, M., López-Ridaura, S. (1999). Sustentabilidad y manejo de recursos naturales: el marco de evaluación MESMIS.
- Masiero, F.C. (2013) Produtividade e compactação do solo em diferentes ciclos anuais da cultura de cana-de-açúcar. 2013. 96f. Teses de Doutorado – UNESP, Botucatu, SP.
- MEA. (2005). Ecosystem and human well-being: synthesis. Washington: Island Press, 2005. 137p.
- Mello, R. C. (2005). Influência do formato e velocidade da lâmina nas forças de corte para cana-de-açúcar. *Acta Scientiarum. Agronomy*, v. 27, p. 661-665.
- Mello, R.C.; Harris, H. (2003). Desempenho de cortadores de base para colhedoras de cana-de-açúcar com lâminas serrilhadas e inclinadas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 7, p. 355-358.
- Melo Filho, J. F.; Souza, A. L.; Souza, L. D. (2007). Determinação do índice de qualidade subsuperficial em um Latossolo Amarelo Coeso dos Tabuleiros Costeiros, sob floresta natural. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 31(6), 1599-1608.
- Menon, M.; Jia, X.; Lair, G. J.; et al. (2015) Analysing the impact of compaction of soil aggregates using X-ray microtomography and water flow simulations. *Soil & Tillage Research*, v. 150, p. 147–157.
- Miranda, V.; Chomiczak, S.; Paz, A. (1999). Teoría fractal y efecto de cambio de escala: aplicación al estudio de la porosidad del suelo. *Cadernos Lab. Xeolóxico de Laxe*, v. 24, p. 21.
- Molin, J. P.; Veiga, J. P.; Molin, J. P.; Veiga, J. P. (2016). Spatial variability of sugarcane row gaps: measurement and mapping. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 40, p. 347–355.
- Molina Junior, W. F. (2017). Comportamento mecânico do solo em operações agrícolas. Piracicaba: ESALQ/USP.
- Narimoto, L. R.; Camaraotto, J. A.; Alves, F. J. (2019) A Cooperação no corte mecanizado da cana-de-açúcar: um estudo multi-caso. *Revista Ação Ergonômica*, v. 13, p. 60–70.
- Neves, J. L.; Magalhães, P. S.; Ota, W. M. (2004). Sistema de monitoramento de perdas visíveis de cana-de-açúcar em colhedora de cana picada. *Engenharia Agrícola*, v.24, p.764-70.
- Nogueira, A. C. L. (2001). Mecanização na agricultura brasileira: uma visão prospectiva. *Caderno de Pesquisas em Administração*, v. 08, p. 77–87.
- Nortcliff, S. (2002). Standardisation of soil quality attributes. *Agriculture Ecosystem Environmental*, v. 88, p. 161-168.
- OCDE, FAO. (2016). Perspectivas agrícolas 2016-2025.
- Oliveira, A. P.; Lima, E.; Anjos, L. H.; et al. (2014). Sistemas de colheita da cana-de-açúcar: conhecimento atual sobre modificações em atributos de solos de tabuleiro. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 18, p. 939–947.
- Oliveira, A. R.; Freitas, S. P. (2008). Phyto-Sociological Survey of Weed in Sugarcane Crop Areas. *Planta Daninha*, v. 26, p. 33–46.
- Oliveira, F. G.; Andrade, C. F. (2009) Ocorrência de *Diatraea saccharalis* (Lepidoptera; Pyralidae) em plantações de cana-de-açúcar (Magnoliophyta; Poaceae) em diferentes localidades, no município de Paraty (RJ). *Ciência et Praxis*, v. 2, p. 7–10.

- Ortiz, P. F.; Rolim, M. M.; De Lima, J. L.; et al. (2017) Physical qualities of an Ultisol under sugarcane and Atlantic forest in Brazil. *Geoderma Regional*, v. 11, p. 9-14.
- Otto, R.; Silva, A. D.; Franco, H. C.; et al. (2011). High soil penetration resistance reduces sugarcane root system development. *Soil & Tillage Research*, v. 117, p. 201–210.
- Pereira, R. M.; Casaroli, D.; Vellame, L. M.; et al. (2016). Sugarcane leaf area estimate obtained from the corrected normalized Difference Vegetation Index (NDVI). *Revista Agropecuária Tropical*, v. 46, p. 140–148.
- Picoli, M. C.; Rudorff, B. F.; Rizzi, R.; Giarolla, A. (2009). Índice de vegetação do sensor MODIS na estimativa da produtividade agrícola da cana-de-açúcar. *Bragantia*, v. 68, p. 789–795.
- Pires, L. F.; Borges, J. A.; Rosa, J. A.; et al. (2017). Soil structure changes induced by tillage systems. *Soil & Tillage Research*, v. 165, p. 66–79.
- Posadas, A. N.; Giménez, D.; Quiroz, R. et al. (2003). Multifractal characterization of soil pore systems. *Soil Science Society of America Journal*, v. 67, p. 1361-1369.
- Prieto, O. Estudio del desempeño ambiental del recurso suelo. Estudio de caso, Municipio Encrucijada. 2010. 89f. Tesis de maestria, Universidad Central Martha Abreu de Las Villas, Santa Clara.
- Ramírez, M. (2004). Indicadores de estado: factores biológicos que limitan la calidad agrícola de los suelos. Primer Taller Nacional sobre indicadores de calidad de suelo. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). Palmira, Colombia.
- Ramzan, S.; Pervez, A.; Wani, M. A.; et al. (2019). Soil health: Looking for the effect of tillage on soil physical health. *Int. J. Chem. Stud*, v. 7, p. 1731–1736.
- RAPER, R. L. (2005). Agricultural traffic impacts on soil. *Journal of Terramechanics*. v.42, p.259-280.
- Ribon, A. A.; Centurion, J. F.; Centurion, M. A.; (2014). Alterações na estabilidade de agregados de Latossolo e Argissolo em função do manejo, na entrelinha da seringueira (*Hevea brasiliensis*). *Revista Árvore*, v. 38, p. 1065–1071.
- Rieu, M.; Sposito, G. (1991). Fractal fragmentation, soil porosity, and soil water properties: I. Theory. *Soil Science Society of America Journal*, v. 55, p. 1231-1238.
- Ripoli, T. C. C. (1996). Ensaio & certificação de máquinas para colheita de cana-de-açúcar. MIALHE, LG Máquinas agrícolas: ensaios & certificação. Piracicaba: Fundação de Estudos “Luiz de Queiroz, 635-73.
- Rodrigues, C.; Storino, M.; Pardiniho, A.P. (2014). Plantio mecanizado na lavoura da cana-de-açúcar: planejamento, preparação, execução e avaliação garantem qualidade à operação. *Revista Canavieiros*, v.8, p.32-34.
- Rodrigues, C.; Tufi, O.; Castilho, P. Z. (2013). Mecanização na lavoura. *Revista Canavieiros*, v.7, p.22-23.
- Roque, A. A.; de Souza, Z. M.; Barbosa, R. S.; de Souza, G. S. (2010). Controle de tráfego agrícola e atributos físicos do solo em área cultivada com cana-de-açúcar. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, v. 45, p. 744–750.
- Scopinho, R. A.; Eid, F.; Eduardo, C.; Vian, D. F. (1999). Novas tecnologias e saúde do trabalhador: a mecanização do corte da cana-de-açúcar. *Cadernos de Saúde Pública*, v. 15, p. 147–161.

- Serafim, L. G.; Stolf, R.; Silva, J. R.; et al. (2013). Influência do plantio mecanizado no índice de brotação da cana-de-açúcar. *STAB*, v.31, p.22-25.
- Severiano, E. D.; Oliveira, G. C.; Dias Júnior, M. D. (2010). Compactação de solos cultivados com cana-de-açúcar: I - modelagem e quantificação da compactação adicional após as operações de colheita. *Engenharia Agrícola*, v. 30, p. 404–413.
- Silva, F. I. C.; Garcia, A. (2009). Colheita mecânica e manual da cana-de-açúcar: histórico e análise. *Nucleus*, v. 6, p. 233–248.
- Silva, G. F.; Santos, D.; Silva, A. P.; Souza, J. M. (2015). Indicadores de qualidade do solo sob diferentes sistemas de uso na mesorregião do agreste paraibano. *Revista Caatinga*, v. 28, p. 25–35.
- Silva, M. D.; Marques, E.; Dal, A.; Lúcio, C. (2008). Perfilamento e produtividade de cana-de-açúcar com diferentes alturas de corte e épocas de colheita. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.43, p. 979–986.
- Simões Neto, D.E (2008). Avaliação da disponibilidade de fósforo e recomendação de adubação fosfatada para cana-planta em solos do Estado de Pernambuco. 2008. 106f. Teses de Doutorado -Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife.
- Singer, M. J.; Ewing, S. (2000). Soil quality. In: SUMMER, M. E. (Ed.). *Handbook of soil science*. New York: CRC Press.
- Siqueira, G. M.; Silva, E. F.; Montenegro, A. A.; et al. (2013). Multifractal analysis of vertical profiles of soil penetration resistance at the field scale. *Nonlinear Processes in Geophysics*, v. 20, p. 529–541.
- Smyth, A. J.; Dumanski, J. A. (1995). Framework for evaluating sustainable land management. *Soil Science Society America Journal*, v. 75, p. 401- 406.
- Sojka, R. E.; Upchurch, D. R. (1999). Reservations regarding the soil quality concept. *Soil Science Society America Journal*, v. 63, p. 1039-1054.
- Soracco, C. G.; Lozano, L. A.; Villarreal, R.; et al. (2018). Temporal variation of soil physical quality under conventional and no-till systems. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 42, p.1-12.
- Souza, G. S. (2012). Controle de tráfego agrícola e seus efeitos nos atributos do solo e na cultura da cana-de-açúcar. 2012. 114f. Dissertação Mestrado - FEAGRI, Campinas.
- Souza, G. S.; De Souza, Z. M.; Cooper, M.; et al. (2014). Controlled traffic and soil physical quality of an Oxisol under sugarcane cultivation. *Scientia Agricola*, v. 72, p. 270–277.
- Souza, Z. M.; Prado, R. D.; Paixão, A. C.; Cesarin, L. G. (2005). Sistemas de colheita e manejo da palhada de cana-de-açúcar. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 40, p. 271–278.
- Stefanoski, D. C.; Santos, G. G.; Marchão, R. L.; et al. (2013). Uso e manejo do solo e seus impactos sobre a qualidade física. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 17, p. 1301–1309.
- Stolf, R. (1986). Methodology for gap evaluation on sugarcane lines. *STAB*. 4, p.12-20.
- Stolf, R.; Garcia, T. B.; Neris, L.; et al. (2016). Avaliação de falhas em cana-de-açúcar segundo o método de stolf utilizando imagens aéreas de alta precisão obtidas por vant. *Revista STAB*, v. 34, p. 32–39.

- Tavares, U. E. (2011). Dependência espacial e comportamento físico e mecânico de um Argissolo de tabuleiros costeiros de Pernambuco. 2011. 65f. Dissertação de Mestrado - UFRPE, Recife.
- Tavares, U. E.; Rolim, M. M.; Pedrosa, E. M.; et al. (2012). Variabilidade espacial de atributos físicos e mecânicos de um Argissolo sob cultivo de cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 16, p. 1206–1214.
- Tavares, U. E.; Rolim, M. M.; Souza, V. (2015). Spatial Dependence of Physical Attributes and Mechanical Properties of Ultisol in a Sugarcane Field. *The Scientific World Journal*, v. 2015, p. 1–10.
- Teixeira, J. C. (2005). Modernização da agricultura no Brasil: impactos econômicos, sociais e ambientais. *Revista Eletrônica AGB-TL*, v. 1, p. 21–42.
- Tomasini, B. A.; Vitorino, A. C.; Garbiate, M. V.; et al. (2010). Infiltração de água no solo em áreas cultivadas com cana-de-açúcar sob diferentes sistemas de colheita e modelos de ajustes de equações de infiltração. *Engenharia Agrícola*, v. 30, p. 1060–1070.
- USDA, N. Soil Quality Institute, 1996. Cover and green manure crop benefits to soil quality. *Soil Quality-Agronomy, Technical Note*, (1).
- Vidal-Vázquez, E.; Camargo, O. A.; Vieira, S. R.; et al. (2013). Multifractal Analysis of Soil Properties along Two Perpendicular Transects. *Vadose Zone Journal*, v. 12, p. 529–541.
- Vidal-Vázquez, E.; Vieira, S. R.; Clerici, I.; et al. (2010). Fractal dimension and geostatistical parameters for soil microrelief as a function of cumulative precipitation. *Scientia Agrícola*, v. 67, p. 78–83.
- Vizzotto, V. R. (2014). Desempenho de mecanismos sulcadores de semeadora-adubadora sobre os atributos físicos do solo em várzea no comportamento da cultura da soja (*Glycine max L.*). 2014. 78f. Teses de Doutorado – UFSM, Santa Maria.
- Voltarelli, M. A. (2013). Qualidade da operação de plantio mecanizado de cana-de-açúcar nos turnos diurno e noturno. 2013. 168 f.
- Warkentin, B. P.; Fletcher, H. F. (1977). Soil quality for intensive agriculture. In: *Intensive Proceedings of the International Seminar on Soil Environment and Fertilizer Management*. National Institute of Agricultural Science, p. 594-598.

- CAPÍTULO I -

Mudanças temporais das propriedades físico-mecânicas e matéria orgânica de um
Argissolo sob diferentes sistemas de colheita de cana-de-açúcar

Mudanças temporais das propriedades físico-mecânicas e matéria orgânica de um Argissolo sob diferentes sistemas de colheita de cana-de-açúcar

RESUMO: A compactação do solo em áreas de cana-de-açúcar é recorrente após cada colheita, causando alterações temporais nas propriedades físico-mecânicas e orgânica do solo, podendo ocasionar a redução da produtividade e a longevidade do cultivo. O tráfego intensivo de máquinas agrícolas, quer seja, no sistema de colheita semi-mecanizado ou mecanizado, tem sido o principal agente na formação de camadas compactadas. Nesse sentido, objetivou-se avaliar as propriedades físico-mecânicas e matéria orgânica de um Argissolo após diferentes fases culturais da cana-de-açúcar, usando o sistema mecanizado e semi-mecanizado. Em duas áreas renovadas de cana-de-açúcar, sendo, uma para colheita mecanizada, e a outra semi-mecanizada, realizaram-se três momentos de amostragens de solo: após plantio e após a primeira e segunda colheita, nas camadas superficial e subsuperficial e nas linhas e entrelinhas do plantio. Com essas amostragens analisaram-se: a densidade, resistência à penetração, macroporosidade, conteúdo e disponível de água, e carbono orgânico do solo. Antes das colheitas, a camada superficial apresentou condições físico-mecânicas favoráveis para a cana-de-açúcar, incluindo altos conteúdos de carbono orgânico ($\sim 0,20 \text{ g kg}^{-1}$). Após a primeira colheita, em ausência de controle de tráfego e independente do sistema de colheita, a camada superficial da linha e entrelinha foi compactada, evidenciando que a densidade e macroporosidade foram as propriedades do solo mais sensíveis ao tráfego de máquinas. Após a segunda colheita, em ambas as áreas, as alterações no solo foram menos acentuadas, no entanto, o conteúdo de água no solo foi diferente entre as áreas, pois no sistema semi-mecanizado que incluiu a queima da palha, reduziu, na superficial, o conteúdo de água ($< 0,10 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) e, conseqüentemente, a resistência à penetração foi mais elevada ($R_p > 3,0 \text{ MPa}$) que na área mecanizada. Entretanto, o sistema de colheita mecanizada conservou a cobertura de palha na superfície, e o conteúdo de água no solo foi $\sim 0,20 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, causando menor resistência à penetração no solo. Dessa forma, a conservação da palha, após cada colheita, principalmente no sistema mecanizado, não só favoreceu os conteúdos de carbono orgânico nas diferentes camadas do solo, senão também, manteve o conteúdo de água no solo mais estáveis, permitindo obter resistência à penetração mais baixas.

Palavras-chave: colheita, compactação do solo, mecanização agrícola, *Saccharum spp.*

Spatio-temporal changes of physical quality in an Argissolo with sugarcane in different harvesting systems

ABSTRACT: Soil compaction in sugarcane areas is recurrent after each harvest, causing temporal changes in the physical-mechanical and organic properties of the soil, which may lead to reduced productivity and longevity of the crop. The intensive traffic of agricultural machinery, be it in the semi-mechanized or mechanized harvest system, has been the main agent in the formation of compacted layers. In this sense, the objective was to evaluate the physical-mechanical properties and organic matter of an Argissolo after different cultural phases of sugarcane, using the mechanized and semi-mechanized system. In two areas renovated with sugarcane, one for mechanized harvesting and the other semi-mechanized, three soil sampling moments were carried out: after planting and after the first and second harvests, in the topsoil and subsoil layers and in the rows and interrows of the planting. With these samples were analyzed: density, penetration resistance, macroporosity, soil moisture and availability water, and organic carbon soil. Before harvests, the topsoil showed favorable physical-mechanical conditions for sugarcane, including high organic carbon contents ($\sim 0.20 \text{ g kg}^{-1}$). After the first harvest, in the absence of traffic control and independent of the harvesting system, the topsoil of the row and interrows was compacted, showing that density and macroporosity were the most sensitive soil properties to machine traffic. After the second harvest, in both areas, the soil changes were less pronounced, however, the soil moisture was different between the areas, because in the semi-mechanized system that included the burning of the straw, this soil moisture was reduced in the soil surface ($< 0.10 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) and, consequently, the penetration resistance was higher ($R_p > 3.0 \text{ MPa}$) than in the mechanized area. However, the mechanized harvesting system conserved the straw cover on the surface, and the soil moisture was $\sim 0.20 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, causing less penetration resistance soil. Thus, the straw conservation, after each harvest, mainly in the mechanized system, not only favored the organic carbon contents in the different soil layers, but also kept the water content in the soil more stable, allowing lower penetration resistance.

Keywords: Agricultural mechanization, harvesting, *Saccharum spp.*, soil compaction.

1. Introdução

O Brasil está entre os países mais importantes na produção de cana-de-açúcar. Na região Nordeste, o Estado de Pernambuco vem implementado a colheita totalmente mecanizada, pois tradicionalmente, o sistema semi-mecanizado prevalece na região e, ainda é utilizada a queima da cana e corte manual; nessa transição têm sido levantadas discussões sobre as vantagens e desvantagens de cada um desses sistemas de colheita, inclusive sobre os efeitos de compactação e degradação do solo (CAPAZ *et al.*, 2013; MA *et al.*, 2014; BASTOS *et al.*, 2016).

Com o tráfego de máquinas facilitado foram otimizado e agilizados os processos agrícolas da cana-de-açúcar, surgindo também os problemas físicos do solo, como altas densidades e resistências à penetração e, como consequência do intensivo tráfego, aumentaram os riscos de erosão e degradação do solo (BOGUNOVIC *et al.*, 2017; GUIMARÃES JÚNNYOR *et al.*, 2019b; ESTEBAN *et al.*, 2019).

Após a fase de preparo do solo, a colheita, no ciclo da cultura da cana-de-açúcar, é o segundo processo mais mecanizado, sendo realizada anualmente e com intenso tráfego de máquinas dentro das áreas agrícolas (GUIMARÃES JÚNNYOR *et al.*, 2019). Vários autores reportaram que, o tráfego de máquinas na colheita causa excessiva compactação do solo (VISCHI FILHO *et al.*, 2017; DE SOUSA *et al.*, 2019; ESTEBAN *et al.*, 2020) formando camadas impeditivas para o crescimento radicular, reduzindo a longevidade do cultivo, e nos casos críticos se faz necessário a renovação do canavial, que incluem onerosos custos no preparo do solo para a eliminação das camadas compactadas (McPHEE *et al.*, 2015; SURENDRAN *et al.*, 2016; AWE *et al.*, 2020).

A ausência do controle de tráfego no tradicional sistema semi-mecanizado causa alta compactação, inclusive nas camadas mais profundas do solo (ORTIZ *et al.*, 2017; SILVA *et al.*, 2018; CAVALCANTI *et al.*, 2019) e de maneira específica, causa efeitos negativos nas propriedades físicas e hídricas do solo (GUIMARÃES JÚNNYOR *et al.*, 2019; SCARPARE *et al.*, 2019); além disso, com a tradicional queima da palha, reduz drasticamente o conteúdo de carbono, aumentando a susceptibilidade à compactação e degradação dos solos (LISBOA *et al.*, 2019; CASTIONI *et al.*, 2019; CHERUBIN *et al.*, 2019).

Como alternativa a esse manejo de colheita semi-mecanizada, o sistema mecanizado ou totalmente mecanizado, utiliza desenhos de plantios ajustados às máquinas permitindo seu tráfego nas áreas agrícolas e sem causar danos diretos no cultivo, pois nesse sistema,

as máquinas são mais robustas, sendo necessário incluir no desenho do plantio, como o das linhas duplas, linhas (entrelinhas) exclusivas para seu tráfego, permitindo controlar e confinar os efeitos de compactação (ROSSI NETO *et al.*, 2018; GÍRIO *et al.*, 2019; ESTEBAN *et al.*, 2019).

Com o sistema de colheita mecanizado, além de ganhar eficiência no processo de colheita, espera-se também reduzir os problemas de compactação, observado no sistema semi-mecanizado de cana-de-açúcar, pois essa poderia ser confinada aos locais das linhas exclusivas do tráfego da colhedora e transbordo (máquinas utilizadas no sistema mecanizado).

Nesse sentido, objetivou-se avaliar propriedades físico-mecânicas e matéria orgânica de um Argissolo após diferentes fases da cana-de-açúcar, usando o sistema mecanizado e semi-mecanizado.

2. Material e métodos

2.1 Sítio experimental

O estudo foi realizado durante os meses de janeiro de 2018 até março de 2020, numa área cultivada com cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) localizada no município de Igarassu, Estado de Pernambuco, Brasil (Fig. 1, ver mapas) altitude de 180 m e conforme classificação de *Köppen*, clima quente e úmido, megatérmico (As') com temperatura média de $\sim 25 \pm 0,31$ °C, com máximos e mínimos de 33,1 e 18,6 °C, umidade relativa média de $\sim 77 \pm 0,95\%$, com máximas e mínimas de 95 e 42%, e precipitação anual de $\sim 1487 \pm 63$ mm variando entre ~ 1304 e 1583 mm ano, para os períodos de 2016 - 2019.

O solo da área foi classificado como Argissolo/*Ultisol* (dos Santos, 2018; Soil Survey Staff, 2014) com boas características para o desenvolvimento da agricultura, porém, com fertilidade natural limitada, predominância de areia com baixos conteúdos de argila e considerado suscetível ao efeito de erosão hídrica (BRADY & WEIL, 2008; dos Santos, 2018).

2.2 Áreas de Estudo

Num talhão de 18 ha (Fig. 1) cultivado com cana-de-açúcar, renovado com preparo convencional do solo em toda a área e em condições de relevo relativamente homogêneas (inclinação $\leq 10\%$) foram delimitadas duas parcelas de 100 × 100 m, denominadas, Área A, a ser colhida com o sistema totalmente Mecanizado, e Área B com o sistema Semi-mecanizado. Em cada uma das áreas experimentais (Áreas A e B) foram delimitados e

marcados pontos espaçados no perímetro das áreas, utilizando-se trena e GPS para a georreferenciação (Fig. 1).

Na área toda foi realizado o preparo convencional do solo (02/2019), constando de subsolagem, gradagem, nivelamento e sulcagens, fazendo uso de tratores e implementos agrícolas. Para a execução do plantio foram utilizados tratores, que carregaram e distribuíram a cana (variedade RB92579) pela área entre os sulcos.

O plantio foi organizado em linhas duplas ou espaçamento combinado, onde um par de fileiras de cana-de-açúcar, com distância de 0,90 m, formam a linha de plantio, e entre cada linha, deixados um espaçamento de 1,40 m para formar as entrelinhas de cana, reservado para o tráfego das máquinas agrícolas.

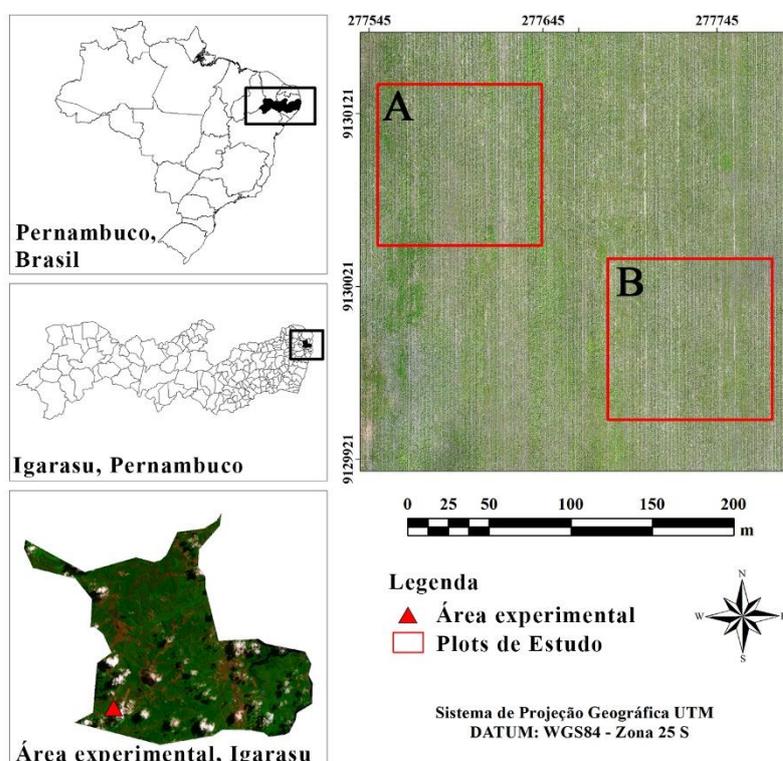


Figura 1. Localização experimental, área agrícola da cana-de-açúcar e delimitações da área após plantio em Igarassu, PE, Brasil.

No sistema mecanizado, todo o processo foi realizado por máquinas e sem controle de tráfego de precisão. Na Área A foi utilizada a colhedora de esteira (modelo CH670) com cortador de base e rolo elevador, com ~20 t de peso, e o sistema de transbordo (trator agrícola e transbordo) com capacidade de 10 t, utilizado para o transporte da colheita.

Para o caso da colheita semi-mecanizada, utilizada na Área B, foi realizada com queima da palha e corte manual; enquanto o carregamento foi realizado com máquinas carregadeiras convencionais (trator com garra hidráulica); e para o transporte, caminhão

e reboque convencionais com capacidade de carregamento de 12 t, destacando a ausência de controle de tráfego em toda a operação.

Na Área A, o processo de colheita, sempre foi mecanizado e em “cana-crua”, ou seja, sem prévia queima da palha, enquanto no caso da Área B, na primeira colheita (C1) o processo foi realizado também com “cana-crua”, embora, na segunda colheita (C2) o foi realizado em “cana-queimada”, efetuada um dia anterior à colheita, eliminando a folhagem para facilitar o corte manual.

Para a caracterização física do solo foram coletadas amostras deformadas, entre a camadas superficial (0–0,20 m) e subsuperficial (0,20–0,40 m) e as análises realizadas no Laboratório de Mecânicas dos Solo e Aproveitamento de Resíduos da UFRPE, conforme Teixeira *et al.* (2017) e NBR 7182 (ABNT, 1986).

Nas características do solo da área cultivada com cana-de-açúcar, Tabela 1, destaca-se a mudança na textura, de areia franca na camada superficial, para franco arenosa nas camadas mais profundas, como também maior conteúdo de matéria orgânica na camada superficial pela prévia adubação com resíduos, torta-de-filtro (20 t ha⁻¹).

Tabela 1. Caracterização do solo e da área de cana-de-açúcar.

Características	Áreas de cana-de-açúcar	
Classe	<i>Ultisol</i> / <i>Argissolo</i> *	
Densidade de partícula (g cm ⁻³)	2,63	
Anos de cultivo	50 anos (Registro. 1969)	
Ciclo produtivo	1	
Fase cultura	Renovação de plantio	
Camada (m)	0 – 0,20	0,20 – 0,40
Textura	Areia Franca	Franco arenoso
Areia (%)	83,36	78,65
Silte (%)	9,07	9,28
Argila (%)	7,57	12,07
Matéria orgânica (g kg ⁻¹)	4,00	2,44
Densidade máxima (g cm ⁻³)	1,90	1,85
Umidade crítica (%)	8,16	8,64

*Sistema brasileiro de classificação de solos (Dos Santos, 2018)

2.3 Variáveis estudadas e experimento

Em cada uma das áreas foram avaliados os efeitos de dois sistemas de colheita de cana-de-açúcar nas propriedades físicas dos solos e em diferentes fases da cultura: após o plantio (PL), após a primeira (C1) e segunda (C2) colheita. As coletas do solo, em todos os casos, foram realizadas após 90 dias de cada operação, após o plantio da cana (PL), primeira e segunda colheita de cana (C1 e C2).

Para a avaliação, inicialmente foi estabelecida, em cada uma das áreas (A e B) uma malha amostral de 20 × 20 m pontos equidistantes (Fig. 2A) e em cada um desses foram

realizadas as respectivas amostragens, tanto na camada superficial e subsuperficial, ou seja, entre a profundidade de 0 - 0,20 m e 0,20 - 0,40 m, respectivamente (Fig. 2B). Além disso, os pontos amostrais estiveram intercalados entre as linhas (L) e entrelinha (EL) plantio, 18 pontos verticais na L e 18 na EL (Fig. 2A e B), totalizando 36 pontos amostrais para 2 camadas (superficial e subsuperficial), 2 áreas (A e B) e 3 épocas de coleta (PL, C1 e C2).

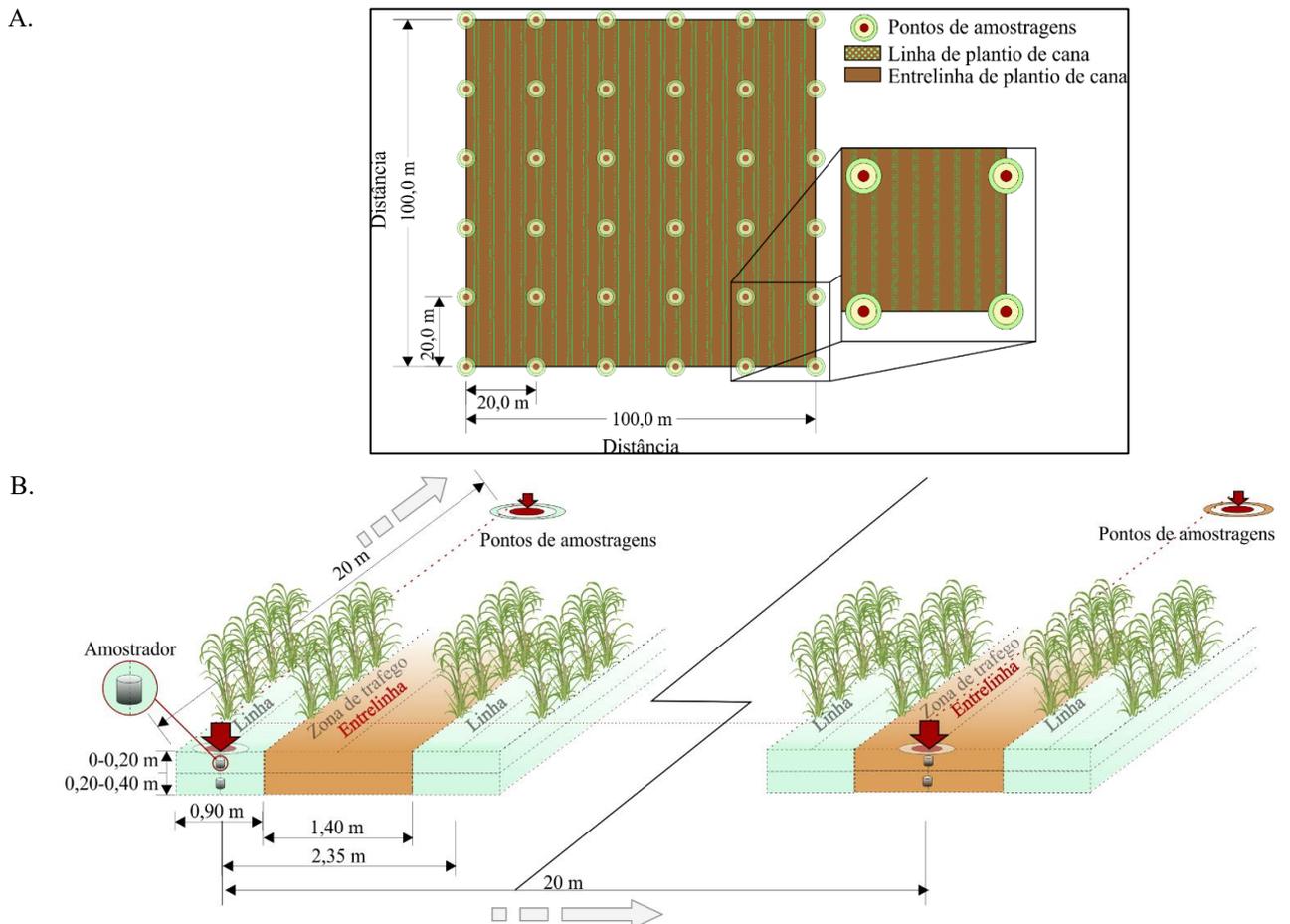


Figura 2. Esquema da malha e pontos amostrais nas linhas e entrelinhas na área de cana-de-açúcar.

Com as amostragens foram realizadas as seguintes avaliações físicas do solo: densidade do solo ($\rho_d - g\ kg^{-1}$), conteúdo de água no solo ($\theta - cm^3\ cm^{-3}$), resistência à penetração do solo ($R_p - MPa$), macroporosidade ($P_{mac} - cm^3\ cm^{-3}$) e água disponível ($\theta_{DIS} - cm^3\ cm^{-3}$); e também foi incluindo o carbono orgânico ($CO - g\ kg^{-1}$).

A ρ_d foi determinada com amostras de solo indeformada, utilizando o amostrador de Ulhand com anéis metálicos de volume interno de $100\ cm^3$; para determinar o θ foi necessário coletar amostras de solo deformado em campo, aplicado o método gravimétrico (TEIXEIRA *et al.*, 2017). Para a determinação da resistência à penetração

(Rp) foi utilizado um penetrômetro de impacto, conforme o modelo de Stolf (1991) e as Rp do solo foram realizadas a cada 0,05 m, até atingir a profundidade de 0,40 m no solo. Para expressar a resistência (MPa) foi aplicada a equação de ajuste proposta por Stolf (1991).

Para a obtenção da P_{mac} e θ_{DIS} foi necessário determinar, os conteúdos de água no solo a diferentes tensões, ou seja, com as amostras indeformadas foi possível obter o ponto de saturação nas amostras (θ_{SAT} - $cm^3 cm^{-3}$) e na câmara de *Richards* foram obtidos os conteúdos de água nas tensões de 6, 10, e 1500 kPa (θ_{6kPa} , θ_{10kPa} , e $\theta_{1500kPa}$ - $cm^3 cm^{-3}$) conforme Teixeira *et al.* (2017), e finalmente foi determinado a P_{mac} e θ_{DIS} aplicando as seguintes equações:

$$P_{mac} = \theta_{SAT} - \theta_{6kPa} \quad \text{Eq. 1}$$

$$\theta_{DIS} = \theta_{10kPa} - \theta_{1500kPa} \quad \text{Eq. 2}$$

Para determinar o conteúdo de carbono (CO) em cada um dos pontos da malha amostral, foram coletadas amostras de 200 g e aplicando a metodologia de titulação proposta por Yeomans e Bremner (1988) foi determinado o conteúdo de CO no solo.

2.4 Análises dos dados

Foram realizadas análises de dados exploratórios através das análises de medidas de tendência centrais, através de cálculos de média, mediana, mínimos e máximos, enquanto a dispersão dos dados através do desvio padrão e para relativizar as variações, também foi aplicado o coeficiente de variação (CV), considerando os critérios de variação de Warrick e Nielsen (1980), ou seja, baixa variação $CV < 0,15$, média $0,15 < CV < 0,5$ e alta com $CV > 0,5$.

O grau de correlação entre as diferentes variáveis também foi avaliado, considerando, para os casos de correlação linear, o coeficiente de Person, e para não linear, o coeficiente de Spearman, bem como o coeficiente de determinação (r^2).

3. Resultados e discussão

3.1. Efeito geral dos sistemas de colheita nas propriedades físico-mecânicas e orgânica do solo

A avaliação das propriedades físicas do solo permitiu observar os efeitos causados pelos diferentes sistemas de colheita (Mecanizado e Semi-mecanizado) inclusive mudanças temporais, ou seja, antes e após cada colheita realizada, e especificamente nas linhas e entrelinha do plantio da cana-de-açúcar.

Na Tabela 2 observa-se a estatística descritiva da ρ_d e R_p do solo, nos diferentes sistemas de colheita Mecanizado (A) e Semi-mecanizado (B) e na camada superficial e subsuperficial do solo. Após plantio (PL) as variáveis apresentaram resultados adequados para o cultivo da cana, ou seja, os valores foram baixos nas camadas superficiais (0,20 m) das duas áreas, a $\rho_d < 1,60 \text{ g cm}^{-3}$ e a $R_p < 1,82 \text{ MPa}$, ambas com coeficientes de variação baixos (<5%).

Tabela 2. Estatística descritiva da densidade (ρ_d) e resistência à penetração (R_p) em duas camadas de um Argissolo, em diferentes fases da cultura e sistemas de colheita de cana-de-açúcar.

Camada	Var.	$\rho_d \text{ (g cm}^{-3}\text{)}$						$R_p \text{ (MPa)}$							
		Fase cultural		PL*		C1*		C2*		PL		C1		C2	
		A*	B*	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
0,00 - 0,20 m	Mínimo	1,39	1,45	1,43	1,49	1,60	1,60	1,47	1,57	1,53	1,63	2,10	2,62		
	Máximo	1,56	1,60	1,89	1,87	1,89	1,89	1,75	1,82	2,35	2,31	3,58	5,57		
	Média	1,47	1,53	1,69	1,70	1,72	1,70	1,61	1,70	1,99	2,00	2,77	3,64		
	Mediana	1,47	1,53	1,69	1,69	1,72	1,69	1,60	1,70	2,00	1,98	2,77	3,55		
	Erro Padrão	0,04	0,04	0,11	0,08	0,07	0,07	0,07	0,07	0,20	0,14	0,39	0,60		
	CV* (%)	2,72	2,61	6,51	4,71	4,07	4,12	4,35	4,12	10,05	7,00	14,08	16,48		
0,20 - 0,40 m	Mínimo	1,41	1,65	1,6	1,47	1,61	1,42	1,64	2,86	2,57	1,90	2,80	2,10		
	Máximo	1,78	1,80	1,76	1,88	1,87	1,90	3,75	3,90	3,60	4,55	6,15	6,66		
	Média	1,64	1,72	1,69	1,73	1,72	1,71	2,87	3,34	3,14	3,44	4,00	4,30		
	Mediana	1,66	1,72	1,70	1,74	1,71	1,73	2,93	3,32	3,18	3,46	3,86	4,26		
	Erro Padrão	0,09	0,04	0,04	0,09	0,07	0,11	0,49	0,27	0,24	0,60	0,87	1,08		
	CV (%)	5,49	2,33	2,37	5,20	4,07	6,43	17,07	8,08	7,64	17,44	21,75	25,12		

*PL: pós plantio; C1: primeira colheita; C2: segunda colheita; A: colheita mecanizada; B: colheita semi-mecanizada; CV: coeficiente de variação.

Para o caso da camada subsuperficial (0,40 m) a ρ_d e R_p apresentaram valores consideravelmente semelhantes nos dois sistemas de colheita (A e B) inclusive mais elevados do que os valores observados nas camadas superficiais, com $\rho_d > 1,60 \text{ g cm}^{-3}$ e $R_p > 3,7 \text{ MPa}$ (Tab. 2).

Com esses resultados foi evidente observar que antes das colheitas, as duas áreas (A e B) apresentaram a camada superficial com condições físicas do solo relativamente semelhantes, indicando a uniformidade do preparo do solo, embora também pôde ser observado que mesmo antes das colheitas, a camada subsuperficial já apresentava valores mais elevados aos observados na camada superficial, característicos de camadas compactadas (Tab. 2) com valores médios de $\rho_d \geq 1,64 \text{ g cm}^{-3}$ e $R_p \geq 2,87 \text{ MPa}$; sendo a R_p a variável que mais mudanças apresentou após cada colheita.

Segundo Arcoverde *et al.* (2019) e Scarpate *et al.* (2019) o preparo do solo, como gradagem, subsolagem atinge efetivamente a camada superficial do solo e reduzem temporariamente os efeitos da compactação, reduzindo a densidade do solo e favorecendo

as condições para o crescimento da planta, e para Salem *et al.* (2015) o preparo reduz a densidade na camada superficial, porém com menos eficácia nas camadas mais profundas do solo.

Na Figura 3A podem ser observados os efeitos de cada sistema de colheita nas diferentes fases e em cada uma das áreas; inicialmente pós plantio, nas duas áreas, a densidade da camada superficial do solo foi relativamente semelhante, pois com o sistema mecanizado foi observada $\rho_d \sim 1,50 \text{ g cm}^{-3}$, e com o mecanizado $\rho_d \sim 1,45 \text{ g cm}^{-3}$, embora após a primeira colheita (C1) esses valores aumentaram de forma geral e praticamente foram semelhantes ($\rho_d \sim 1,70 \text{ g cm}^{-3}$).

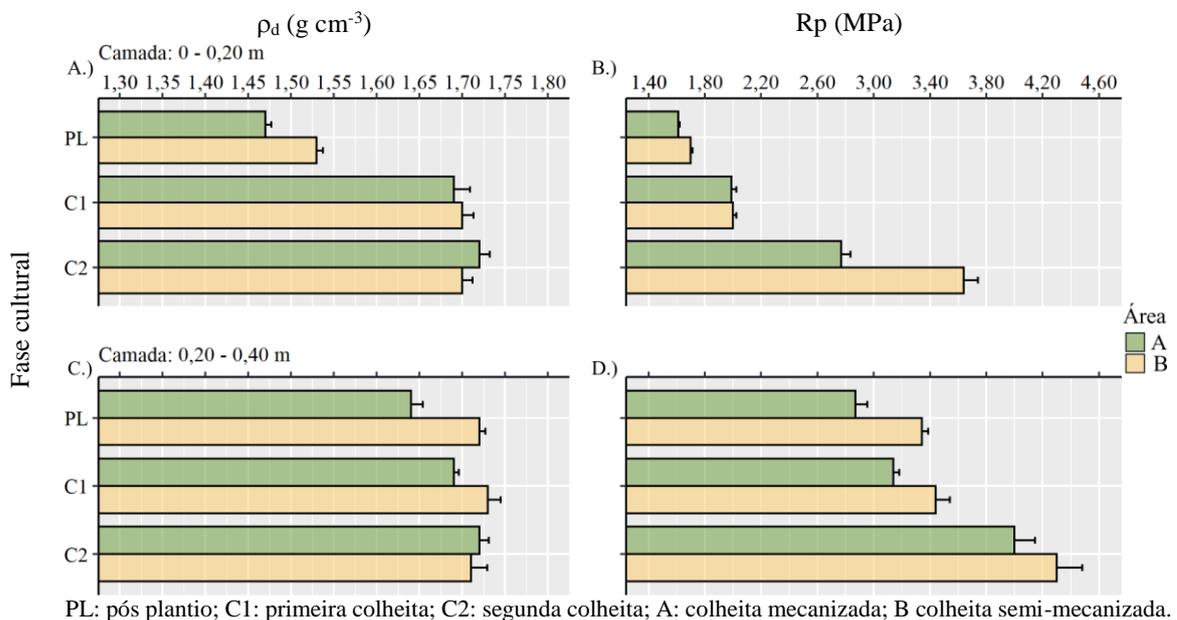


Figura 3. Densidade (ρ_d) e resistência à penetração (Rp) em duas camadas de um Argissolo, em diferentes fases da cultura e sistemas de colheita de cana-de-açúcar.

Após a segunda colheita (C2), os valores da densidade se mantiveram próximos entre os sistemas de colheita e estiveram constantes com as fases, ou seja, os valores observados em C2 foram semelhantes aos em C1, principalmente na área B, embora, no sistema de colheita mecanizado (área A) a densidade teve mais um incremento, ou seja, após PL a ρ_d média foi de $1,47 \text{ g cm}^{-3}$, com a C1 a $\rho_d \sim 1,70 \text{ g cm}^{-3}$, e após a C2 a ρ_d média foi de $1,72 \text{ g cm}^{-3}$.

Na camada subsuperficial, a ρ_d , nas duas áreas de cana (A e B) já apresentava valores elevados ($\geq 1,65 \text{ g cm}^{-3}$) mostrando tendência e estabilização em $\rho_d \sim 1,70 \text{ g cm}^{-3}$ (Fig. 3C) evidenciando mínimas mudanças ocasionadas pelos diferentes sistemas de colheita na camada, porém, na área A, com o sistema de colheita mecanizado, foi possível observar que após plantio (PL) a ρ_d do solo foi aumentando com cada colheita, iniciando

como ρ_d média de $1,64 \text{ g cm}^{-3}$ e aumentando até sua estabilização na C2 com $\rho_d = 1,72 \text{ g cm}^{-3}$; no caso da área B com o sistema semi-mecanizado, a ρ_d não apresentou mudanças, pelo fato de apresentar seus valores elevados com $\rho_d \sim 1,70 \text{ g cm}^{-3}$, mesmo após PL (Fig. 3C).

No estudo de Lisboa *et al.* (2019) avaliando a eliminação da palha após as colheitas de cana, também observaram que a qualidade do solo, tanto nas propriedades químicas, biológicas e inclusive nas físicas do solo, não foram observadas mudanças nas camadas profundas ($>0,30 \text{ m}$) mesmo com eliminação parcial ou total da palha, embora, acrescentaram que as principais mudanças, como na densidade do solo, foram observadas somente nas camadas superficiais ($<0,30 \text{ m}$).

Segundo Cavalcanti *et al.* (2019) a camada superficial do solo, em áreas de cana-de-açúcar, foi mais sensível à compactação causada pelo tráfego de máquinas colhedoras, provocando mudanças nas propriedades físicas, e a camada subsuperficial foi menos sensível a essas mudanças, devido ao seu estado já compactado, por persistência contínua de compactação pelo contínuo uso de máquinas agrícolas.

Para o caso da R_p superficial (Fig. 3B) também apresentou resposta semelhante aos da ρ_d , ou seja, os valores mais baixos foram observados antes das colheitas e posteriormente aumentaram, embora, destacando após C1, as duas áreas (A e B) apresentaram respostas semelhantes ($R_p \sim 2,0 \text{ MPa}$) e somente após a segunda colheita (C2) e mesmo com a ρ_d semelhante nas duas áreas, a R_p foi expressivamente mais elevada na área B, com valor médio de $3,64 \text{ MPa}$ (Tab. 2).

Esse tipo de resposta possivelmente esteve relacionado com os baixos conteúdos de água observados na camada superficial da área B (Fig. 4A) que poderia haver provocado o endurecimento intrínseco do solo que ganha quando seco, ou seja, com conteúdo de água $\theta < 0,10 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e R_p foi muito mais elevado do que no solo da área A, com $\theta \sim 0,17 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$.

Segundo Herrera *et al.* (2016) e Sağlam e Dengiz (2017) a R_p responde bem na caracterização da compactação do solo, mas também, depende de outros fatores do solo (textura, agregação, cimentação) principalmente da densidade e umidade, pois, a alteração em qualquer dessas duas variáveis, podem acrescentar ou diminuir os seus valores; como também foi observado, onde a ρ_d foi igual nas duas áreas, mas os valores de R_p mais elevada nas áreas com θ baixo (Fig. 3 e 4).

Na camada subsuperficial do solo, a R_p também apresentou aumento com cada colheita (Fig. 3D) e independente do sistema de colheita; embora após a C2 a R_p expressou os valores mais elevados ($R_p > 3,0$ MPa) e, além disso, pôde ser destacado que, mesmo com ρ_d semelhantes nas duas áreas ($\rho_d \sim 1,70$) a R_p foi mais alta na área com colheita semi-mecanizada (área B) possivelmente pelo acréscimo na resistência do solo, quando o conteúdo de água é baixo (Fig. 4B).

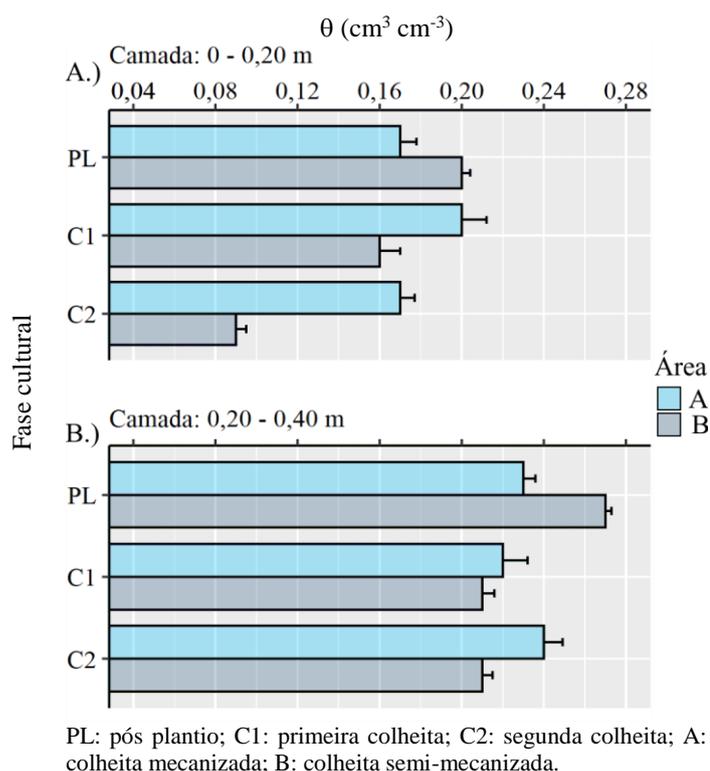


Figura 4. Conteúdo de água (θ) em duas camadas de um Argissolo, em diferentes fases da cultura e sistemas de colheita de cana-de-açúcar.

Segundo Lin, He, e Chen (2016) e Baio *et al.* (2017) os solos podem mudar suas propriedades físicas com a redução do conteúdo de água, por exemplo, quando existe estresses hídrico nas plantas pela falta de água no solo, evidentemente, também observa-se que a resistência à penetração aumenta consideravelmente, afirmando que a diminuição do conteúdo de água ocasiona altos valores de resistência à penetração no solo.

Na Figura 4A podem ser observadas as respostas de θ nas diferentes áreas e após cada processo (PL, C1, C2) sendo evidente que após cada colheita, os conteúdos de água, na camada superficial, foram maiores na Área A do que na área B, pois, a conservação da palha, no sistema de colheita mecanizado, favoreceu a proteção de solo e possivelmente reduziu a perda de água por evaporação, tornando assim a colheita mecanizada mais eficiente na conservação de água do solo, do que a semi-mecanizada.

Nesse mesmo contexto, após a C2 na área B, a queima da palha da cana deixou o solo sem cobertura vegetal e mais exposto, causando dessa forma uma possível maior evaporação e perda de água na camada superficial do solo (Fig. 4A) ao contrário da colheita mecanizada (área A) que conservou a palha na superfície, reduzindo a perda por evaporação; vale destacar que na área B os conteúdos de água foram diferentes entre C1 e C2, ou seja, os valores foram mais elevados após C1 do que C2 (Fig. 4A), ou seja, a C1 teve ausência de queima, permitindo conservar a cobertura de palha sobre a superfície e maiores conteúdos de água no solo.

Para o caso dos θ na camada subsuperficial (Fig. 4B) os valores sempre se mantiveram altos $\theta > 0,20 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, tanto para o sistema de colheita mecanizado como para semi-mecanizado, mostrando respostas semelhantes após cada colheita; embora após o preparo foi evidente observar valores mais elevados, e logo, com cada colheita o θ teve reduções nas duas áreas, porém, a área B apresentou valores relativamente mais baixos do que na área A (Fig. 4B).

Com relação ao conteúdo de água em áreas canavieiras, Awe, Reichert, e Wendroth (2015) também observaram que na camada superficial do solo foram mais baixos ($< 0,25 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) e superiores nas camadas subsuperficiais, argumentando que a camada permanece mais exposta à atmosfera, causando evaporação e secagem do solo e de maneira mais pronunciada, embora, dependendo da fase da cultura, esse conteúdo de água também foi reduzido, quando os sistemas radiculares da cana estiveram mais desenvolvidos e absorveram mais água na camada mais profunda.

Para Castioni *et al.* (2019) a redução dos conteúdos de água no solo esteve muito associado com os processos de colheita mecanizada de cana-de-açúcar, pois, limitações pela falta de água no solo foram registrados quando existiu a remoção da palha e o solo esteve mais exposto à perda de água por evaporação, e segundo Corrêa *et al.* (2017) e Dos Anjos *et al.* (2017) a cobertura de palha, durante o desenvolvimento inicial da cultura (rebrotas) teve a função de regulou as temperaturas altas na camada superficial, favorecendo o armazenamento de água no solo, principalmente nos períodos secos, quando a evaporação foi alta.

Na Tabela 3 foram apresentados os resultados da macroporosidade (P_{mac}) e água disponível (θ_{DIS}) cujas propriedades, mostraram alta sensibilidade aos efeitos do tráfego de máquina durante as duas colheitas, pois antes de serem realizadas, após PL, a P_{mac} da camada superficial do solo, nas áreas A e B, apresentaram valores médios entre 0,10 e

0,08 cm³ cm⁻³, e após a primeira colheita (C1) a P_{mac} reduziu ~60% nos dois sistemas de colheita, estabilizando-se após C2, com valores de P_{mac} <0,05 cm³ cm⁻³.

Tabela 3. Estatística descritiva da macroporosidade (P_{mac}) e água disponível (θ_{DIS}) em duas camadas de um Argissolo, em diferentes fases da cultura e sistemas de colheita de cana-de-açúcar.

Camada	Var.	P _{mac} (cm ³ cm ⁻³)						θ _{DIS} (cm ³ cm ⁻³)					
		Fase cultural		PL*		C1*		C2*		PL		C1	
	Área	A*	B*	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
0,00 – 0,20 m	Mínimo	0,07	0,06	0,01	0,01	0,01	0,01	0,21	0,20	0,13	0,14	0,13	0,13
	Máximo	0,14	0,11	0,12	0,10	0,06	0,06	0,21	0,21	0,21	0,21	0,20	0,20
	Média	0,10	0,08	0,04	0,03	0,03	0,03	0,21	0,21	0,18	0,18	0,18	0,18
	Mediana	0,10	0,08	0,03	0,03	0,03	0,04	0,21	0,21	0,19	0,19	0,18	0,18
	Erro Padrão	0,02	0,01	0,03	0,02	0,01	0,02	0,00	0,00	0,02	0,02	0,02	0,02
	CV* (%)	20,00	12,50	75,00	66,67	33,33	66,67	0,00	0,00	11,11	11,11	11,11	11,11
0,20 - 0,40 m	Mínimo	0,03	0,03	0,04	0,02	0,02	0,01	0,12	0,11	0,13	0,08	0,08	0,07
	Máximo	0,16	0,07	0,08	0,13	0,08	0,16	0,17	0,15	0,16	0,17	0,16	0,17
	Média	0,07	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,15	0,14	0,14	0,13	0,14	0,13
	Mediana	0,06	0,05	0,05	0,04	0,05	0,04	0,15	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
	Erro Padrão	0,03	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
	CV (%)	42,86	20,00	20,00	40,00	40,00	60,00	6,67	7,14	7,14	15,38	14,29	15,38

*PL: pós plantio; C1: primeira colheita; C2: segunda colheita; A: colheita mecanizada; B: colheita semi-mecanizada; CV: coeficiente de variação.

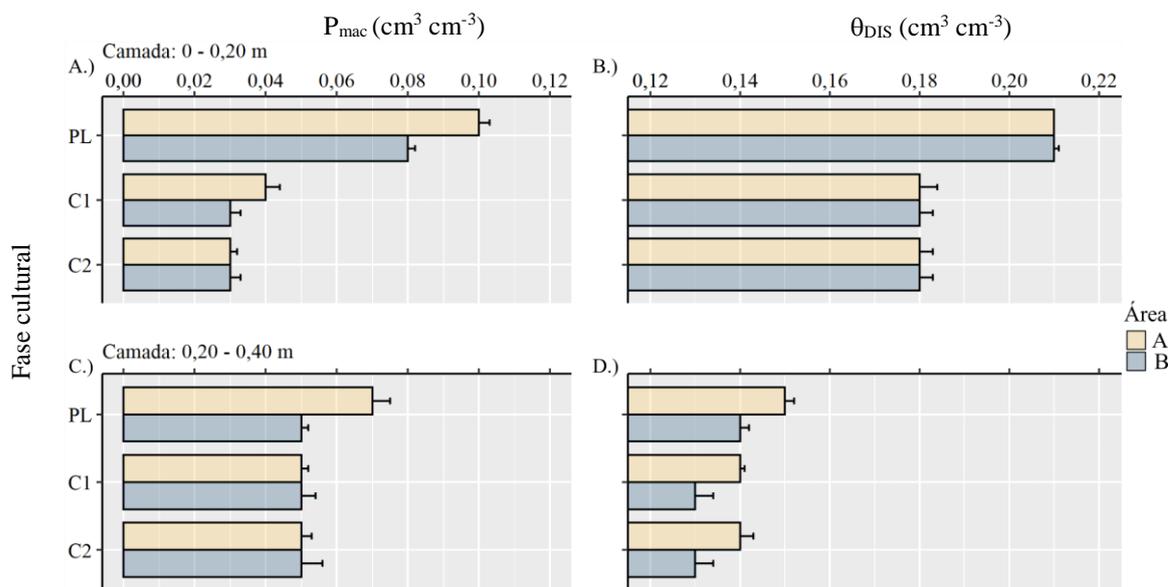
Segundo Saha e Kukal (2018) o aumento da densidade do solo é consequência da redução dos macroporos do solo e a alta mecanização é o principal responsável dessas alterações e em paralelo observa-se maior retenção de água no solo, porém nos poros de menor diâmetro, deixando a água não disponível para as plantas.

Segundo Brady e Weil (2008), Hillel e Hatfield (2005) e Libardi (2005) a P_{mac} no solo permite o funcionamento ótimo de aeração e drenagem no solo, principalmente nas texturas arenosas, onde a água é altamente móvel, e facilitam a drenagem, com rápido movimento da água e ar, mas também, permitindo a fácil disponibilidade da água para as plantas.

Esse efeito na redução da P_{mac} na camada superficial pode ser atribuído ao uso das máquinas em cada colheita de cana, mostrando a alta sensibilidade do solo ao uso de máquinas colhedoras, porém, na camada subsuperficial esse efeito foi diferente, pois, seja com o sistema mecanizado ou o semi-mecanizado, a P_{mac} estabilizou seu valor após C1, atingindo valores de 0,05 cm³ cm⁻³ nas duas áreas e se manteve constante após C2 (Fig. 5C).

Segundo Calonego *et al.* (2017) e Pires *et al.* (2017) os valores da P_{mac} devem ser ≥0,10 cm³ cm⁻³ para favorecer o crescimento das plantas, alta infiltração e difusão do oxigênio; significa que com o atual preparo do solo foram efetivos na camada superficial, pois a P_{mac}, nas duas áreas (A e B) apresentaram valores ≈ 0,10 cm³ cm⁻³.

Outros autores (GEORGES, 1980, BAQUERO *et al.*, 2012, ARRUDA *et al.*, 2016) anotaram que, quando a P_{mac} foi baixa ($<0,10 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), o crescimento radicular da cana foi limitado; isto poderia atribuir que os sistemas de colheita utilizados (mecanizado ou semi-mecanizado) poderiam estar causando limitações para a desenvolvimento da cana, principalmente nas fases iniciais de rebrota da cana, pois, após as colheita da cana foi observada no solo $P_{mac} < 0,10 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (Fig. 5A e C).



PL: pós plantio; C1: primeira colheita; C2: segunda colheita; A: colheita mecanizada; B: colheita semi-mecanizada.

Figura 5. Macroporosidade (P_{mac}) e água disponível (θ_{DIS}) em duas camadas de um Argissolo, em diferentes fases da cultura e sistemas de colheita de cana-de-açúcar.

As baixas densidades e altas macroporosidade observada na camada superficial do solo, após o plantio de cana-de-açúcar, resultaram também na alta capacidade do solo para armazenar e disponibilizar água (θ_{DIS}). Na Figura 5B pôde ser observado que após PL, a θ_{DIS} na camada superficial apresentou os valores mais elevados $\theta_{DIS} = 0,21 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, tanto na área A como na B.

Após a primeira colheita realizada (C1) independente do sistema de colheita, a θ_{DIS} foi reduzida ~15% e mantendo-se estável mesmo após a C2 (Fig. 5B) com valores de $\theta_{DIS} = 0,18 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, significa que o tráfego de máquina, independente do sistema de colheita, alteraram não só os poros de maiores diâmetros (P_{mac}) senão também foram observadas alterações mais específicas, ou seja, alterações nos poros de menor diâmetro que diminuíram também a disponibilidade de água no solo para as plantas.

Para o caso do θ_{DIS} na camada subsuperficial (Fig. 5D) do solo, foi evidente que antes das colheitas da cana, já apresentava baixa disponibilidade de água ($\theta_{DIS} \simeq 0,15 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) mas após as colheitas (C1 e C2) na área B com o sistema semi-

mecanizado, essas reduções foram mais pronunciadas, causando que a θ_{DIS} atingisse valores ainda mais baixos $\sim 0,13 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$; e para o caso da área A, a θ_{DIS} estabilizou seu valor logo após C1 em $0,14 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, mas também, essa redução foi observada após o tráfego das máquinas agrícolas.

Segundo Scarpare *et al.* (2019) comparando o preparo do solo e ausência de preparo e os efeitos na disponibilidade água do solo para as plantas, não observaram nenhuma diferença na camada de 0 – 0,30 m, embora as mudanças observadas foram ao longo de cada ciclo, ou seja, as mudanças na disponibilidade água para as plantas é mais sensível a outras lavouras agrícolas diferentes do preparo do solo.

Em relação à conservação e/ou eliminação da palha realizada durante as colheitas, o carbono orgânico do solo (CO) também apresentou respostas diferentes em cada um desses sistemas de colheita; antes de ser realizada a primeira colheita (PL) os valores médios de CO foram os mais elevados ($>20,0 \text{ g kg}^{-1}$) nas duas áreas (A e B) da camada superficial (Tab. 4), pois o preparo do solo realizado para o plantio, incluiu adubação orgânica com resíduos do processamento da cana, principalmente na camada mais superficial do solo.

Tabela 4. Estatística descritiva do carbono orgânico (CO) em duas camadas de um Argissolo, em diferentes fases da cultura e sistemas de colheita de cana-de-açúcar.

Camada	Var.	CO (g kg^{-1})							
		Fase cultural		PL*		C1*		C2*	
		Área	A*	B*	A	B	A	B	
0,00 - 0,20 m	Mínimo		16,07	17,07	6,55	6,70	7,91	4,02	
	Máximo		27,29	31,98	20,33	19,70	25,75	29,27	
	Média		21,25	23,33	14,57	13,71	14,35	16,09	
	Mediana		20,88	23,61	14,41	13,75	13,86	15,80	
	Erro Padrão		2,99	3,65	3,36	3,13	4,22	6,57	
	CV* (%)		14,07	15,65	23,06	22,83	29,41	40,83	
0,20 - 0,40 m	Mínimo		4,13	5,38	4,93	4,75	0,70	3,10	
	Máximo		22,82	20,89	18,88	20,54	24,95	12,7	
	Média		14,26	14,16	10,1	12,01	13,69	7,32	
	Mediana		14,84	13,31	9,44	11,24	16,8	7,39	
	Erro Padrão		4,69	3,83	2,84	3,10	7,86	2,13	
	CV (%)		32,89	27,05	28,12	25,81	57,41	29,1	

*PL: pós plantio; C1: primeira colheita; C2: segunda colheita; A: colheita mecanizada; B: colheita semi-mecanizada; CV: coeficiente de variação.

Na camada subsuperficial, essa adubação também causou um efeito positivo, porém menos aprimorado do que na camada superficial, pois os valores médios, nas duas áreas, esteve $\sim 14,0 \text{ g kg}^{-1}$, e após as colheitas da cana os valores de CO tenderam a diminuir (Tab. 4). Na Figura 6A pôde ser observado que após PL, o CO foi relativamente semelhante na camada superficial nas duas áreas (A e B) e apresentaram as médias mais

elevadas do que nas duas coletas seguintes (C1 e C2) CO ~ 21 e ~ 23 g kg⁻¹; após cada colheita, independente do sistema, o CO tendeu a reduzir para $\leq 15,0$ g kg⁻¹, ou seja, $\sim 40\%$ do carbono foi degradado, mantendo esses valores estáveis até após a C2.

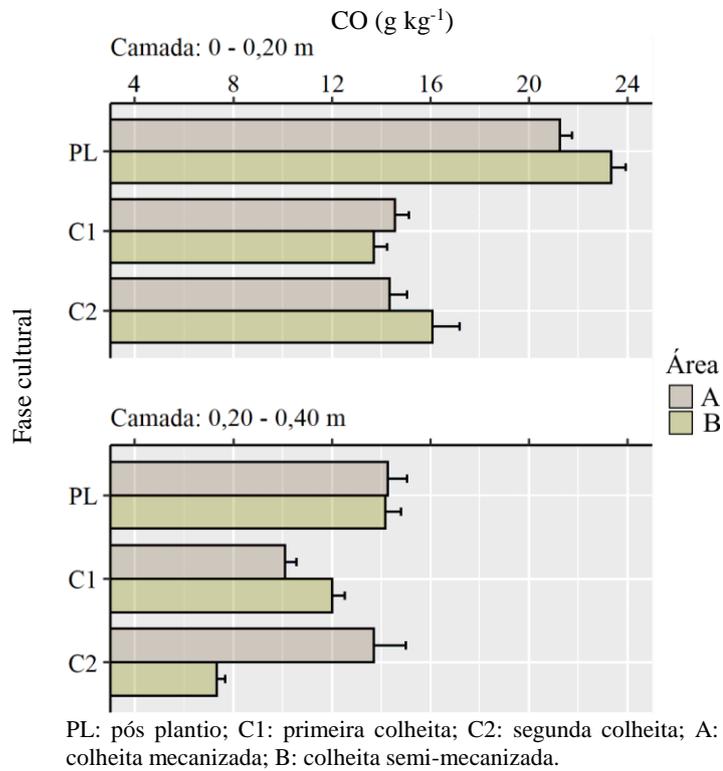


Figura 6. Carbono orgânico (CO) em duas camadas de um Argissolo, em diferentes fases da cultura e sistemas de colheita de cana-de-açúcar.

Segundo Castioni *et al.* (2019) a remoção total da palha após a colheita pode provocar a diminuição nos conteúdos de CO no solo de até ~ 4 g kg⁻¹, mas também observaram que o carbono manteve seus valores mais constantes quando houve ausência dessa remoção, significa que com a conservação da palha das colheitas manteve os níveis de CO no solo mais estáveis.

Embora, na Figura 6A também pôde ser observado que na C2, o CO da camada superficial do solo da área B foi mais elevado (+ 2 g kg) do que na área A, pois, na C1 da área B não houve a queima da cana e sim o corte da cana sem queima, na qual foram deixadas altas quantidades de resíduos, não só de palha senão também de colmos de cana, sendo possível observar esse efeito na colheita (C2) seguinte.

Na camada subsuperficial, o resultado expressou-se de forma diferente, ou seja, maior conteúdo de CO na área A com colheita mecanizada (Fig. 6B), significa que, a forma da espacialização desses resíduos no solo poderia provocar mudanças no CO do solo, pois, na colheita mecanizada, a palha foi picada e distribuída de maneira mais homogêneo na camada superficial da totalidade da área, e possivelmente esse fato facilitou a degradação

e deslocamento do CO para a camada subsuperficial, permitindo níveis CO na superfície e na subsuperfície do solo mais constante, inclusive os valores médios entre essas camadas foram $\sim 13,5 \text{ g kg}^{-1}$ (Tab. 4).

Embora, ao contrário, no sistema semi-mecanizado os resíduos da colheita não foram picados, nem espalhados em toda área, esses foram acumulados em grande quantidade e depositados em alguns trechos ao longo da área B, significa que possivelmente essa técnica de manejo da palha permitiu acumulação e degradação do CO na camada superficial (Fig. 6A) como observado na C2, mais foi limitada para conseguir acumular CO na camada mais profunda, como pode ser observado na Figura 6B da área B. redução continua após cada colheita, ao contrário do sistema mecanizado (área A).

Segundo Sousa Junior *et al.* (2018) as mudanças temporais do CO da superfície do solo no sistema de colheita de “cana-crua”, não causam mudanças nos conteúdos de CO quando a palha é removida totalmente, porém, mantendo 14 t ha^{-1} podem incrementar o CO em até $\sim 3 \text{ g kg}^{-1}$ após 469 dias, ou seja, ao longo do tempo, mantendo a palha, podem aumentar os conteúdos de CO no solo.

Segundo Cong *et al.* (2020) estudando as mudanças do carbono no solo, utilizando diferentes formas de palha de milho na superfície do solo, observaram que tanto a palha picada ou completa aportam significativamente no aporte do carbono orgânico da camada superficial do solo, porém, com maior aporte na camada subsuperficial quando foi utilizada a palha picada, sugerindo que esse manejo da palha otimiza sua incorporação no solo.

Corroborando com Cong *et al.* (2020), neste estudo também foi observado maior aporte de carbono orgânico, quando a palha foi picada, sistema de colheita mecanizada, principalmente na camada subsuperficial após dois anos, na segunda colheita (Fig. 6B), e para o caso da camada superficial, os aportes foram relativamente semelhantes entre os dois sistemas de colheitas, ou seja, a palha inteira também mostrou aporte de carbono para essa camada.

Os resultados deixaram evidente que após o plantio da cana, o preparo do solo melhorou as condições físicas do solo, apresentando baixos valores de densidade e resistência de penetração do solo, como também, maior macroporosidade e água disponível; no entanto, esse efeito não foi evidente na camada subsuperficial do solo, com resultados que indicaram a prévia compactação dessa camada com colheitas passadas, anteriores ao preparo do solo, resultando uma camada pouco sensível ao uso das máquinas, podendo aumentar o risco de compactação da camada superficial.

Alguns autores (BALBUENA *et al.*, 2003; STRECK *et al.*, 2004; REICOSKY, 2015; HU *et al.*, 2018) mencionam que a compactação do solo em áreas agrícolas, com o tempo torna-se recorrente, dificultando o manejo, principalmente, na fase do plantio, assim, as práticas de revolvimento do solo são necessárias; Tormena *et al.* (2017) enfatizou que o preparo do solo, antes do plantio, é efetivo e reduziu a densidade e a resistência à penetração, melhorando a porosidade e quantidade de água disponível no solo, estimulando melhor crescimento radicular das plantas.

Após cada colheita (C1 e C2) os efeitos de compactação foram mais evidentes na camada superficial nas duas áreas, principalmente com a eliminação da palha e perda de água no solo causado pelo sistema semi-mecanizado, refletindo no aumento expressivo da R_p quando o solo apresentou baixos conteúdos de água; e para caso da camada superficial, além do aumento da R_p do solo quando seco, foi evidente que a distribuição homogênea dos resíduos de palha de cana permitiu manter os níveis de CO mais estáveis e constantes do que no sistema semi-mecanizado, o qual apresentou uma redução considerável após cada colheita.

3.2. Efeito dos sistemas de colheita nas propriedades físico-mecânicas e matéria orgânica do solo na linha e entrelinha da cana-de-açúcar

Os sistemas de colheita de cana-de-açúcar mecanizado e semi-mecanizado ocasionaram mudanças nas propriedades físico-mecânicas e orgânicas do solo, embora essas mudanças também puderam ser observadas nos pontos específicos da área do plantio da cana, ou seja, o desenho de plantio de linhas duplas apresenta zonas específicas para o tráfego das máquinas e para o plantio, consideradas como entrelinha (EL) e linhas (L), respectivamente.

Na Tabela 5 foram apresentados respectivamente os resultados estatísticos da ρ_d do solo, nas duas áreas A e B, e os dois sistemas de colheita (mecanizado e semi-mecanizado) analisados tanto na EL e L, e nas duas camadas do solo, além de considerar três fases: após plantio, colheita 1 e colheita 2 (PL, C1, C2); de forma geral observasse que os dados apresentaram CV <10%, com uma variação de ρ_d mínimas de 1,40 g cm⁻³, máximas de 1,90 g cm⁻³ e médias entre 1,46 e 1,75 g cm⁻³.

Após o plantio da cana (PL) a ρ_d do solo da camada superficial apresentou valores médios baixos, tanto na L como na EL da área A (ρ_d <1,50 g cm⁻³) e na camada subsuperficial, esses valores foram respectivamente mais elevados com ρ_d ~1,65 g cm⁻³ (Tab. 5); para o caso da área B os valores da ρ_d foram ~1,54, indiferente da L ou EL,

embora na camada superficial esses valores foram mais elevados, inclusive com ρ_d superiores do que na área A, $\sim 1,72 \text{ g cm}^{-3}$ (Tab. 5).

Tabela 5. Estatística descritiva da densidade (ρ_d) em duas camadas de um Argissolo, na entrelinha e linha, em diferentes fases da cultura e sistemas de colheita de cana-de-açúcar.

Camada	Var.	$\rho_d \text{ (g cm}^{-3}\text{)}$													
		Fase cultural		PL*				C1*				C2*			
		Área		A*		B*		A		B		A		B	
		Lugar	EL*	L*	EL	L	EL	L	EL	L	EL	L	EL	L	
0,00 - 0,20 m	Mínimo	1,40	1,39	1,45	1,47	1,43	1,58	1,54	1,49	1,60	1,61	1,60	1,60		
	Máximo	1,55	1,56	1,58	1,60	1,89	1,88	1,87	1,84	1,89	1,87	1,89	1,82		
	Média	1,46	1,49	1,52	1,54	1,66	1,73	1,73	1,67	1,72	1,73	1,73	1,68		
	Mediana	1,46	1,49	1,52	1,54	1,64	1,71	1,73	1,66	1,71	1,73	1,74	1,67		
	Erro Padrão	0,04	0,04	0,04	0,04	0,12	0,10	0,08	0,08	0,07	0,08	0,08	0,06		
	CV* (%)	2,74	2,68	2,63	2,60	7,23	5,78	4,62	4,79	4,07	4,62	4,62	3,57		
0,20 - 0,40 m	Mínimo	1,41	1,47	1,65	1,67	1,64	1,60	1,63	1,47	1,61	1,65	1,49	1,42		
	Máximo	1,73	1,78	1,80	1,78	1,76	1,74	1,88	1,88	1,87	1,83	1,83	1,90		
	Média	1,65	1,64	1,73	1,72	1,70	1,69	1,75	1,71	1,72	1,72	1,71	1,71		
	Mediana	1,68	1,65	1,73	1,71	1,70	1,69	1,75	1,73	1,70	1,71	1,73	1,75		
	Erro Padrão	0,09	0,08	0,05	0,03	0,04	0,03	0,07	0,11	0,08	0,05	0,10	0,13		
	CV (%)	5,45	4,88	2,89	1,74	2,35	1,78	4,00	6,43	4,65	2,91	5,85	7,60		

*PL: pós plantio; C1: primeira colheita; C2: segunda colheita; A: colheita mecanizada; B: colheita semi-mecanizada; EL: Entrelinha; L: linha; CV: coeficiente de variação.

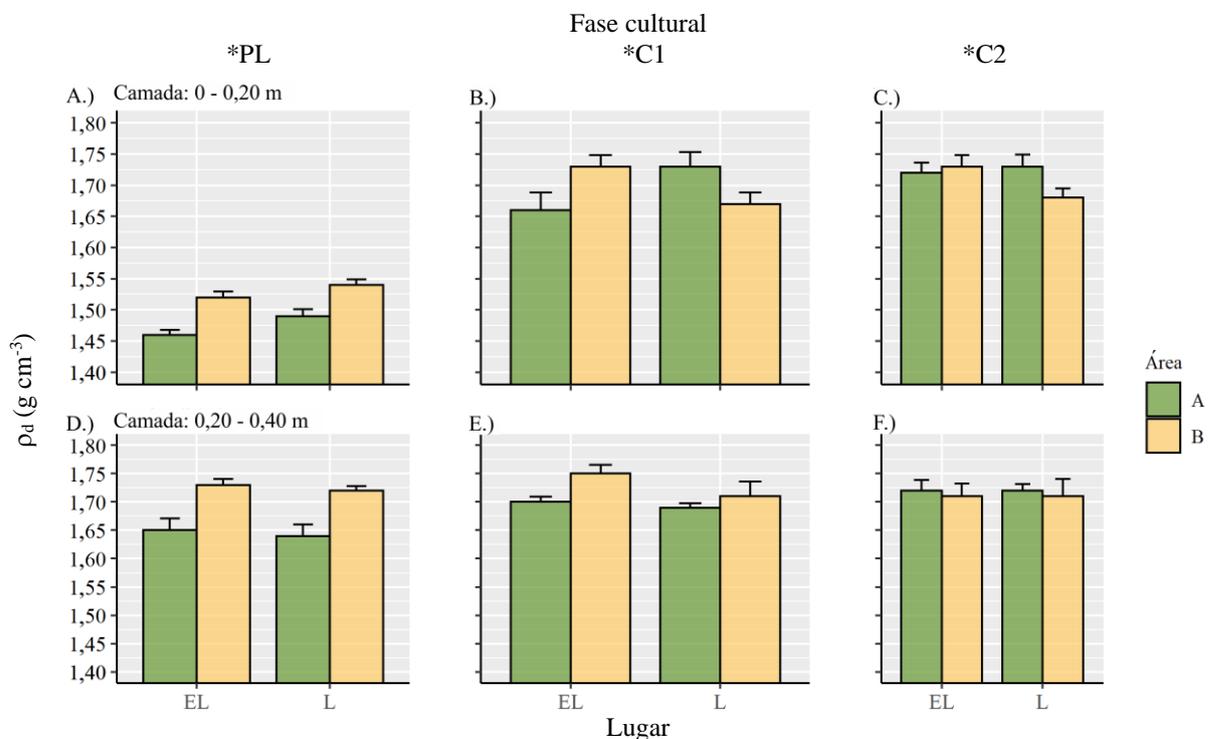
Com a primeira colheita da cana, esses valores da ρ_d apresentaram incremento nos dois sistemas de colheita; na Figura 7 pode ser observado as respostas para cada fase da cana e nas duas áreas (A e B) e considerando às duas camadas do solo e a L e EL. Na Figura 7A observam-se os resultados após PL foram os mais baixos do que nas outras fases e, além disso, observa-se que na área B o preparo do solo foi menos efetivo do que na área A, pois, apesar que a ρ_d do solo, nas duas áreas, foi $< 1,60 \text{ g cm}^{-3}$, apresentaram valores superiores $1,50 \text{ g cm}^{-3}$.

Na camada subsuperficial (Fig. 7C) após PL, a ρ_d apresentou valores elevados nas duas áreas $> 1,60 \text{ g cm}^{-3}$ e da mesma maneira, o preparo da área A foi mais efetivo do que na área B, e não foram observados diferentes, nessa fase, nas linhas e entrelinhas de cada uma das duas áreas (A e B).

Após a primeira colheita C1 (Fig. 7B e E) a ρ_d apresentou resposta diferente, entre L e EL das duas áreas de cana; na camada superficial da área A observou-se que a ρ_d aumentou seus valores médios ($\geq 1,65 \text{ g cm}^{-3}$) embora, esses valores foi mais elevados na L, com valores médios $\sim 1,72 \text{ g cm}^{-3}$, e para o caso da área B, a ρ_d do solo também aumentou, porém, observou-se que a ρ_d foi mais na EL do que na L.

Essa resposta, indica que os sistemas de colheita afetaram a ρ_d da camada superficial do solo, proporcionalmente igual, porém, considerando que, o sistema semi-mecanizado

teve uma parte da colheita executada por máquinas e outra manualmente e, além disso, as máquinas trafegaram parcialmente na totalidade da área, causou menor efeito no aumento da ρ_d do solo na linha de plantio da cana (lugar de crescimento radicular da cana) do que no sistema mecanizado.



*PL: pós plantio; C1: primeira colheita; C2: segunda colheita; EL: Entrelinha; L: linha; A: colheita mecanizada; B: colheita semi-mecanizada.

Figura 7. Densidade (ρ_d) em duas camadas de um Argissolo, na entrelinha e linha, em diferentes fases da cultura e sistemas de colheita de cana-de-açúcar.

Alguns autores (BAIO *et al.*, 2017; HERNÁNDEZ *et al.*, 2019) consideram que a susceptibilidade do solo à compactação está estreitamente relacionado como o tráfego intensivo das máquinas agrícolas e executado em condições de umidade não adequadas, pois, quanto mais úmido o solo, maior a susceptibilidade à compactação, sendo essa explicação umas das causas da menor ρ_d registrada na camada superficial da linha na área B, pois, os conteúdos de água foram inferiores que na área A (Fig. 9B).

Para o caso da camada subsuperficial (Fig. 7E) após a C1, a ρ_d também aumentou, atingindo valores próximos nas duas áreas de cana (A e B) $\sim 1,73 \text{ g cm}^{-3}$, embora, apesar de, a área B ter apresentado a ρ_d mais elevada na EL, observasse que a maior mudança foi ocasionada pelo sistema mecanizado, na área A, ou seja, a ρ_d após C1, aumentou de $\sim 1,65$ para $\sim 1,70 \text{ g cm}^{-3}$ tanto na EL e L, e no sistema semi-mecanizado, a ρ_d só aumento na EL, de $\sim 1,73$ para $1,75 \text{ g cm}^{-3}$.

Após a segunda colheita (C2) a ρ_d aumentou na área A, com valores médios $\sim 1,72 \text{ g cm}^{-3}$ na camada superficial do solo, assemelhando os resultados da E1 e L, e para o caso da área B os valores se mantiveram estáveis conforme observados na C1. Na camada subsuperficial, os valores da ρ_d aumentaram na área A ($\sim 1,72 \text{ g cm}^{-3}$) assemelhando com os resultados da área B, os quais após a C2 mostraram estabilização da ρ_d do solo.

Entre as principais mudanças físicas do solo, devido ao tráfego de máquinas agrícolas, segundo Lima *et al.* (2017) e Naderi-Boldaji *et al.* (2018) foram o aumento da densidade do solo, afirmaram que, quanto mais frequente o uso de máquinas pesadas, mais notáveis serão seus efeitos no solo; e segundo Guimarães Júnnyor *et al.* (2019b) hoje o sistema de cana-de-açúcar utilizam máquinas que podem atingir pesos de 20 t (colhedoras) e até superior, no caso do transbordo e reboque carregados, prejudicando consideravelmente a camada superficial e podem estender seus efeitos em camadas do solo abaixo do 0,30 m.

Segundo Esteban *et al.* (2019) os sistemas de colheita mecanizada de cana-de-açúcar diminuíram os efeitos de compactação do solo, preservando suas condições físicas (baixa densidade e resistência à penetração) principalmente nos lugares de crescimento das raízes, embora, isso foi possível sob controle de tráfego, pois, na ausência desse controle, as máquinas compactaram o solo, tanto nos lugares de crescimento radicular (linha) quanto os do tráfego (entrelinha).

Na Tabela 6 foram apresentados os resultados estatísticos da R_p do solo e por ser observado que os dados apresentaram CV $< 25\%$, com uma variação dos valores entre mínimo de 1,48 MPa e máximas de 6,66 MPa, e médias entre 1,58 e 4,31 MPa.

Após o plantio da cana (PL) a R_p da camada superficial apresentou valores médios baixos (Tab 6), tanto na L como na EL das duas áreas ($R_p < 1,80 \text{ MPa}$) e para o caso da camada superficial, a área A apresentou $R_p \sim 2,80 \text{ MPa}$, e a B, $R_p \sim 3,30 \text{ MPa}$, ou seja, com os preparos do solo, a camada superficial nas duas áreas permitiu homogeneizar a R_p , embora na camada superficial, esses preparos foram menos efetivos, pois, os valores da R_p foram expressivamente mais elevados, principalmente na área B.

Na Figura 8 podem ser observados os resultados da R_p tanto nas linhas e entrelinhas de cana, em cada uma das áreas e nas diferentes fases, evidenciando que na camada superficial do solo a R_p apresentou semelhanças nas duas primeiras fases (PL e C1) e mantivesse constante, com valores entre 1,5 e 2,0 MPa (Fig. 8A e B) mas após a C2, a R_p

do solo expressou os maiores valores ($R_p > 3,0 \text{ MPa}$) principalmente na entrelinha da área B, com $R_p \sim 4,00 \text{ MPa}$ (Fig. 6C)

Tabela 6. Estatística descritiva da resistência à penetração (R_p) em duas camadas de um Argissolo, na entrelinha e linha, em diferentes fases da cultura e sistemas de colheita de cana-de-açúcar.

Camada	Var.	R_p (MPa)											
		*PL				*C1				*C2			
		A*		B*		A		B		A		B	
Lugar	*EL	*L	EL	L	EL	L	EL	L	EL	L	EL	L	
0,00 – 0,20 m	Mínimo	1,48	1,47	1,57	1,60	1,53	1,79	1,72	1,63	2,10	2,11	3,18	2,62
	Máximo	1,74	1,75	1,79	1,82	2,35	2,33	2,31	2,27	3,58	3,49	5,57	3,99
	Média	1,58	1,63	1,68	1,72	1,93	2,05	2,05	1,95	2,80	2,74	3,90	3,38
	Mediana	1,58	1,63	1,67	1,72	1,94	2,02	2,05	1,94	2,84	2,67	3,66	3,40
	Erro Padrão	0,06	0,07	0,06	0,07	0,21	0,18	0,14	0,14	0,36	0,42	0,66	0,41
	CV* (%)	3,80	4,29	3,57	4,07	10,88	8,78	6,83	7,18	12,86	15,33	16,92	12,13
0,20 - 0,40 m	Mínimo	1,64	1,90	2,86	2,99	2,80	2,57	2,74	1,90	3,13	2,66	2,10	3,13
	Máximo	3,39	3,75	3,90	3,75	3,60	3,46	4,55	4,55	5,25	5,91	6,66	5,25
	Média	2,88	2,85	3,37	3,31	3,19	3,10	3,57	3,31	3,94	4,29	4,31	3,94
	Mediana	3,05	2,90	3,36	3,29	3,21	3,15	3,56	3,39	3,86	4,20	4,35	3,86
	Erro Padrão	0,49	0,51	0,32	0,22	0,26	0,22	0,48	0,69	0,67	0,97	1,21	0,67
	CV (%)	17,01	17,89	9,50	6,65	8,15	7,10	13,45	20,85	17,01	22,61	28,07	17,01

*PL: pós plantio; C1: primeira colheita; C2: segunda colheita; A: colheita mecanizada; B: colheita semi-mecanizada; EL: Entrelinha; L: linha; CV: coeficiente de variação.

Na camada subsuperficial, os valores da R_p , em cada uma das áreas, foram mais constantes ou com poucas mudanças após a primeira colheita, tanto na linha como na entrelinha da área B que mantiveram valores de R_p ; mas na área A esses valores passaram, em média, de $\sim 2,80$ a $3,30 \text{ MPa}$, significando que na área com o sistema de colheita mecanizado foram observados incrementos da R_p que se aproximaram aos resultados observados após PL e C1 na área com o sistema de colheita semi-mecanizado.

Segundo Rodrigues *et al.* (2015) avaliando a resistência à penetração do solo e a compactação gerada pela colheita mecanizada, observaram que a camada superficial foi a mais susceptível às mudanças causadas pelo tráfego, pois, os valores da R_p foram aumentados com a passagem das máquinas agrícolas, enquanto a camada subsuperficial, esses valores mantiveram-se constantes.

Esses incrementos da R_p observados após as colheitas da cana, seja com o sistema de colheita mecanizado ou semi-mecanizado, em algumas das fases da cultura podem causar limitantes para o desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar, pois, segundo Otto *et al.* (2011) quando a $R_p \geq 2,0 \text{ MPa}$, pode ser considerada restritiva para o crescimento radicular, e podem ser atingidas com o aumento da densidade do solo, causadas pelas altas tensões oriundas do tráfego de máquinas agrícolas.

Após C1, na camada superficial do solo, tanto na área A e B, foram observados valores de R_p próximos a 2,00 MPa, quando o solo apresentou densidades entre 1,66 e 1,73 g cm⁻³ mas também em baixos conteúdos de água (<0,15 cm³ cm⁻³), isto significa que, a R_p pode expressar valores ainda mais elevadas em condições secas, conforme concluíram Baio *et al.* (2017) que a redução do conteúdo de água no solo foi a principal causa, entre diferentes propriedades, das variações e incrementos da resistência à penetração do solo.

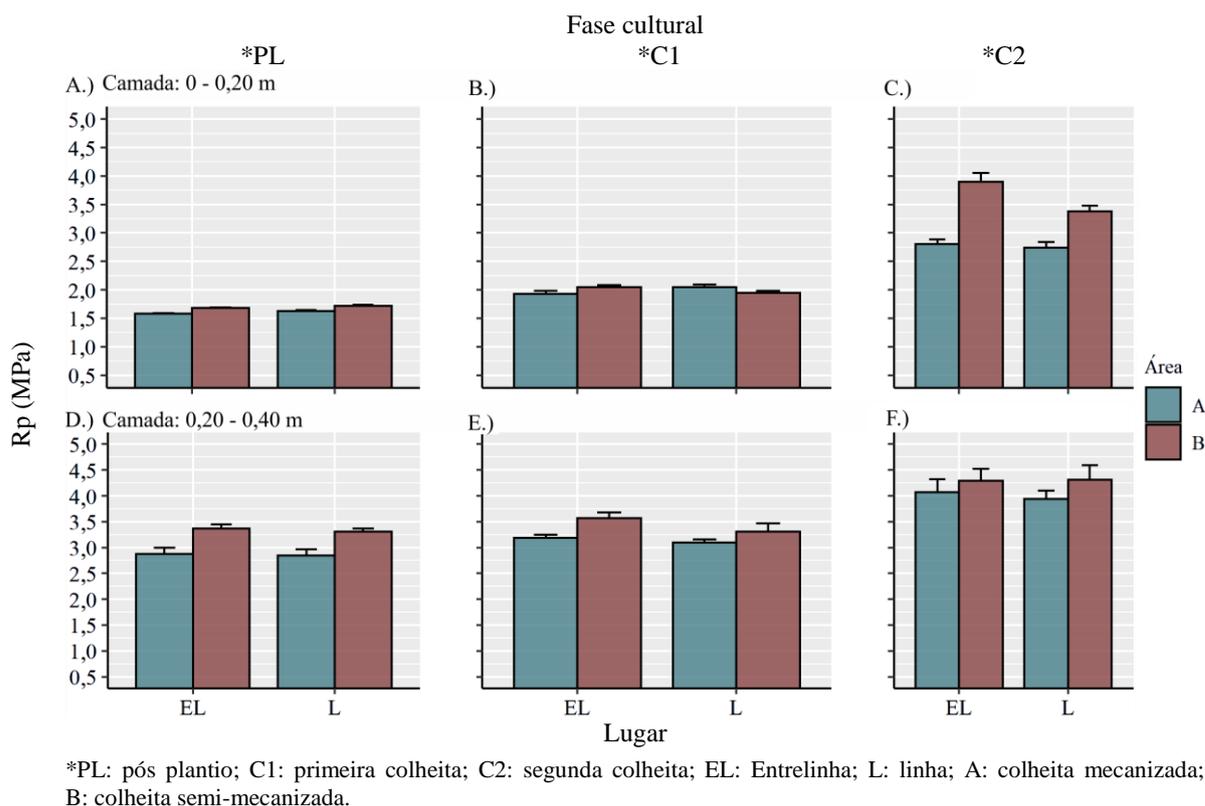


Figura 8. Resistencia à penetração (R_p) em duas camadas de um Argissolo, na entrelinha e linha, em diferentes fases da cultura e sistemas de colheita de cana-de-açúcar.

Após C2, a R_p aumento nas duas áreas de cana (A e B), na camada superficial da área A, os valores foram semelhantes entre a EL e a L da cana, atingindo valores ~2,80 MPa, e para caso da área B, esse incremento supero os valores observados na área A e, além disso, a EL apresentou o maior incremento, ou seja, a R_p foi 3,90 MPa (Fig. 8C). Na camada subsuperficial esse incremento foi ainda maior, na área A, a R_p na EL foi de 2,94 MPa, e na L de 4,29 MPa, e para o caso da área B, esses valores foram 4,31 e 3,94 MPa, respetivamente.

Segundo Bayat e Ebrahim Zadeh (2018) essas variações da R_p depende da heterogeneidade espacial conforme o tipo de solo, tamanho e formas das partículas,

mineralogia das argilas, matéria orgânica, mas também, da alta dinâmica espacial e temporal do conteúdo de água, densidade e porosidade total do solo.

Hernández *et al.* (2019) enfatizaram que a resistência à penetração aumentou com a profundidade do solo, principalmente na profundidade onde o arado do preparo do solo não atingiu (>0,30 m), embora essa resposta poderia ser mascarada entre épocas, ou seja, no verão a Rp foi mais elevada na camada superficial, quando os conteúdos de água no solo foram baixos (verão) e vice-versa para inverno, mais elevada na subsuperfície.

Na Tabela 7 podem ser observados os resultados dos conteúdos de água (θ) nas respectivas áreas, lugares, fases e profundidade. Os conteúdos de água variaram entre valores mínimos de $0,10 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e até máximos de $0,50 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, sendo observado que a camada superficial apresentou os valores médios de θ mais baixos do que na camada subsuperficial, da mesma maneira, os coeficientes de variação também registraram a maior variação na camada superficial.

Tabela 7. Estatística descritiva do conteúdo de água (θ) em duas camadas de um Argissolo, na entrelinha e linha, em diferentes fases da cultura e sistemas de colheita de cana-de-açúcar.

Camada	Var.	$\theta \text{ (cm}^3 \text{ cm}^{-3}\text{)}$											
		Fase cultural		PL*		C1*				C2*			
		Área	A*	B*	A		B		A		B		
Lugar	EL*	L*	EL	L	EL	L	EL	L	EL	L	EL	L	
0,00 – 0,20 m	Mínimo	0,12	0,10	0,15	0,16	0,13	0,10	0,10	0,10	0,10	0,11	0,04	0,06
	Máximo	0,24	0,35	0,25	0,23	0,50	0,31	0,32	0,27	0,23	0,30	0,11	0,16
	Média	0,17	0,17	0,20	0,20	0,20	0,21	0,16	0,15	0,16	0,18	0,09	0,10
	Mediana	0,17	0,17	0,20	0,20	0,18	0,22	0,15	0,15	0,16	0,16	0,10	0,10
	Erro Padrão	0,04	0,06	0,03	0,02	0,08	0,06	0,07	0,05	0,04	0,05	0,02	0,03
	CV* (%)	20,88	31,75	14,90	9,18	40,76	27,27	40,16	35,65	24,53	26,49	27,26	29,18
0,20 - 0,40 m	Mínimo	0,17	0,17	0,24	0,24	0,10	0,10	0,13	0,15	0,16	0,15	0,17	0,13
	Máximo	0,30	0,29	0,31	0,31	0,34	0,50	0,29	0,27	0,34	0,37	0,25	0,30
	Média	0,22	0,23	0,28	0,27	0,21	0,23	0,21	0,21	0,24	0,24	0,21	0,22
	Mediana	0,21	0,23	0,28	0,27	0,22	0,23	0,21	0,22	0,24	0,24	0,20	0,22
	Erro Padrão	0,04	0,03	0,02	0,02	0,06	0,08	0,04	0,03	0,05	0,05	0,02	0,04
	CV (%)	16,94	13,57	6,44	8,12	25,98	36,80	20,43	16,01	21,83	22,32	10,70	18,52

*AC: pós plantio; C1: primeira colheita; C2: segunda colheita; A: colheita mecanizada; B: colheita semi-mecanizada; EL: Entrelinha; L: linha; CV: coeficiente de variação.

Na Figura 9 estão apresentadas as variações dos conteúdos de água, evidenciando maior variação nas camadas superficiais; após plantio, na Figura 9A pode ser observado que o θ apresentou respostas semelhantes entre as EL e L na camada superficial de cada uma das áreas, mas com o processo das colheitas, esses conteúdos mantiveram as respostas das EL e L, porém, a redução do conteúdo de água no solo da área B foram maiores após as colheitas da cana.

Na Figura 9B e C observa-se que na área B os conteúdos de água, após as colheitas da cana, foram menores que na área A isso significa que, a colheita realizada pelo sistema mecanizado permitiu conservar os resíduos de palha, na totalidade sobre a superfície do solo, reduzindo a perda de água por evaporação, pois, ao contrário, no sistema semi-mecanizado, após C1, a cana foi colhida com corte manual e verde, ou seja, a palha foi conservada, embora disposta sobre o solo e cobrindo parcialmente sua superfície, causando ~28% redução de água no solo, com respeito à área A.

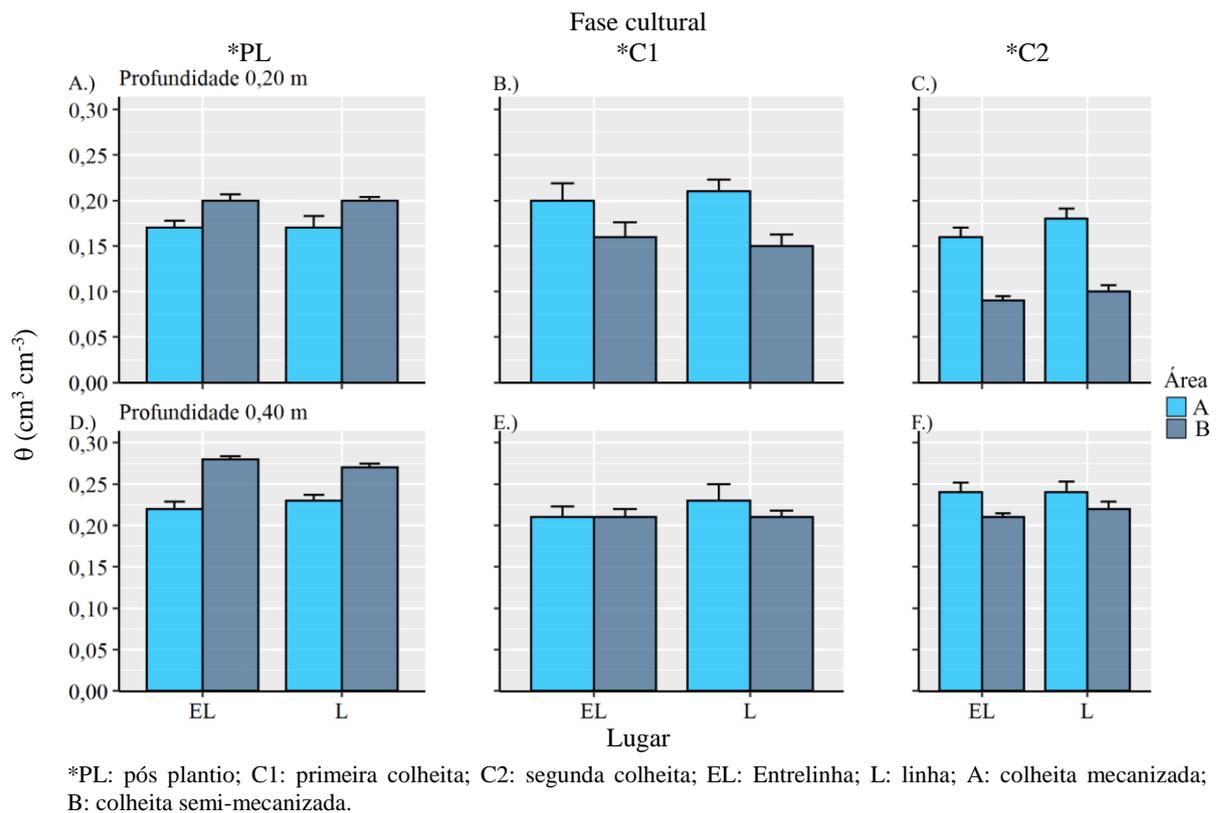


Figura 9. Conteúdo de água (θ) em duas camadas de um Argissolo, na entrelinha e linha, em diferentes fases da cultura e sistemas de colheita de cana-de-açúcar.

Segundo Gmach *et al.* (2019) eliminar a palha gerada das colheitas da cana, pode colocar os conteúdos de água no solo em um déficit crítico, principalmente nos meses secos, ocasionado estresses hídricos em qualquer uma das fases da cana, e sugerem que seja conservada mais dos 30% da palha, pois, a eliminação total poderia não só afetar os conteúdos de água no solo, senão, causar alterações no balance dos estoques do carbono no solo, e aumentar a susceptibilidade a processos erosivos.

Após a C2, novamente o solo da área B teve menos conteúdo de água do que na área A, pois, no sistema de colheita semi-mecanizada, a palha da cana foi queimada, para facilitar o corte, e nesse caso, a superfície do solo permaneceu sem cobertura vegetal e

totalmente exposta aos efeitos ambientais que provocaram a redução do θ na superfície do solo de ~43% com respeito à área A.

Para o caso da camada subsuperficial, após PL (Fig. 9D) na área B foi evidente maior conteúdo de água, ~21% mais do que na área A, embora, após a C1, na Figura 9E pode ser observado que o θ mostrou respostas semelhantes entre as áreas (A e B) e entre as posição de coleta (El e L), ou seja, com a conservação total da palha sobre a superfície da área A, e conservação parcial da área B apresentaram conteúdos de água semelhantes na camada subsuperficial do solo.

Após C2, o θ na camada subsuperficial da área A foi ~10% mais elevada do que na área B (Fig. 9F) tanto na El e L, significa que a conservação da palha sobre a superfície da área A não só reduziu as perdas na camada superficial, senão também, permitiu conservar maior conteúdo de água na camada subsuperficial; e para o caso da área B, os conteúdos de água na camada mais profunda foi semelhante após C1 e C2, com a conservação da palha parcial ou a eliminação total por queima.

Segundo Dos Anjos *et al.* (2017) a ausência de cobertura vegetal na superfície do solo reduz significativamente os conteúdos de água na camada superficial do solo, mas para o caso da camada subsuperficial, esse efeito foi menos intenso, ou seja, pode existir perda de água em menor quantidade do que na camada superficial, ou seja, o efeito de cobertura da palha, reduz com aumento da profundidade do solo.

Na Tabela 8 está apresentada a estatística da macroporosidade (P_{mac}) para as duas camadas do solo nas duas diferentes áreas avaliadas. Na camada superficial a P_{mac} variou entre 0,14 e 0,01 $cm^3 cm^{-3}$, sendo, esses valores máximos observados após plantio (PL) e os mínimos após a primeira colheita (C1); considerando os valores médios da P_{mac} , esses valores variaram entre 0,03 e 0,11 $cm^3 cm^{-3}$.

Os coeficientes de variação (Tab. 8) permitem observa que a P_{mac} apresentou a maior variação em C1, ou seja, após PL. A P_{mac} apresentou uma variação relativamente baixa, para valores médios de $P_{mac} \sim 0,14 cm^3 cm^{-3}$, já para o caso C1 os coeficientes atingiram valores $\geq 50\%$, refletindo alta variação da P_{mac} , sendo possível observar valores altos e baixos da P_{mac} , entre 0,01 e 0,12 $cm^3 cm^{-3}$; após C2 os coeficientes atingiram valores $\leq 34\%$, sugerindo homogeneidade entre os valores da P_{mac} , ou seja, os valores foram reduzidos após as colheitas, reduzindo também sua variação, com valores entre 0,01 e 0,06 $cm^3 cm^{-3}$.

Tabela 8. Estatística descritiva da macroporosidade (P_{mac}) em duas camadas de um Argissolo, na entrelinha e linha, em diferentes fases da cultura e sistemas de colheita de cana-de-açúcar.

Camada	Var.	P_{mac} (cm ³ cm ⁻³)													
		Fase cultural		PL*				C1*				C2*			
		Área		A		B		A		B		A		B	
Lugar	EL*	L*	EL	L	EL	L									
0,00 – 0,20 m	Mínimo	0,07	0,07	0,06	0,06	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	
	Máximo	0,14	0,14	0,11	0,10	0,12	0,06	0,08	0,10	0,06	0,05	0,06	0,06		
	Média	0,11	0,10	0,09	0,08	0,05	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03	0,04		
	Mediana	0,11	0,10	0,08	0,08	0,04	0,03	0,02	0,04	0,03	0,02	0,02	0,04		
	Erro Padrão	0,02	0,02	0,02	0,01	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01		
	CV* (%)	18,18	20,00	22,22	12,50	60,00	66,67	66,67	50,00	33,33	33,33	33,33	25,00		
0,20 - 0,40 m	Mínimo	0,04	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01		
	Máximo	0,16	0,13	0,07	0,06	0,07	0,08	0,07	0,13	0,08	0,07	0,12	0,16		
	Média	0,07	0,07	0,05	0,05	0,05	0,06	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06		
	Mediana	0,06	0,06	0,04	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,05	0,05	0,04	0,04		
	Erro Padrão	0,03	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03	0,02	0,01	0,03	0,04		
	CV (%)	42,86	42,86	20,00	20,00	20,00	16,67	25,00	60,00	40,00	20,00	60,00	66,67		

*AC: pós plantio; C1: primeira colheita; C2: segunda colheita; A: colheita mecanizada; B: colheita semi-mecanizada; EL: Entrelinha; L: linha; CV: coeficiente de variação.

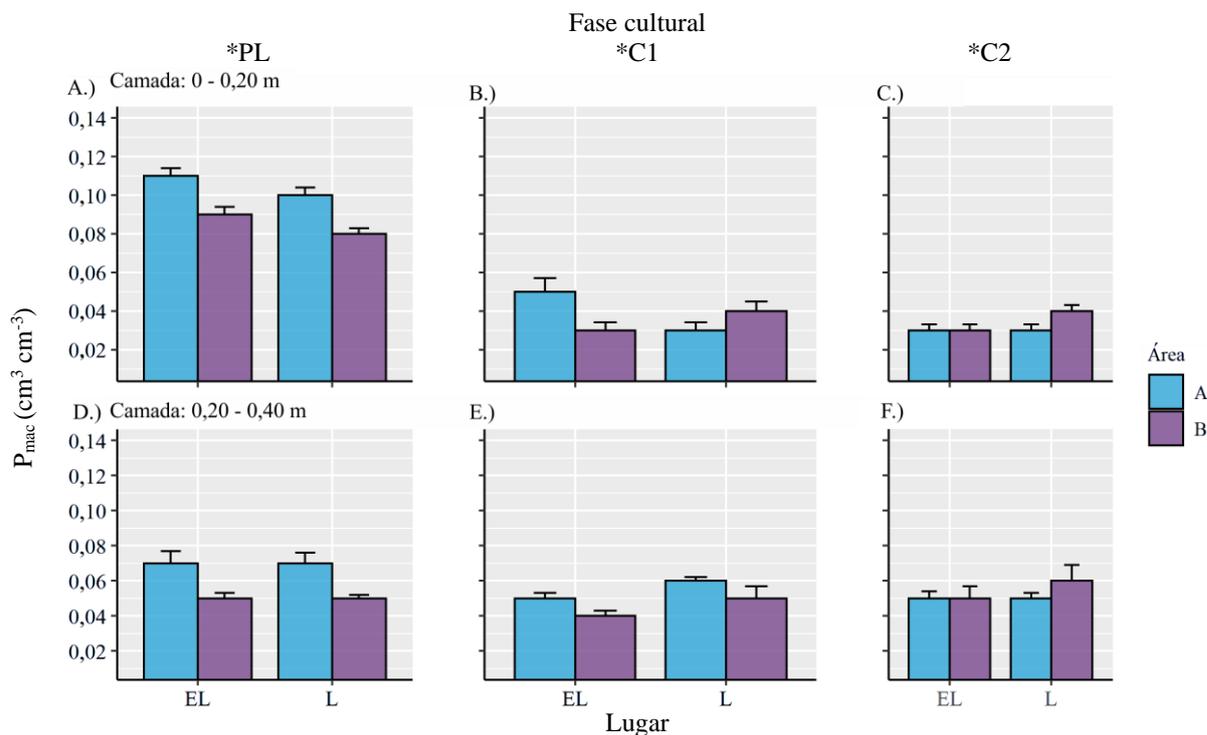
Na camada superficial, a P_{mac} mínima foi de 0,01 cm³ cm⁻³ e o valor máximo de 0,16 0,01 cm³ cm⁻³, e em média os valores variaram entre 0,05 e 0,07 cm³ cm⁻³. Também foi possível observar elevados coeficientes de variação, entre 16 e 67%, sendo os mais elevados observados após o plantio (PL) e segunda colheita da cana (C2).

Na Figura 10 estão apresentadas a P_{mac} das duas camadas do solo, nas diferentes fases da cana e com os diferentes sistemas de colheita utilizados em cada uma das áreas (A e B). Na Figura 10A pode ser observado que após PL, a duas áreas apresentaram valores elevados, quando comparados com as outras fases (C1 e C2), embora a área A apresentou valores $\geq 0,10$ cm³ cm⁻³, sendo mais elevado na entrelinha; para o caso da área B, a P_{mac} foi $\geq 0,80 < 0,10$ cm³ cm⁻³.

Após C1, a P_{mac} foi drasticamente reduzida nas duas áreas (Fig. 10B), ou seja, o sistema de colheita mecanizada diminuiu 50% na EL e 70% na L, e para o caso da colheita semi-mecanizada, 66% na EL e 50% na L, significa que os dois sistemas afetaram a P_{mac} da camada superficial, principalmente na linha da cana (lugar de crescimento da cana), sendo mais severo o sistema mecanizado, embora, os dois sistemas de colheita deixaram a média da P_{mac} abaixo do ponto limite (0,10 cm³ cm⁻³), e após C2 (Fig. 10C) esses valores se mantiveram constantes.

Independente do sistema de colheita, ou mesmo do lugar, linha ou entrelinha, esses resultados evidenciaram a alta sensibilidade da P_{mac} na camada superficial aos sistemas de manejo e colheita da cana-de-açúcar, pois, com o preparo do solo foi possível obter

P_{mac} relativamente elevada $>0,10 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (Fig. 10A), mas após a primeira colheita, essa foi reduzida 50%.



*PL: pós plantio; C1: primeira colheita; C2: segunda colheita; EL: Entrelinha; L: linha; A: colheita mecanizada; B: colheita semi-mecanizada.

Figura 10. Macroporosidade (P_{mac}) em duas profundidades de um Argissolo, na entrelinha e linha, em diferentes fases da cultura e sistemas de colheita de cana-de-açúcar.

Na camada subsuperficial, o efeito do tráfego das máquinas colhedoras na P_{mac} não foi tão evidente, pois, os valores, mesmo anteriores as colheitas (PL) já eram $<0,10 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (Tab. 8) possibilitando observar que as colheitas tanto C1 e C2 ocasionaram de $0,02 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ na P_{mac} (Fig. 8E e F) e estabilizando seu valor, ou seja, essa propriedade do solo já estava no limite da sua máxima redução, ocasionados pelas antepassadas colheitas.

Para Reichert *et al.* (2016) o preparo do solo evidenciou melhora n condição física da camada superficial do solo, porém também observaram que nas camadas mais profundas ($>0,20 \text{ m}$) o preparo não foi igualmente efetivo, pois, as propriedades do solo se mantiveram estáveis sem nenhuma mudança.

Na Tabela 9 estão apresentados os resultados estatísticos da água disponível (θ_{DIS}) podendo ser destacado que essa propriedade do solo foi a menos susceptíveis aos efeitos do tráfego das máquinas dos sistemas de colheita de cana, pois, seus valores apresentaram baixa variação após as colheitas. Na camada superficial do solo foram observados θ_{DIS} máximos de $0,21 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e mínimo de $0,13 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, e em média os valores variaram

entre 0,21 e 0,18 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, sendo também ratificado com os baixos coeficientes de variação (Tab. 9) valores < 12%.

Tabela 9. Estatística descritiva da água disponível (θ_{DIS}) em duas camadas de um Argissolo, na entrelinha e linha, em diferentes fases da cultura e sistemas de colheita de cana-de-açúcar.

Camada	Var.	$\theta_{\text{DIS}}(\text{cm}^3 \text{cm}^{-3})$											
		Fase cultural		PL*		C1*				C2*			
		Área	A*	B*		A		B		A		B	
Lugar	EL*	L*	EL	L	EL	L	EL	L	EL	L	EL	L	
0,00 – 0,20 m	Mínimo	0,21	0,21	0,20	0,20	0,13	0,14	0,14	0,15	0,13	0,14	0,13	0,16
	Máximo	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,20	0,21	0,21	0,20	0,20	0,20	0,20
	Média	0,21	0,21	0,21	0,21	0,19	0,18	0,18	0,19	0,18	0,18	0,18	0,19
	Mediana	0,21	0,21	0,21	0,21	0,20	0,18	0,18	0,19	0,18	0,18	0,18	0,19
	Erro Padrão	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02	0,01
	CV* (%)	0,00	0,00	1,13	2,06	11,89	13,47	10,22	7,56	9,10	10,27	10,57	6,11
0,20 - 0,40 m	Mínimo	0,14	0,12	0,11	0,12	0,13	0,13	0,08	0,08	0,08	0,10	0,10	0,07
	Máximo	0,17	0,17	0,15	0,15	0,16	0,16	0,16	0,17	0,16	0,15	0,17	0,17
	Média	0,15	0,15	0,14	0,14	0,14	0,15	0,13	0,14	0,13	0,14	0,14	0,13
	Mediana	0,15	0,15	0,14	0,14	0,14	0,15	0,13	0,14	0,14	0,14	0,14	0,13
	Erro Padrão	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,01	0,02	0,03
	CV (%)	6,09	10,12	8,89	7,36	6,71	5,39	16,67	17,46	19,53	10,43	14,72	20,91

*AC: pós plantio; C1: primeira colheita; C2: segunda colheita; A: colheita mecanizada; B: colheita semi-mecanizada; EL: Entrelinha; L: linha; CV: coeficiente de variação.

Na camada subsuperficial do solo, a θ_{DIS} , igual que na camada superficial, apresentou baixa variação nos seus valores, observando máximo de 0,17 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ e mínimo de 0,08 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, e os valores médios variaram entre 0,15 e 0,13 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ (Tab. 9).

Na Figura 11 foram apresentados os resultados dos conteúdos de água disponível (θ_{DIS}) das duas camadas do solo, nas entrelinhas e linhas de cada uma das áreas de cana (A e B) evidenciando que os valores, em cada colheita, estiveram estabilizados ou constante e, além disso, foi possível observar semelhanças entre os sistemas de colheita e os efeitos que puderam ter causado na θ_{DIS} , porém, comparando as camadas do solo, pôde ser observado que a camada superficial teve maior capacidade de θ_{DIS} , pois os valores médios foram $\sim 0,18 \text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ e $\sim 0,15 \text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, ou seja, a camada superficial teve 16%.

Essas respostas deixam evidente que a θ_{DIS} da camada superficial foi resistente as alterações físicas causadas pelos sistemas de colheita, embora também foi evidente que a camada subsuperficial, mesmo antes das colheitas C1 e C2, já apresentava a θ_{DIS} reduzida com valores $< 0,16 \text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, ou seja, o processo de preparo do solo realizado antes do PL não foi efetivo para aumentar a θ_{DIS} nessa camada, mas também foi observado, que essa baixa θ_{DIS} foi causada por ações físicas anteriores ao atual ciclo de produção da cana-de-açúcar.

Na Tabela 10 estão apresentando os resultados estatísticos para o carbono orgânico (CO) do solo, nas diferentes áreas (A e B) com os sistemas de colheita mecanizado e semi-mecanizado. A camada superficial do solo apresentou CO que variaram com valor mínimo de $\sim 4 \text{ g kg}^{-1}$ e máximo de $\sim 32,0 \text{ g kg}^{-1}$; as médias nas diferentes fases da cultura e nas diferentes áreas, o CO variou entre $\sim 12,0$ e $\sim 23,0 \text{ g kg}^{-1}$.

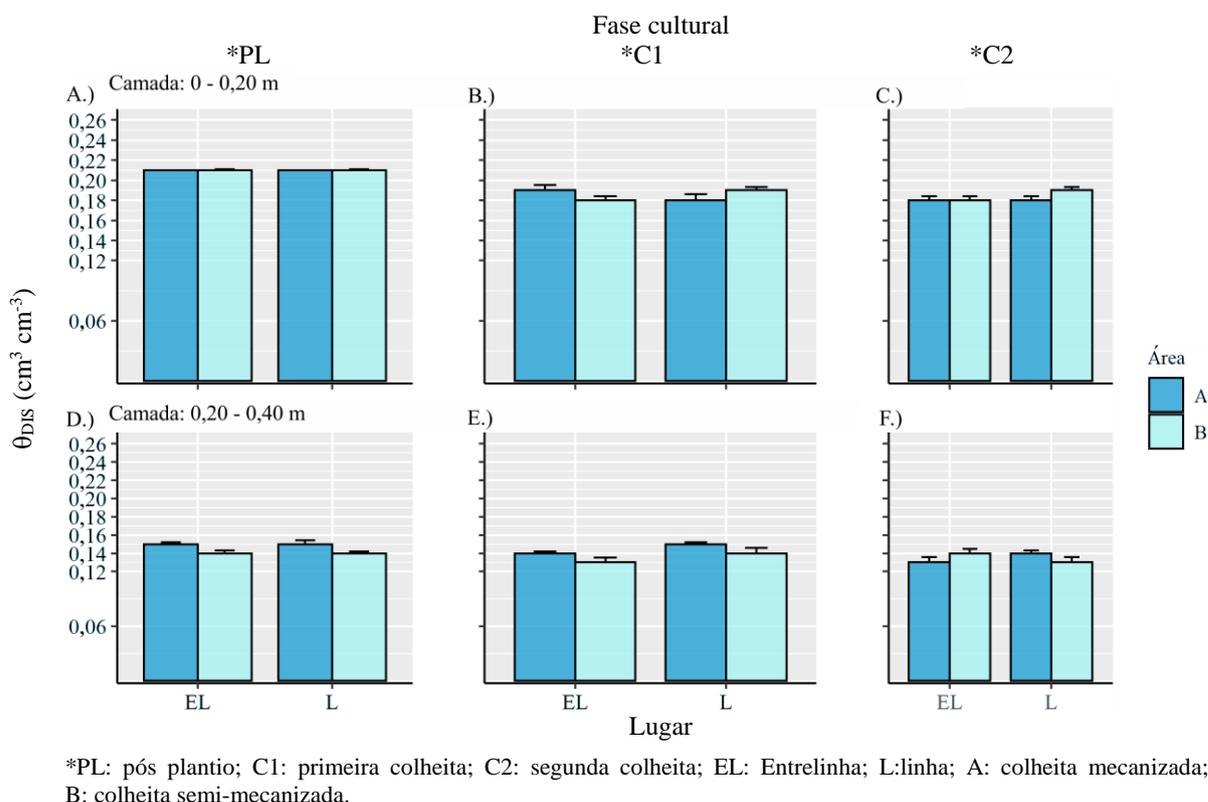


Figura 11. Água disponível (θ_{DIS}) em duas camadas de um Argissolo, na entrelinha e linha, em diferentes fases da cultura e sistemas de colheita de cana-de-açúcar.

Na camada subsuperficial, o CO variou com valor mínimo de $0,70 \text{ g kg}^{-1}$ e máximos de $\sim 25 \text{ g kg}^{-1}$, e as médias, nas diferentes fases da cana-de-açúcar, estiveram entre $\sim 7,0$ e $\sim 15,0 \text{ g kg}^{-1}$ (Tab. 10), mas também ficou evidente que esses valores foram mais elevados antes das colheitas, e foram diminuindo paulatinamente com os processos das colheitas.

Comparando esse efeito da palha de maneira mais específica, ou seja, observando o CO nas linhas e entrelinhas de cana-de-açúcar e na camada superficial das diferentes áreas (A e B), foi evidente que AC, o CO foi relativamente semelhante ($\text{CO} \sim 23 \text{ g kg}^{-1}$) nas duas áreas, e esses valores foram os mais elevados do ciclo (Fig. 12A), mas também observou-se que o CO foi mais elevado nas Linhas da cana (+ $2,0 \text{ g kg}^{-1}$) do que nas entrelinhas e principalmente na área B; e para o caso da camada subsuperficial do solo (Fig. 12D) os valores de CO, antes das colheitas (PL) foram mais baixos do que na

camada superior ($\sim 14 \text{ g kg}^{-1}$) tanto nas linhas como nas entrelinhas de ambas as áreas (A e B).

Tabela 10. Estatística descritiva do carbono orgânico (CO) em duas camadas de um Argissolo Amarelo distrocoeso, na entrelinha e linha, em diferentes fases da cultura e sistemas de colheita de cana-de-açúcar.

Camada	Var.	CO (g kg^{-1})													
		Fase cultural		PL*				C1*				C2*			
		Área		A*		B*		A		B		A		B	
		Lugar	EL*	L*	EL	L	EL	L	EL	L	EL	L	EL	L	
0,00 - 0,20 m	Mínimo	16,07	18,07	17,07	17,63	8,50	6,55	11,80	6,70	7,91	8,76	4,02	5,24		
	Máximo	27,29	27,29	31,98	28,46	19,48	20,33	18,80	19,70	20,41	25,75	25,75	29,27		
	Média	20,88	21,62	22,80	23,87	15,09	14,05	15,46	11,97	13,08	15,62	16,09	16,08		
	Mediana	19,38	21,30	22,41	24,10	15,56	13,77	15,65	11,25	12,16	15,01	17,38	14,95		
	Erro Padrão	3,57	2,30	3,87	3,45	3,03	3,68	2,25	2,95	3,57	4,52	6,52	6,82		
	CV* (%)	17,10	10,64	16,97	14,45	20,08	26,19	14,55	24,64	27,29	28,94	40,52	42,41		
0,20 - 0,40 m	Mínimo	4,83	4,13	5,38	8,31	4,93	7,66	7,35	4,75	3,61	0,70	4,11	3,10		
	Máximo	22,82	20,59	20,89	20,89	18,88	14,50	16,60	20,54	21,92	24,95	10,30	12,70		
	Média	14,21	14,31	14,86	13,46	9,29	10,92	11,87	12,15	12,50	14,88	6,96	7,68		
	Mediana	14,50	14,93	13,62	12,95	9,03	10,68	11,24	11,80	8,40	17,31	6,45	7,71		
	Erro Padrão	4,55	4,96	4,43	3,10	3,09	2,37	2,35	3,77	7,03	8,64	1,83	2,38		
	CV (%)	32,02	34,66	29,81	23,03	33,26	21,70	19,80	31,03	56,24	58,06	26,29	30,99		

*PL: pós plantio; C1: primeira colheita; C2: segunda colheita; A: colheita mecanizada; B: colheita semi-mecanizada; EL: Entrelinha; L: linha; CV: coeficiente de variação.

Após a primeira colheita da cana (C1) na Figura 12B pode ser observado que na camada superficial do solo, o CO diminui de maneira semelhante tanto nas linhas como nas entrelinhas das duas áreas (A e B), reduzindo $\sim 35\%$ e atingindo valores médios de $\sim 15,0 \text{ g kg}^{-1}$, embora, esse decréscimo foi mais pronunciado na entrelinha da área B, sendo observado um valor médio de 12 g kg^{-1} .

Na camada subsuperficial (Fig. 12E) após C1, diminuiu em menor proporção do que na camada superior, embora com valores médios de CO mais baixos, ou seja, nessa camada profunda, o CO diminui $\sim 28\%$ tanto na área A como na B e com valor médio $\sim 10 \text{ g kg}^{-1}$, mas também foi evidente observar que essa redução foi mais aprimorada na EL da área A conforme a Figura 12E.

Durante o processo de colheita de C1 vale ressaltar que no sistema de colheita semi-mecanizada, corte da cana foi realizado manualmente e com ausência de queima, isso significa que, que os resíduos de palha foram dispostos parcialmente sobre a superfície do solo, ou seja, faixas de 3 m de comprimento, com grandes quantidades de palha e aproximadamente a cada 7 m foram colocadas no solo; para o caso do sistema mecanizado, essa palha foi disposta na totalidade da área, de maneira mais homogênea e picada, criando uma cobertura total no solo.

Antes da C2, o sistema semi-mecanizado, na área B, realizou a queima da palha da cana e o sistema mecanizado, por sua parte, manteve a colheita da cana, conservando a palha sobre a totalidade da superfície da área A. Após as colheitas, o CO apresentou mudanças tanto entre as áreas A e B, profundidade, e entre as linhas e entrelinhas, ou seja, na entrelinha da área A, o CO na L diminuiu ~14%, e na EL aumento ~11% seus conteúdos, com respeito aos observados após C1 (Fig. 12B e C).

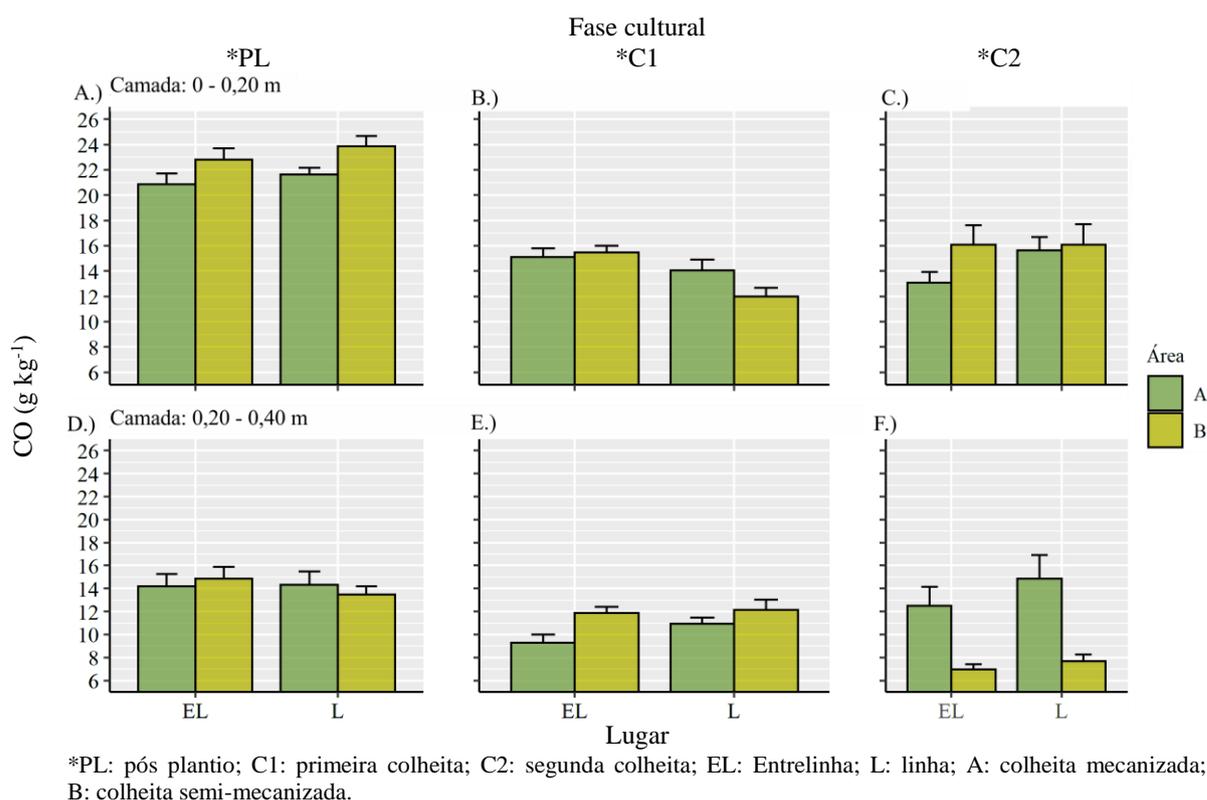


Figura 12. Carbono orgânico (CO) em duas camadas de um Argissolo, na entrelinha e linha, em diferentes fases da cultura e sistemas de colheita de cana-de-açúcar.

Na área B, o CO na camada superficial aumento tanto na L como na EL, e principalmente na L (Fig. 12C) mas, os valores estiveram semelhantes entre as duas áreas (A e B) atingindo valores médios de ~15 g kg⁻¹, isso significa que, após C2 na área B, o CO na linha aumento 33% seu conteúdo com respeito aos resultados após C1; embora, com respeito aos conteúdos observados após PL, o CO na camada superficial das duas áreas (A e B) o conteúdo de CO ainda esteve cerca de -4 g kg⁻¹ ou -20%.

Na camada subsuperficial, após C2, os conteúdos de CO apresentaram respostas bastante diferentes, pois, na área A, os valores de CO estiveram em média de 15 g kg⁻¹, tanto na linha como na entrelinha (Fig. 12F), significa que existiu um aumento de ~35% nos conteúdos de CO com respeito a C1, inclusive, esse valor estiveram próximos aos conteúdos observados após PL; por sua vez, na camada subsuperficial da

área B, o conteúdo CO foi reduzido em média 40% com respeito C1, atingindo valores de $\sim 7,0 \text{ g kg}^{-1}$, tanto na L como na EL (Fig. 12E e F).

Segundo Sousa Junior *et al.* (2018) o carbono orgânico no solo, originário dos resíduos da palha da colheita da cana, só poderia ser mensurável, no mínimo após 12 meses, significa que para este estudo, as amostragens de solo realizadas após a segunda colheita (C2) revelaram seu conteúdo de carbono originário dos resíduos gerados na primeira colheita (C1) pelos dois sistemas de colheita de cana-de-açúcar (mecanizado e semi-mecanizado).

Esses resultados evidenciaram que o corte manual (sem queima) da palha de cana, ou mecanizado apresentaram resultados bastante semelhantes no aporte de CO na camada superficial do solo, atingindo em média 15 g kg^{-1} ; e a palha picada e disposta na totalidade da superfície da área A (sistema mecanizado) mostrou maior aporte de CO para a camada subsuperficial (CO $\sim 14 \text{ g kg}^{-1}$) do que na área B com o sistema de colheita semi-mecanizado, atingindo valores $< 7 \text{ g kg}^{-1}$.

Finalmente, a queima da palha durante a colheita da área B não evidenciou resultados imediatos após C2, nos conteúdos do CO, pois, segundo Signor *et al.* (2016) comparando os aportes de CO no solo pelos sistemas de colheita com queima e sem queima, afirmaram que só após 6 anos podem ser observadas diferenças na camada superficial; para Galdos *et al.* (2009) essas diferenças de aportes de CO, com ou em ausência da queima, podem ser observados até em 2 anos, e nas camadas mais profundas até em 8 anos, além disso, destacaram que o aporte total do CO no solo, em ausência de queima, pode ser até 30% maior do que com a prática da queima da palha da cana.

4. Conclusões

O preparo do solo com aporte de resíduos orgânicos, realizado antes do plantio, foram eficientes para a camada superficial do solo, propiciando baixas densidades e resistência à penetração e elevada macroporosidade, água disponível para as plantas e carbono orgânico do solo.

Independente do sistema de colheita de cana, mecanizada ou semi-mecanizada, as máquinas sem controle de tráfego causaram o maior efeito de compactação na camada superficial do solo após a primeira colheita de cana-de-açúcar, tanto na linha como na entrelinha da camada superficial.

Após a densidade do solo, a macroporosidade foi a propriedade física do solo mais susceptível aos efeitos do tráfego das colheitas de cana-de-açúcar, mostrando as principais mudanças após a primeira colheita de cana.

Com a resistência à penetração do solo foi evidente que, a conservação da palha de cana, manteve conteúdo de água mais elevados na camada superficial, evitando assim, atingir elevadas resistências do solo ($R_p > 3,0$ MPa) do que em ausência de conservação da palha.

A camada subsuperficial do solo, antes das colheitas apresentaram características de um solo compactado, evidenciando poucas mudanças nas propriedades físicas do solo após o tráfego de máquinas de colheita mecanizada ou semi-mecanizada de cana-de-açúcar.

A água disponível para as plantas foi a propriedade física do solo mais resistente aos efeitos do tráfego de máquinas colhedoras, e somente após a segunda colheita, com o sistema mecanizado, foi observada sua redução na camada subsuperficial do solo.

A queima de cana realizada na segunda colheita pelo sistema semi-mecanizado, ocasionou a exposição do solo às condições ambientais, ocasionando menores conteúdos de água no solo ($< 0,10 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) do que no sistema mecanizado que conservou a palha.

Com a conservação da palha, permitida pelo sistema de colheita mecanizada de cana-de-açúcar, foi evidente que, palha picada e disposta de maneira homogênea sobre a superfície do solo manteve estável o conteúdo de carbono na camada superficial (0,0 – 0,20 m) e após 2 anos, essa palha também aumentou o carbono na camada subsuperficial (0,20 – 0,40 m) em contraste à diminuição observada com o sistema semi-mecanizado.

Bibliografia

- ABNT, NBR. NBR 7182: solo—ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1986.
- Arcoverde, S. N.; Souza, C. M.; Suarez, A. H.; Colman, B. A.; *et al.* (2019). Atributos físicos do solo cultivado com cana-de-açúcar em função do preparo e época de amostragem. *Journal of Neotropical Agriculture*, v. 6, p. 41–47.
- Arruda, E. M.; Almeida, R. F.; Domingues, L. A.; Junior, A. C. (2016). Soil porosity and density in sugarcane cultivation under different tillage systems. *African Journal of Agricultural Research*, v. 11, p. 2689–2696.
- Awe, G. O.; Reichert, J. M.; Fontanela, E. (2020). Sugarcane production in the subtropics: Seasonal changes in soil properties and crop yield in no-tillage, inverting and minimum tillage. *Soil & Tillage Research*, v. 196, p. 104447.

- Awe, G. O.; Reichert, J. M.; Wendroth, O. O. (2015). Temporal variability and covariance structures of soil temperature in a sugarcane field under different management practices in southern Brazil. *Soil & Tillage Research*, v. 150, p. 93–106.
- Baio, F. H. R.; Scarpin, I. M.; Roque, C. G.; Neves, D. C. (2017). Soil resistance to penetration in cotton rows and inter-rows. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 21, p. 433–439, 2017.
- Balbuena, R.; Botta, G.; Draghi, L.; Rosatto, H.; *et al.* (2003). Compactación de suelos. Efectos del tránsito del tractor en sistemas de siembra directa. *Spanish journal of agricultural research*, v. 1, p. 75-80.
- Baquero, J. E.; Ralisch, R.; Medina, C.; Tavares Filho, J.; *et al.* (2012). Soil physical properties and sugarcane root growth in a red oxiso. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 36, p. 63–70, 2012.
- Bastos, K. J.; Landell, M. G.; Miranda, E. D. S. (2016). Influência da produtividade da cana-de-açúcar no custo do corte mecanizado. *Revista iPecege*, v. 2, p. 42.
- Bayat, H.; Zadeh, G. (2018). Estimation of the soil water retention curve using penetration resistance curve models. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 144, p. 329–343.
- Bogunovic, I.; Bilandzija, D.; Andabaka, Z.; *et al.* (2017). Soil compaction under different management practices in a Croatian vineyard. *Arabian Journal of Geosciences*, v. 10, p. 2017.
- Brady, N. C.; Weil, R. R.; Weil, R. R. (2008). *The nature and properties of soils*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Calonego, J. C.; Raphael, J. P.; Rigon, J. P.; *et al.* (2017). Soil compaction management and soybean yields with cover crops under no-till and occasional chiseling. *European Journal of Agronomy*, v. 85, p. 31–37.
- Capaz, R. S.; Carvalho, V. S.; Nogueira, L. A. (2013). Impact of mechanization and previous burning reduction on GHG emissions of sugarcane harvesting operations in Brazil. *Applied Energy*, v. 102, p. 220–228.
- Castioni, G. A.; Cherubin, M. R.; Bordonal, R.; *et al.* (2019). Straw removal affects soil physical quality and sugarcane yield in Brazil. *BioEnergy Research*, v. 12, p. 1–12.
- Cavalcanti, R. Q.; Rolim, M. M.; De Lima, R. P.; *et al.* (2019). Soil physical and mechanical attributes in response to successive harvests under sugarcane cultivation in Northeastern Brazil. *Soil & Tillage Research*, v. 189, p. 140–147.
- Cherubin, M. R.; Lisboa, I. P.; Silva, A. G.; *et al.* (2019). Sugarcane straw removal: implications to soil fertility and fertilizer demand in Brazil. *Bioenergy Research*, v. 12, n. 4, p. 888–900.
- Cong, P.; Wang, J.; Li, Y.; *et al.* (2020). Changes in soil organic carbon and microbial community under varying straw incorporation strategies. *Soil & Tillage Research*, v. 187, p. 110 – 118.
- Corrêa, S. T.; Carvalho, J. L.; Hernandez, T. A.; *et al.* (2017). Assessing the effects of different amounts of sugarcane straw on temporal variability of soil moisture content and temperature. *European Biomass Conference and Exhibition Proceedings*, v. 2017, p. 1691–1706.

- da Silva, W. M.; Bianchini, A.; da Cunha, C. A. (2016). Modeling and correction of soil penetration resistance for variations in soil moisture and soil bulk density. *Engenharia Agrícola*, v. 36, p. 449–459.
- de Sousa, A. C.; Farhate, C. V.; de Souza, Z. M.; Torres, J. L.; *et al.* (2019). Soil load-bearing capacity and development of root system in area under sugarcane with traffic control in Brazil. *Sugar Tech*, v. 21, 153–161.
- dos Anjos, J. C.; De Andrade, A. S.; Bastos, E. A.; *et al.* (2017). Water storage in a Plinthaqualf cultivated with sugarcane under straw levels. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 52, p. 464–473.
- dos Santos, H. G.; Jacomine, P. T.; dos Anjos, L. H.; de Oliveira, V. A.; *et al.* (2018). Brazilian soil classification system. *Embrapa Solos-Livro técnico (INFOTECA-E)*.
- Esteban, D. A.; De Souza, Z. M.; Da Silva, R. B.; *et al.* (2020). Impact of permanent traffic lanes on the soil physical and mechanical properties in mechanized sugarcane fields with the use of automatic steering. *Geoderma*, v. 362, p. 114097.
- Esteban, D. A.; De Souza, Z. M.; Tormena, C. A.; *et al.* (2019). Soil compaction, root system and productivity of sugarcane under different row spacing and controlled traffic at harvest. *Soil & Tillage Research*, v. 187, p. 60–71.
- Galdos, M. V.; Cerri, C. C.; Cerri, C. E. (2009). Soil carbon stocks under burned and unburned sugarcane in Brazil. *Geoderma*, v. 153, p. 347–352.
- Georges, J. E. (1980). Effects of harvest traffic and soil water content on soil compaction and regrowth of sugarcane. *Agricultural Engineerin*, v. 17, p. 1079–1088.
- Gírio, L. A.; Silva, R. P.; Menezes, P. C.; Carneiro, F. M. *et al.* (2019). Quality of multi-row harvesting in sugarcane plantations established from pre-sprouted seedlings and billets. *Ind. Crops Prod.*, v.142, 111831.
- Gmach, M. R., Scarpore, F. V., Cherubin, *et al.* (2019). Sugarcane straw removal effects on soil water storage and drainage in southeastern Brazil. *J. Soil Water Conserv.* 74, 466–476.
- Guimarães Júnnyor, W. S.; Diserens, E.; De Maria, I. C.; *et al.* (2019). Prediction of soil stresses and compaction due to agricultural machines in sugarcane cultivation systems with and without crop rotation. *Science of the Total Environment*, v. 681, p. 424–434.
- Guimarães Júnnyor, W. S.; Maria, I. C.; Araujo-Junior, C. F.; *et al.* (2019b). Soil compaction on traffic lane due to soil tillage and sugarcane mechanical harvesting operations. *Scientia Agricola*, v. 76, p. 509–517.
- Hernández, T. D.; Slater, B. K.; Corbalá, R.; Shaffer, J. M. (2019). Assessment of long-term tillage practices on physical properties of two Ohio soils. *Soil & Tillage Research*, v. 186, p. 270–279.
- Herrera, J. L.; Tejedor, T. H.; Saa-Requejo, A.; Tarquis, A. M. (2016). Effects of tillage on variability in soil penetration resistance in an olive orchard. *Soil Research*, v. 54, 134–143.
- Hillel, D.; Hatfield, J. L. (2005). *Encyclopedia of Soils in the Environment* (v. 3). Amsterdam: Elsevier.
- Hu, W.; Tabley, F.; Beare, M.; Tregurtha, C. *et al.* (2018). Short-term dynamics of soil physical properties as affected by compaction and tillage in a silt loam soil. *Vadose Zone Journal*, v. 17, p. 1-13.

- Libardi, P. L. (2005). *Dinâmica da Água no Solo*, v. 61. Edusp.
- Lima, R. P.; Da Silva, A. P.; Giarola, N. F.; Da Silva, A. R.; *et al.* (2017). Changes in soil compaction indicators in response to agricultural field traffic. *Biosystems Engineering*, v. 162, p. 1-10.
- Lin, L.; He, Y.; Chen, J. (2016). The influence of soil drying- and tillage-induced penetration resistance on maize root growth in a clayey soil. *Journal of Integrative Agriculture*, v. 15, p. 1112–1120.
- Lisboa, I. P.; Cherubin, M. R.; Satiro, L. S.; *et al.* (2019). Applying Soil Management Assessment Framework (SMAF) on short-term sugarcane straw removal in Brazil. *Industrial Crops & Products*, v. 129, p. 175–184.
- Ma, S.; Karkee, M.; Scharf, P. A.; Zhang, Q. (2014). Sugarcane harvester technology: A critical overview. *Applied Engineering in Agriculture*, v. 30, p. 727–739.
- McPhee, J. E.; Aird, P. L.; Hardie, M. A.; Corkrey, S. R. (2015). The effect of controlled traffic on soil physical properties and tillage requirements for vegetable production. *Soil & Tillage Research*, v. 149, p. 33–45.
- Naderi-Boldaji, M.; Kazemzadeh, A.; Hemmat, A.; Rostami, S. *et al.* (2018). Changes in soil stress during repeated wheeling: A comparison of measured and simulated values. *Soil Research*, v. 56, n. 2, p. 204-214.
- Ortiz, P. F.; Rolim, M.; De Lima, J. L.; *et al.* (2017). Physical qualities of an Ultisol under sugarcane and Atlantic forest in Brazil. *Geoderma Regional*, v. 11, p. 62–70.
- Otto, R.; Silva, A. P.; Franco, H. C.; Oliveira, E. C.; *et al.* (2011). High soil penetration resistance reduces sugarcane root system development. *Soil & Tillage Research*, v. 117, p. 201–210.
- Pires, L. F.; Borges, J. A.; Rosa, J. A.; *et al.* (2017). Soil structure changes induced by tillage systems. *Soil & Tillage Research*, v. 165, p. 66–79.
- Reichert, J. M.; Da Rosa, V. T.; Vogelmann, E. S.; *et al.* (2016). Conceptual framework for capacity and intensity physical soil properties affected by short and long-term (14 years) continuous no-tillage and controlled traffic. *Soil & Tillage Research*, v. 158, p. 123–136.
- Reicosky, D. C. (2015). Conservation tillage is not conservation agriculture. *Journal of Soil and water conservation*, v. 70, p. 103A-108A.
- Rodrigues, C. K.; Lopes, E.; Müller, M. M.; Genú, A. M. (2015). Variabilidade espacial da compactação de um solo submetido ao tráfego de harvester e forwarder. *Scientia Floretalis*, v.43, p. 387-394.
- Rossi Neto, J.; Souza, Z. M.; Kölln, O. T.; Carvalho, J. L. *et al.* (2018). The Arrangement and Spacing of Sugarcane Planting Influence Root Distribution and Crop Yield. *Bioenergy Res.*, v.11, p. 291–304.
- Sağlam, M.; Dengiz, O. (2017). Spatial variability of soil penetration resistance in an alluvial delta plain under different land uses in middle Black Sea Region of Turkey. *Archives of Agronomy and Soil Science*, v. 63, p. 60–73.
- Saha, R.; Paswan, A.; Majumdar, B.; Barman, D.; *et al.* (2018). Soil quality under tillage and residue management in jute (*Corchorus spp.*) Based cropping systems of Indo-gangetic plains. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, v. 7, p. 133–140.

- Salem, H. M.; Valero, C.; Muñoz, M. Á.; Rodríguez, M. G.; Silva, L. L. (2015). Short-term effects of four tillage practices on soil physical properties, soil water potential, and maize yield. *Geoderma*, v. 237, p. 60–70.
- Scarpore, F. V.; van Lier, Q. D.; de Camargo, L.; *et al.* (2019). Tillage effects on soil physical condition and root growth associated with sugarcane water availability. *Soil & Tillage Research*, v. 187, p. 110–118.
- Signor, D.; Czyzca, R. V.; Milori, D. M.; Cunha, T. J.; Cerri, C. E. (2016). Atributos químicos e qualidade da matéria orgânica do solo em sistemas de colheita de cana-de-açúcar com e sem queima. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 51, p. 1438–1448.
- Silva, R. P.; Rolim, M. M.; Gomes, I. F.; *et al.* (2018). Numerical modeling of soil compaction in a sugarcane crop using the finite element method. *Soil & Tillage Research*, v. 181, p. 1–10.
- Soil Survey Staff (2014). *Keys to soil taxonomy: Twelfth Edition*. Washington, DC, USA. 372p.
- Sousa Junior, J. G.; Cherubin, M. R.; Oliveira, B. G.; *et al.* (2018). Three-year soil carbon and nitrogen responses to sugarcane straw management. *Bioenergy Research*, v. 11, p. 249–261.
- Souza, G. S.; Souza, Z. M.; Cooper, M.; Tormena, C. A. (2015). Controlled traffic and soil physical quality of an Oxisol under sugarcane cultivation. *Sci. Agric.*, v. 72, p. 270–277.
- Stolf, R. (1991). Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência de solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 15, p. 229-235.
- Streck, C. A., Reinert, D. J., Reichert, J. M., Kaiser, D. R. (2004). Modificações em propriedades físicas com a compactação do solo causada pelo tráfego induzido de um trator em plantio direto. *Ciência Rural*, v. 34, p. 755-760.
- Surendran, U.; Ramesh, V.; Jayakumar, M.; Marimuthu, S.; Sridevi, G. (2016). Improved sugarcane productivity with tillage and trash management practices in semiarid tropical agroecosystem in India. *Soil & Tillage Research*, v. 158, p. 10–21.
- Teixeira, P. C.; Donagemma, G. K.; Fontana, A.; Teixeira, W. G. (2017). *Manual de métodos de análise de solo*. Rio de Janeiro, Embrapa. 573p.
- Tormena, C. A. Karlen, D. L.; Logsdon, S. *et al.* (2017). Corn stover harvest and tillage impacts on near-surface soil physical quality. *Soil & Tillage Research*, v. 166, p. 122-130.
- Vischi Filho, O. J.; De Souza, Z. M.; De Souza, G. S.; *et al.* (2017) Physical attributes and limiting water range as soil quality indicators after mechanical harvesting of sugarcane. *Australian Journal of Crop Science*, v. 11, p. 169–176.
- Warrick, A. W.; Nielsen, D.R. (1980). Spatial variability of soil physical properties in the field. *Application of soil physics*. p. 319-344.
- Yeomans, J. C.; Bremner, J. M. (1988). A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. *Communications in soil science and plant analysis*, v. 19, p. 1467-1476.

- CAPÍTULO II -

Mudanças na qualidade física num Argissolo com cana-de-açúcar em diferentes fases e sistemas de colheita

Mudanças na qualidade física em um Argissolo cultivado com cana-de-açúcar em diferentes sistemas de colheita e fases culturais

RESUMO: A redução da produtividade e longevidade na cana-de-açúcar podem estar relacionadas com o aumento de camadas compactadas e a perda da qualidade física do solo, ocasionada pelo tráfego agrícola nas épocas de colheita. Com o atual sistema semi-mecanizado de colheita, os riscos e extensão de áreas compactadas podem aumentar nas plantações, pois utilizam-se máquinas convencionas para tráfegar, em ausência de controle de tráfego, a totalidade da área do plantio; por sua vez, o sistema mecanizado otimiza o processo da colheita, mas também, utilizam máquinas mais robustas e ajustadas ao plantio, que reduzem a quantidade de área tráfegada, podendo diminuir os riscos de compactação. Diante disso, objetivou-se avaliar a qualidade física de um Argissolo cultivado com cana-de-açúcar, sob diferentes fases culturais e sistema de colheita. Em duas áreas, uma com sistema de colheita mecanizada, e a outra semi-mecanizada, foram determinados, após plantio e, a primeira e segunda colheita da cana, os índices de qualidade física do solo, contemplando as capacidades de suporte ao crescimento radicular e armazenamento de água no solo; por sua vez, esses estiveram em função da densidade, resistência à penetração, macroporosidade, água disponível e carbono orgânico do solo. Após o plantio, o solo, em cada área, apresentou boas qualidades físicas, evidenciando condições favoráveis para a capacidade de suporte ao crescimento radicular e armazenamento de água do solo. Com o desenvolvimento do índice de qualidade física do solo foi possível evidenciar mudanças a cada fase da cana-de-açúcar, nos indicadores físico, nas capacidades de suporte ao crescimento radicular e armazenamento de água no solo. Após plantio, o solo apresentou as melhores condições físicas e melhor índice de qualidade. Após a primeira colheita, na camada superficial foi observada a maior perda de qualidade, reduzindo a capacidades de suporte ao crescimento radicular, sendo isto mais pronunciado no sistema de colheita semi-mecanizado do que no mecanizado. A densidade, a macroporosidade e o carbono orgânico do solo foram as propriedades do solo que como indicadores de qualidade mostraram alta sensibilidade, na camada superficial e subsuperficial ao tráfego das máquinas de colheita de cana-de-açúcar.

Palavras-chave: Agricultura, compactação do solo, colheita mecanizada e semi-mecanizada, física do solo, *Saccharum spp.*

Temporal changes of physical quality in an Argissolo cultivated with sugarcane in different harvest systems

ABSTRACT: The reduction of productivity and longevity in sugarcane may be related to the increase in compacted layers and the loss of physical soil quality caused by agricultural traffic during harvest seasons. With the current semi-mechanized harvesting system, the risks and extension of compacted areas can increase in the plantations, since conventional machines are used to traffic, in the absence of traffic control, the entire planting area; in turn, the mechanized system optimizes the harvesting process, but also uses more robust machines adjusted to the planting, which reduce the amount of trafficked area and may decrease the risk of compaction. Therefore, the objective was to evaluate the physical quality of an Argissolo grown with sugar cane, under different cultural phases and harvest system. In two areas, one with mechanized harvesting system and the other semi-mechanized, after planting and the first and second cane harvest, the physical quality indices of the soil were determined, considering the capacity to support root growth and water storage in the soil; these, in turn, were in function of density, penetration resistance, macroporosity, available water and organic carbon of the soil. After planting, the soil, in each area, showed good physical qualities, showing favorable conditions for the capacity to support root growth and soil water storage. With the development of the soil physical quality index, it was possible to evidence changes at each sugarcane phase, in the physical indicators, in the capacity to support root growth and water storage in the soil. After planting, the soil presented the best physical conditions and best quality index. After the first harvest, the highest quality loss was observed in the superficial layer, reducing the capacity to support root growth, this being more pronounced in the semi-mechanized harvest system than in the mechanized one. The density, macroporosity and organic carbon of the soil were the properties of the soil that as quality indicators showed high sensitivity, in the superficial and subsurface layer, to the traffic of sugar cane harvesting machines.

Keywords: Agriculture, soil compaction, mechanized and semi-mechanized harvest, soil physics, *Saccharum spp.*, soil health.

1. Introdução

O preparo de solos agrícola geralmente demanda altos custos, porém, permitem reduzir a compactação do solo, pois facilita o plantio, e principalmente, para renovar a cultura da cana-de-açúcar, com isto, aumenta a produtividade (McPHEE *et al.*, 2015; SURENDRAN *et al.*, 2016; AWE *et al.*, 2020).

A compactação do solo é causada pelo tráfego intensivo de máquinas agrícolas, principalmente, no processo de colheita, pois são utilizadas máquinas para diferentes atividades: corte, carregamento, transporte da cana, etc., esse tráfego pode causar alterações nas propriedades físicas do solo, como alta densidade e resistências à penetração, menor disponibilidade de água para as plantas (CAVALCANTI *et al.*, 2019; GUIMARÃES JÚNNYOR *et al.*, 2019; SCARPARE *et al.*, 2019)

Desde o ponto de vista agrícolas, vários autores (VISCHI FILHO *et al.*, 2017; de SOUSA *et al.*, 2019; ESTEBAN *et al.*, 2020) têm reportado que, o sistema de colheita com tráfego de máquinas compacta criticamente o solo (altas densidades, elevada resistência à penetração, formação de camadas impeditivas) limitando o desenvolvimento das culturas e reduzindo a produtividade e deixam insustentável a cultura da cana.

Atualmente, no Nordeste brasileiro, a cultura de cana-de-açúcar vem sendo cada vez mais mecanizada, principalmente no processo da colheita, inclusive, atualmente essa Região apresenta um processo de transição, do sistema de colheita semi-mecanizado para mecanizado, pois a ausência do controle de tráfego no tradicional sistema semi-mecanizado causa alta compactação, inclusive nas camadas mais profundas do solo (ORTIZ *et al.*, 2017; SILVA *et al.*, 2018; CAVALCANTI *et al.*, 2019) e além disso, com a tradicional queima da palha, reduz drasticamente o conteúdo de carbono, aumentando a susceptibilidade à compactação e degradação dos solos (LISBOA *et al.*, 2019; CASTIONI *et al.*, 2019; CHERUBIN *et al.*, 2019).

Como alternativa, o sistema mecanizado utiliza máquinas mais robustas, mas também, o plantio apresenta um desenho ajustados às máquinas, que inclui linhas (entrelinhas) exclusivas para a passagem das máquinas, permitindo organizar o tráfego e confinar os efeitos de compactação do solo (ROSSI NETO *et al.*, 2018; GÍRIO *et al.*, 2019; ESTEBAN *et al.*, 2019).

Com o sistema de colheita mecanizado, além de ganhar eficiência no processo de colheita, espera-se também reduzir os problemas de compactação, observado no sistema semi-mecanizado de cana-de-açúcar, e para avaliar os impactos desse sistema de colheita

na compactação do solo, índices de qualidade física do solo vem sendo desenvolvidos (e.g. DEXTER, 2004; VISCHI FILHO *et al.*, 2017). Através da avaliação da qualidade física do solo, procura-se determinar a capacidade do solo (relacionadas com agricultura) em função das suas propriedades, sendo possível, além de conhecer o estado do solo, quantificar e comparar as diferentes práticas agrícolas relacionadas com o manejo e uso do solo (KARLEN *et al.*, 2003; MENTA *et al.*, 2018).

Nos diferentes estudos de qualidade física aplicam-se diferentes técnicas que utilizam as propriedades físicas como indicadores de qualidade, e mais atualmente, a determinação da qualidade do solo foi aprimorada mediante a utilização de modelos aditivos que integram as capacidades do solo (armazenamento de água e suporte ao crescimento radicular das plantas) e as propriedades físicas do solo (DORAN & PARKIN, 1996; KARLEN *et al.*, 2003), traduzindo toda essa variedade de respostas do solo, em uma escala única de qualidade que permite qualificar e determinar o estado de qualidade do solo.

Nesse sentido, o objetivo desse trabalho foi avaliar as mudanças na qualidade física num Argissolo com cana-de-açúcar em diferentes fases e sistemas de colheita, mecanizada e semi-mecanizada, a partir de um modelo aditivo que contempla as capacidades de armazenamento e suporte ao crescimento radicular das plantas, em função de propriedades físicas do solo.

2. Material e métodos

2.1 Sítio experimental

O estudo foi realizado durante os meses de janeiro de 2018 até março de 2020, numa área cultivada com cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) localizada no município de Igarassu, Estado de Pernambuco, Brasil (Fig. 1, ver mapas) altitude de 180 m e conforme classificação de Köppen, clima quente e úmido, megatérmico (As') com temperatura média de $\sim 25 \pm 0,31$ °C, com máximos e mínimos de 33,1 e 18,6 °C, umidade relativa média de $\sim 77 \pm 0,95\%$, com máximas e mínimas de 95 e 42%, e precipitação anual de $\sim 1487 \pm 63$ mm variando entre ~ 1304 e 1583 mm ano, para os períodos de 2016 - 2019.

O solo da área foi classificado como Argissolo/*Ultisol* (dos Santos, 2018; Soil Survey Staff, 2014) com boas características para o desenvolvimento da agricultura, porém, com fertilidade natural limitada, predominância de areia com baixos conteúdos de argila e considerado suscetível ao efeito de erosão hídrica (BRADY & WEIL, 2008; dos Santos, 2018).

2.2 Áreas de Estudo

Num talhão de 18 ha (Fig. 1) cultivado com cana-de-açúcar, renovado com preparo convencional do solo em toda a área e em condições de relevo relativamente homogêneas (inclinação $\leq 10\%$) foram delimitadas duas parcelas de 100×100 m, denominadas, Área A, a ser colhida com o sistema totalmente Mecanizado, e Área B com o sistema Semi-mecanizado. Em cada uma das áreas experimentais (Áreas A e B) foram delimitados e marcados pontos espaçados no perímetro das áreas, utilizando-se trena e GPS para a georreferenciação (Fig. 1).

Na área toda foi realizado o preparo convencional do solo (02/2019), constando de subsolagem, gradagem, nivelamento e sulcagens, fazendo uso de tratores e implementos agrícolas. Para a execução do plantio foram utilizados tratores, que carregaram e distribuíram a cana (variedade RB92579) pela área entre os sulcos.

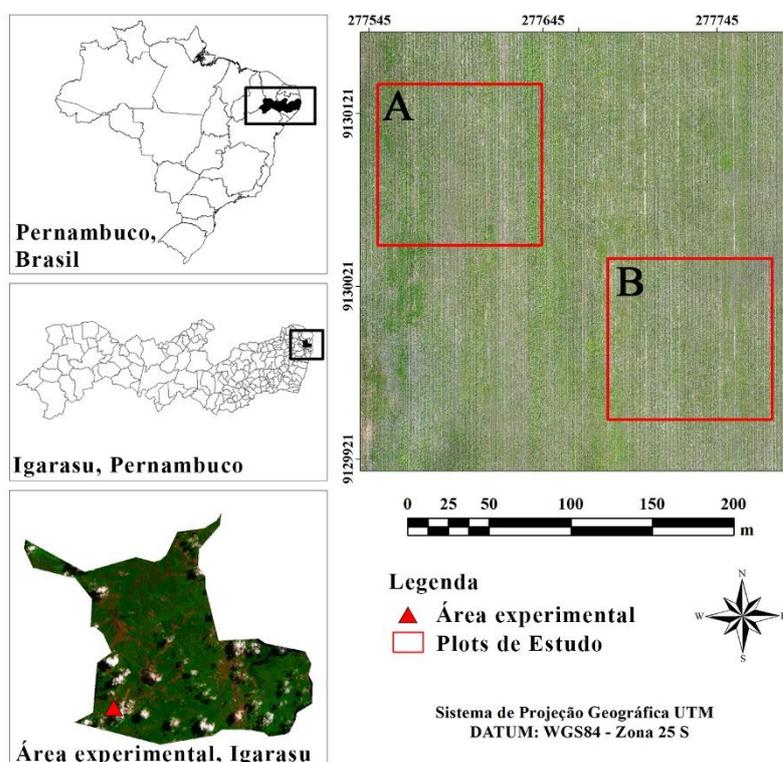


Figura 1. Localização experimental, área agrícola da cana-de-açúcar e delimitações da área após plantio em Igarassu, PE, Brasil.

O plantio foi organizado em linhas duplas ou espaçamento combinado, onde um par de fileiras de cana-de-açúcar, com distância de 0,90 m, formam a linha de plantio, e entre cada linha, deixados um espaçamento de 1,40 m para formar as entrelinhas de cana, reservado para o tráfego das máquinas agrícolas.

No sistema mecanizado, todo o processo foi realizado por máquinas e sem controle de tráfego de precisão. Na Área A foi utilizada a colhedora de esteira (modelo CH670)

com cortador de base e rolo elevador, com ~20 t de peso, e o sistema de transbordo (trator agrícola e transbordo) com capacidade de 10 t, utilizado para o transporte da colheita.

Para o caso da colheita semi-mecanizada, utilizada na Área B, foi realizada com queima da palha e corte manual; enquanto o carregamento foi realizado com máquinas carregadeiras convencionais (trator com garra hidráulica); e para o transporte, caminhão e reboque convencionais com capacidade de carregamento de 12 t, destacando a ausência de controle de tráfego em toda a operação.

Tabela 1. Caracterização do solo e da área de cana-de-açúcar.

Características	Áreas de cana-de-açúcar	
Classe	<i>Ultisol</i> / Argissolo*	
Densidade de partícula (g cm ⁻³)	2,63	
Anos de cultivo	50 anos (Registro. 1969)	
Ciclo produtivo	1	
Fase cultura	Renovação de plantio	
Camada (m)	0 – 0,20	0,20 – 0,40
Textura	Areia Franca	Franco arenoso
Areia (%)	83,36	78,65
Silte (%)	9,07	9,28
Argila (%)	7,57	12,07
Matéria orgânica (g kg ⁻¹)	4,00	2,44
Densidade máxima (g cm ⁻³)	1,90	1,85
Umidade crítica (%)	8,16	8,64

*Sistema brasileiro de classificação de solos (dos Santos, 2018)

Na Área A, o processo de colheita, sempre foi mecanizado e em “cana-crua”, ou seja, sem prévia queima da palha, enquanto no caso da Área B, na primeira colheita (C1) o processo foi realizado também com “cana-crua”, embora, na segunda colheita (C2) o foi realizado em “cana-queimada”, efetuada um dia anterior à colheita, eliminando a folhagem para facilitar o corte manual.

Para a caracterização física do solo foram coletadas amostras deformadas, entre a camadas superficial (0–0,20 m) e subsuperficial (0,20–0,40 m) e as análises realizadas no Laboratório de Mecânicas dos Solo e Aproveitamento de Resíduos da UFRPE, conforme Teixeira *et al.* (2017) e NBR 7182 (ABNT, 1986).

Nas características do solo da área cultivada com cana-de-açúcar, Tabela 1, destaca-se a mudança na textura, de areia franca na camada superficial, para franco arenosa nas camadas mais profundas, como também maior conteúdo de matéria orgânica na camada superficial pela prévia adubação com resíduos, torta-de-filtro (20 t ha⁻¹).

2.3 Variáveis estudadas e experimento

Em cada uma das áreas foram avaliados os efeitos de dois sistemas de colheita de cana-de-açúcar nas propriedades físicas dos solos e em diferentes fases da cultura: após o plantio (PL), após a primeira (C1) e segunda (C2) colheita. As coletas do solo, em todos

os casos, foram realizadas após 90 dias de cada operação, após o plantio da cana (PL), primeira e segunda colheita de cana (C1 e C2).

Para a avaliação, inicialmente foi estabelecida, em cada uma das áreas (A e B) uma malha amostral de 20 × 20 m pontos equidistantes (Fig. 2A) e em cada um desses foram realizadas as respectivas amostragens, tanto na camada superficial e subsuperficial, ou seja, entre a profundidade de 0 - 0,20 m e 0,20 – 0,40 m, respectivamente (Fig. 2B). Além disso, os pontos amostrais estiveram intercalados entre as linhas (L) e entrelinha (EL) plantio, 18 pontos verticais na L e 18 na EL (Fig. 2A e B), totalizando 36 pontos amostrais para 2 camadas (superficial e subsuperficial), 2 áreas (A e B) e 3 épocas de coleta (PL, C1 e C2).

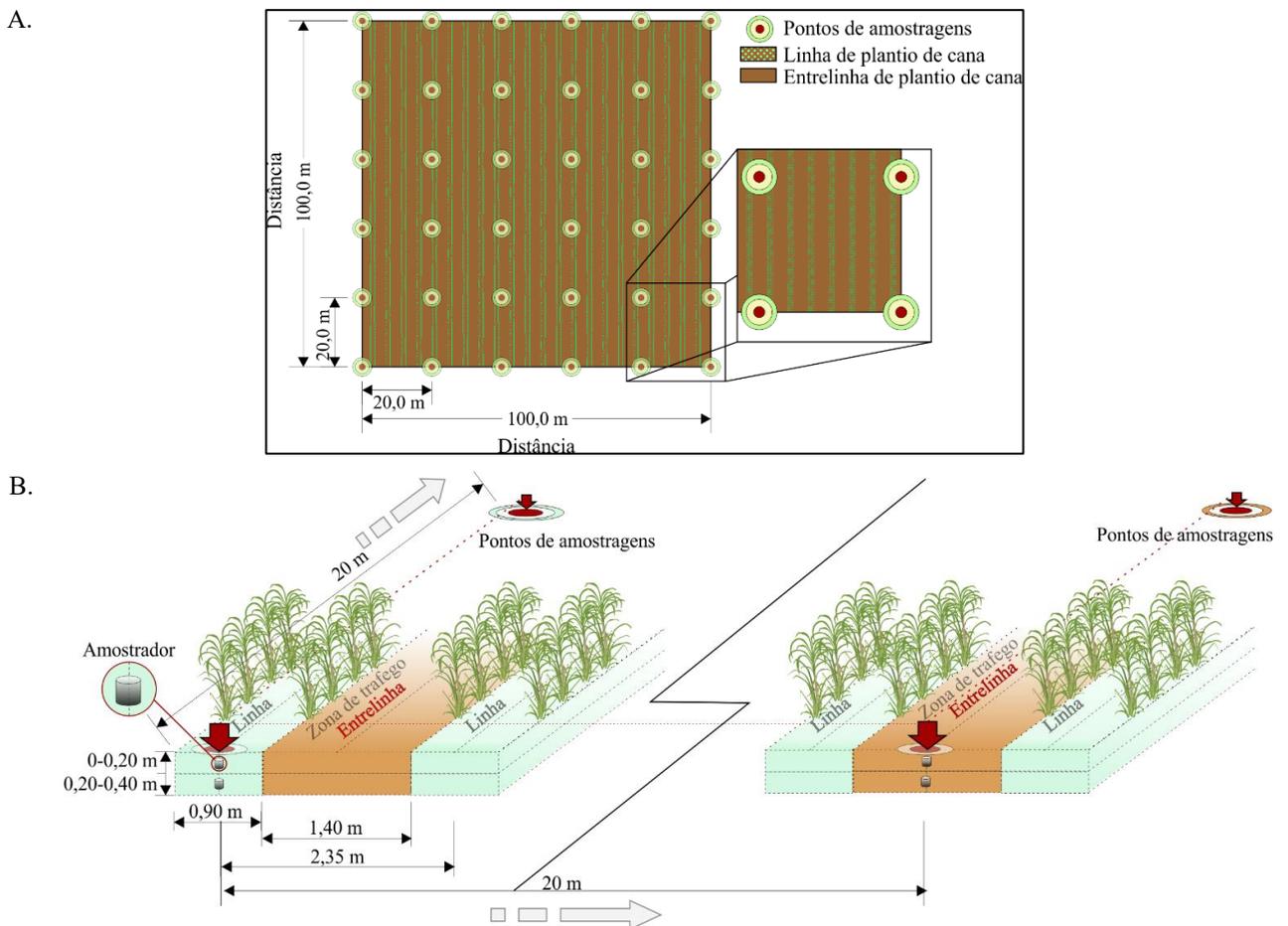


Figura 2. Esquema da malha e pontos amostrais nas linhas e entrelinhas na área de cana-de-açúcar.

Com as amostragens foram realizadas as seguintes avaliações físicas do solo: densidade do solo ($\rho_d - g\ kg^{-1}$), conteúdo de água no solo ($\theta - cm^3\ cm^{-3}$), resistência à penetração do solo ($R_p - MPa$), macroporosidade ($P_{mac} - cm^3\ cm^{-3}$) e água disponível ($\theta_{DIS} - cm^3\ cm^{-3}$); e também foi incluindo o carbono orgânico ($CO - g\ kg^{-1}$).

A ρ_d foi determinada com amostras de solo indeformada, utilizando o amostrador de Ulhand com anéis metálicos de volume interno de 100 cm³; para determinar o θ foi necessário coletar amostras de solo deformado em campo, aplicado o método gravimétrico (TEIXEIRA *et al.*, 2017). Para a determinação da resistência à penetração (R_p) foi utilizado um penetrômetro de impacto, conforme o modelo de Stolf (1991) e as R_p do solo foram realizadas a cada 0,05 m, até atingir a profundidade de 0,40 m no solo. Para expressar a resistência (MPa) foi aplicada a equação de ajuste proposta por Stolf (1991).

Para a obtenção da P_{mac} e θ_{DIS} foi necessário determinar, os conteúdos de água no solo a diferentes tensões, ou seja, com as amostras indeformadas foi possível obter o ponto de saturação nas amostras (θ_{SAT} - cm³ cm⁻³) e na câmara de *Richards* foram obtidos os conteúdos de água nas tensões de 6, 10, e 1500 kPa (θ_{6kPa} , θ_{10kPa} , e $\theta_{1500kPa}$ - cm³ cm⁻³) conforme Teixeira *et al.* (2017), e finalmente foi determinado a P_{mac} e θ_{DIS} aplicando as seguintes equações:

$$P_{mac} = \theta_{SAT} - \theta_{6kPa} \quad \text{Eq. 1}$$

$$\theta_{DIS} = \theta_{10kPa} - \theta_{1500kPa} \quad \text{Eq. 2}$$

Para determinar o conteúdo de carbono (CO) em cada um dos pontos da malha amostral, foram coletadas amostras de 200 g e aplicando a metodologia de titulação proposta por Yeomans e Bremner (1988) foi determinado o conteúdo de CO no solo.

2.4 Indicadores (IFQs) e Índice de qualidade físico do solo (IQFS)

Para determinar o índice de qualidade física do solo (IQFS) inicialmente, as variáveis físicas foram transformadas em indicadores de qualidade (IFQs); os valores de cada uma das propriedades (variáveis) foram normalizados em uma escala única de medida, 0 a 1, indicando que a propriedade do solo apresenta boa, média ou ruim qualidade. Para facilitar a diferença e entendimento ao longo do texto, os indicadores físicos de qualidade do solo apresentaram antecipadamente a nomenclatura IFQs seguidamente da propriedade (*e.g.* indicador físico de qualidade da densidade do solo).

Para a transformação foi aplicado a função de atribuição padrão (*Standard scoring function*) proposta por Wymore (1993) e Karlen e Stott (1994) onde os valores de resposta, de cada uma das propriedades, foram qualificados de ruim quando atingiram valores < 0,5, e bom quando >0,5, e de qualidade intermediária quando os valores estiveram ~0,5; descrita na função da Equação 2:

$$v = \frac{1}{1 + \left(\frac{B-L}{x-L}\right)^{2S(B+x-2L)}} \quad \text{Eq. 2}$$

onde, v é a função de atribuição padrão (nomeada IFQs); B, o valor base da linha na propriedade do solo, correspondente à qualificação de 0,5; L, o valor do limite, S é a inclinação da tangente da curva na linha base v , e x é o valor da propriedade.

Além de aplicar a função e normalizar, se fez necessário considerar as variações que a função pode tomar, que dependerão dos critérios do uso da qualidade, que para este caso foram as propriedades físicas do solo para uso agrícolas, e segundo Glover, Reganold e Andrews (2000) podem ser de tipo (1) “mais é melhor”, (2) “menos é melhor” e (3) “ótima”, nesse sentido, as variáveis ρ_d e P_{mac} foram consideradas do tipo 3, CO e θ_{DIS} do tipo 1, e a Rp tipo 2.

Para as variáveis de tipo 3, foi necessário encontrar os pontos ótimos de resposta, através de modelos de regressão entre a ρ_d , P_{mac} , θ_{DIS} , no qual o solo disponibilizou a maior quantidade de θ_{DIS} , embora também, permita cumprir a funções de aeração pela P_{mac} . O modelo aditivo com os respectivos pesos numéricos de importâncias, atribuídos para cada função e para os IQFS são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Modelo aditivo para a determinação do índice de qualidade física do solo (IQFS).

Função no solo	- A - PN	- B - IFQs	- C - PN	- D - B × C	- E - ΣD	- F - A × E	F1+F2
- RSC -	0,5	ρ_d Rp CO	0,33 0,33 0,33	D ₁ D ₂ D ₃	E ₁	F ₁	IQFS
- WSC -	0,5	θ_{DIS} P_{mac}	0,50 0,50	D ₁ D ₂	E ₂	F ₂	

RSC, WSC: capacidade de suporte radicular e de armazenamento de água do solo;
PN: peso numérico de importância para as funções e para os IFQ;
IFQs: Indicador físico de qualidade; IQFS: Índice de qualidade física do solo.

Em seguida foi determinado o índice de qualidade física do solo (IQFS) aplicando o modelo aditivo (e.g. KARLEN & STOTT, 1994; GLOVER; REGANOLD & ANDREWS, 2000) nos qual foram atribuídos pesos numéricos de importâncias, tanto para as funções principais do solo, como para os IFQs, para este caso foram consideradas duas funções principais a capacidade de armazenamento de água (WSC) e capacidade de suporte ao crescimento radicular (RSC) do solo, que por sua vez a WSC esteve em função dos IFQs da θ_{DIS} e P_{mac} , e a RSC em função dos IFQs da ρ_d , Rp e CO.

2.5 Análises dos dados

Foram realizados análises de dados exploratórios através das análises de medidas de tendência centrais, através de cálculos de média, mediana, mínimos e máximos, logo após, foram realizadas análises da distribuição pelos testes de normalidade de Shapiro-Wilk ($n < 50$) considerando a probabilidade de significância $> 0,05$.

As dispersões dos dados foram avaliadas através do desvio padrão e para relativizar essas variações, também foi aplicado o coeficiente de variação de Pearson (CV), considerando os critérios de variação de Warrick e Nielsen (1980), ou seja, baixa variação $CV < 0,15$, média $0,15 < CV < 0,5$ e alta com $CV > 0,5$.

Também foram avaliados os graus de correlação entre as diferentes variáveis, considerando, para os casos de correlação linear, o coeficiente de Person, e para não linear, o coeficiente de Spearman, bem como o coeficiente de determinação (r^2).

3. Resultados e discussão

As variáveis analisadas, densidade (ρ_d), e conteúdo de água (θ), carbono orgânico (CO), macroporosidade (P_{mac}), água disponível (θ_{DIS}) foram utilizados para avaliar os índices de qualidade físicas do solo (IQFS) nas duas áreas de cana-de-açúcar (A e B) em diferentes sistemas de colheitas, ou seja, a área A com colheita mecanizada, e B com semi-mecanizada, além das diferentes fases da cultura, após o plantio (PL) e após a primeira (C1) e segunda colheita (C2).

Na Tabela 3 estão apresentadas as estatísticas descritivas das diferentes propriedades físicas do solo, nas duas camadas das áreas A e B, considerando as respectivas fases de avaliação. As variáveis (Tab. 3) em termos de variação apresentaram $CV < 15\%$ e alguns e em alguns casos $CV \leq 50\%$, podendo ser consideradas de baixa a média variação segundo os critérios de Warrick e Nielsen (1980); para o caso da P_{mac} , em alguns casos o $CV > 60 < 70\%$ considerados de alta variação.

Os valores da ρ_d na camada superficial do solo da área A variaram entre 1,39 e 1,89 $g\ cm^{-3}$, e na área B entre 1,45 e 1,89 $g\ cm^{-3}$; para o caso da camada subsuperficial os valores estiveram entre 1,41 e 1,87 $g\ cm^{-3}$ na área A, e na área B variaram entre 1,42 e 1,90 $g\ cm^{-3}$ (Tab. 3).

Os valores da R_p na camada superficial do solo da área A variaram entre 1,47 e 3,58 MPa e na área B, entre 1,57 e 5,57 MPa, e na camada subsuperficial essa variação foi mais ampla, pois na área A os valores da R_p variou entre 1,64 e 6,15 MPa, e na área B, entre 1,90 e 6,66 MPa (Tab. 3).

Tabela 3. Estatística descritiva da densidade (ρ_d) resistência à penetração (Rp), macroporosidade (P_{mac}), água disponível para as plantas (θ_{DIS}) e conteúdo de carbono orgânico (CO) para as duas camadas de um Argissolo em dois sistemas de colheita e diferentes fases da cultura de cana-de-açúcar.

Área Cam. (m) Fase	-A- Mecanizada 0,0 - 0,20			-B- Semi-mecanizada 0,20 - 0,40			-A- Mecanizada 0,20 - 0,40			-B- Semi-mecanizada 0,20 - 0,40		
	PL*	C1*	C2*	PL	C1	C2	PL	C1	C2	PL	C1	C2
ρ_d (g cm ⁻³)												
Mínimo	1,39	1,43	1,60	1,45	1,49	1,60	1,41	1,60	1,61	1,65	1,47	1,42
Máximo	1,56	1,89	1,89	1,60	1,87	1,89	1,78	1,76	1,87	1,80	1,88	1,90
Média	1,47	1,69	1,72	1,53	1,70	1,70	1,65	1,69	1,72	1,72	1,73	1,71
Mediana	1,47	1,69	1,72	1,53	1,69	1,70	1,66	1,70	1,71	1,72	1,74	1,74
E.P*	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
CV (%)*	2,72	6,51	4,31	2,61	4,71	4,31	5,45	2,37	3,91	2,33	5,20	6,65
R_p (MPa)												
Mínimo	1,47	1,53	2,10	1,57	1,63	2,62	1,64	2,57	2,80	2,86	1,90	2,10
Máximo	1,75	2,35	3,58	1,82	2,31	5,57	3,75	3,60	6,15	3,90	4,55	6,66
Média	1,61	1,99	2,77	1,70	2,00	3,64	2,87	3,14	4,00	3,34	3,44	4,30
Mediana	1,60	2,00	2,77	1,70	1,98	3,55	2,93	3,18	3,86	3,32	3,46	4,26
E.P*	0,01	0,03	0,06	0,01	0,02	0,10	0,08	0,04	0,15	0,05	0,10	0,18
CV (%)*	4,40	10,26	13,95	4,02	7,20	16,60	17,22	7,64	21,80	8,23	17,55	25,14
CO (g kg ⁻¹)												
Mínimo	16,07	4,93	0,70	17,07	4,75	3,10	4,13	6,55	7,91	5,38	6,70	4,02
Máximo	27,29	18,88	24,95	31,98	20,54	12,70	22,82	20,33	25,75	20,89	19,70	29,27
Média	21,25	10,10	13,69	23,33	12,01	7,32	14,26	14,57	14,35	14,16	13,71	16,09
Mediana	20,88	9,44	16,80	23,61	11,24	7,39	14,85	14,41	13,86	13,31	13,75	15,80
E.P*	0,50	0,47	1,31	0,61	0,52	0,35	0,78	0,56	0,70	0,64	0,52	1,10
CV (%)*	14,05	28,06	57,40	15,64	25,81	29,05	32,89	23,07	29,39	27,05	22,84	40,86
P_{mac} (cm ³ cm ⁻³)												
Mínimo	0,07	0,01	0,01	0,06	0,01	0,01	0,03	0,04	0,02	0,03	0,02	0,01
Máximo	0,14	0,12	0,06	0,11	0,10	0,06	0,16	0,08	0,08	0,07	0,13	0,16
Média	0,10	0,04	0,03	0,08	0,03	0,03	0,07	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Mediana	0,10	0,03	0,03	0,08	0,03	0,03	0,06	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04
E.P*	0,003	0,004	0,002	0,002	0,003	0,002	0,004	0,002	0,003	0,002	0,004	0,006
CV (%)*	17,03	67,79	45,82	18,32	51,86	43,53	41,07	18,82	32,12	21,00	53,97	62,28
θ_{DIS}												
Mínimo	0,21	0,13	0,13	0,20	0,14	0,13	0,12	0,13	0,08	0,11	0,08	0,07
Máximo	0,21	0,21	0,20	0,21	0,21	0,20	0,17	0,16	0,16	0,15	0,17	0,17
Média	0,21	0,18	0,18	0,21	0,18	0,18	0,15	0,14	0,14	0,14	0,13	0,13
Mediana	0,21	0,19	0,18	0,21	0,19	0,19	0,15	0,14	0,14	0,14	0,13	0,13
E.P*	0,0001	0,004	0,003	0,0003	0,003	0,003	0,002	0,001	0,003	0,002	0,004	0,004
CV (%)*	0,45	12,71	10,03	0,98	9,15	9,20	7,98	5,77	14,96	7,94	17,09	17,77

*PL: pós plantio; C1: primeira colheita; C2: segunda colheita; E.P.: erro padrão; CV: coeficiente de variação.

Os conteúdos de CO, após cada fase da cultura da cana-de-açúcar, apresentaram evidentes variações, na Tabela 3 pode ser observado que tanto na camada superficial e subsuperficial esses valores variaram em cada uma das áreas, para o caso da área A o CO da superfície do solo esteve entre 0,70 e 27,30 g kg⁻¹, e na área B, entre 3,10 e ~32,0 g kg⁻¹. Na camada subsuperficial, o CO da área A esteve entre 4,10 e 3,80 g kg⁻¹, e na área B, entre ~4,0 e 29,3 g kg⁻¹.

Para o caso da P_{mac} , apesar de que a escala de valores foi pequena, sua variação foi alta, pois na camada superficial da área A, a P_{mac} variou entre 0,01 e 0,14 cm³ cm⁻³ e na

área B, entre 0,01 e 0,11 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$; na camada subsuperficial, esses valores também apresentaram variação alta, sendo na área A, a P_{mac} e entre 0,02 e 0,16, e na área B, 0,01 e 0,16 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ (Tab. 3). A θ_{DIS} foi, entre as propriedades físicas analisadas, a mais estável, pois apresentou menores variações após os processos de colheita, tanto na área A quanto na B, porém, diferentes variações na θ_{DIS} também foram registradas, na camada superficial da área A e B, os valores estiveram entre 0,13 e 0,20 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, e na camada subsuperficial entre 0,07 e 0,17 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ (Tab. 3).

Em termos gerais, essas propriedades físicas apresentaram tendências após cada uma das fases da cultura da cana-de-açúcar, pois os valores médios em cada uma dessas fases apresentaram diferentes mudanças, a ρ_d na camada superficial da área A após PL foi de 1,42 g cm^{-3} e após a C1 e C2, o valor aumentou para 1,72 g cm^{-3} ; na área B essa mudança foi semelhante, após PL a ρ_d foi 1,53 g cm^{-3} , e após os processos de colheita da cana o valor incrementou para 1,70 g cm^{-3} (Tab. 3).

Na camada subsuperficial os resultados das propriedades do solo mostraram-se mais estáveis, a ρ_d média antes das colheitas já era elevada ($\rho_d > 1,65 \text{ g cm}^{-3}$) nas duas áreas de cana (A e B) e após as colheitas os valores apresentaram poucas mudanças, pois mesmo após C2 os valores foram semelhantes, na área A e B, a ρ_d foi $\simeq 1,72 \text{ g cm}^{-3}$. Significa que, os sistemas de colheita, mecanizado e semi-mecanizado, alteraram a densidade do solo de forma progressiva e principalmente a camada superficial, mostrando tendência a incrementar com cada colheita.

De igual forma, a R_p do solo evidenciou esse incremento após as colheitas da cana, pois após PL, os valores, tanto na área A quanto na B, na camada superficial foram $< 2,0 \text{ MPa}$, e progressivamente com as colheitas, após C2 a R_p aumentaram, principalmente na área B, atingindo valores $> 3,0 \text{ MPa}$ (Tab. 3). Na camada subsuperficial, a R_p também apresentou essa tendência, incrementar os valores com cada colheita, embora, antes das colheitas era $> 2,5 \text{ MPa}$, tanto na área A quanto na B, e após C2 os valores atingiram valores $> 4,0 \text{ MPa}$.

Os conteúdos de CO também evidenciaram mudanças após as colheitas da cana, mostrando reduções, ou seja, após o PL, o CO expressou os valores médios mais elevados nas duas áreas ($\sim 22 \text{ g kg}^{-1}$) embora, após as colheitas esses conteúdos diminuíssem, principalmente na área B, pois na camada superficial da área A o CO diminuiu para 11,5 g kg^{-1} mostrando estabilidade após a C2, e para o caso da área B, paulatinamente o

CO diminui, até atingir $\sim 7,30 \text{ g kg}^{-1}$ (Tab. 3). Para o caso da camada subsuperficial, esses valores de CO foram mais constantes, em média os conteúdos estiveram $\sim 14 \text{ g kg}^{-1}$.

A P_{mac} e θ_{DIS} também apresentaram mudanças após o uso das máquinas para a colheita da cana, ou seja, os valores dessas variáveis diminuíram, somente logo após a primeira colheita (C1), pois com a segunda colheita C2 as respostas mantiveram os valores mais estáveis, com mínimas mudanças, tanto nas camadas das áreas A e B; significa que, após o primeiro tráfego das máquinas, seja com o sistema semi-mecanizado ou mecanizado, as P_{mac} e θ_{DIS} foram reduzidas, possivelmente atingindo seu valor limite de redução (Tab. 3).

A P_{mac} da camada superficial após PL apresentou valores $\simeq 0,10 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e foi reduzido para $\sim 0,3 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ com a primeira colheita, tanto na área com o sistema de colheita mecanizado (A) como na área com o sistema semi-mecanizado (B), e na camada subsuperficial os valores foram constante em $\sim 0,06 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (Tab. 3). Para o caso da θ_{DIS} os valores mudaram, na camada superficial, de 0,21 para $0,18 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, e na camada subsuperficial os valores médios foram mais constantes ($\sim 0,13 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) nas duas áreas, conforme a Tabela 3.

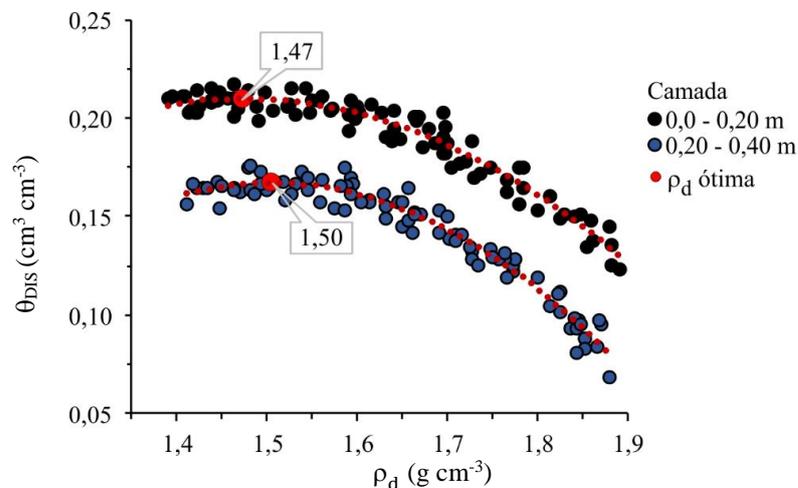


Figura 3. Água disponível (θ_{DIS}) em diferentes densidades (ρ_d) para duas camadas de um Argissolo Amarelo distroceso com cana-de-açúcar.

Com as diferentes respostas que o solo apresentou em cada uma das áreas, como também, nas diferentes profundidades, foi possível selecionar os modelos para os indicadores físicos de qualidade do solo (IFQs), considerando os valores mínimos e máximos que foram atingidos durante as diferentes fases culturais da cana-de-açúcar.

Considerando a relação que apresentam os IFQs com as funções de capacidade de retenção de água no solo (WSC) e a capacidade ao crescimento radicular das plantas

(RSC), os modelos IFQs foram ajustados para permitir que sua capacidade atingiram a melhor performance no solo, por exemplo, na Figura 3, pode ser observada a resposta da quantidade de água retida e disponível para plantas no solo, frente a diferentes ρ_d do solo, sendo evidente que, para a camada superficial a $\rho_d \simeq 1,47 \text{ g cm}^{-3}$ permitiu obter a maior quantidade de água, e para a camada superficial a $\rho_d \simeq 1,50 \text{ g cm}^{-3}$.

Na Tabela 4 foram apresentados os modelos ajustados dos θ_{DIS} , para as duas camadas do solo, com os respectivos parâmetros e coeficientes de significância. Vale indicar que para as duas camadas os modelos foram polinomiais de segundo grau e com alcances nas ρ_d entre 1,39 e 1,89 g cm^{-3} para a camada superficial, e entre 1,41 e 1,90 g cm^{-3} na camada subsuperficial.

Tabela 4. Modelos de ajuste para água disponível (θ_{DIS}) nas diferentes densidades (ρ_d) para duas camadas de um Argissolo Amarelo distrocesoso com cana-de-açúcar.

Camada (m)	θ	Coeficientes	E.P.*	t	P-valor	r ²	Max	Min
0,0-0,20	y0	-0,785	0,08	-9,12	<0,001	0,93	0,22	0,12
	ρ_d	1,350	0,10	12,73	<0,001			
	(I) ρ_d^2	-0,458	0,03	-14,10	<0,001			
0,20-0,40	θ_{DIS}					0,95	0,18	0,07
	y0	-1,227	0,10	-12,51	<0,001			
	ρ_d	1,853	0,12	15,50	<0,001			
	(I) ρ_d^2	-0,616	0,03	-16,10	<0,001			

*E.P.: Erro padrão

Vários autores (DÖRNER *et al.*, 2006; MORAES *et al.*, 2016) têm reportado alterações hidráulicas com o aumento da densidade, e além disso, observaram que densidades intermediárias permitem melhor aproveitamento em solos arenosos, por exemplo, (Oliveira *et al.*, 2015) em *Ultisol* observou que a densidade entre 1,40 e 1,50 g cm^{-3} disponibilizaram maior conteúdo de água, e densidades acima ou abaixo, apresentaram menores valores, que para este caso, conforme os modelos de ajuste (Tab. 4) a maior quantidade de água disponível foi 0,22 $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ quando a ρ_d da camada superficial foi 1,47 g cm^{-3} , e na camada subsuperficial 0,18 $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ para uma $\rho_d = 1,50 \text{ g cm}^{-3}$.

Essa resposta permitiu observar que a ρ_d pode ser ajustada para um modelo de IFQs de tipo “ótimo”, pois existiu um ponto ótimo que permitiria que a capacidade WSC pudesse ter melhor performance em função a ρ_d .

Na Tabela 5 foram apresentados os modelos de ajuste dos IFQs para cada uma das propriedades físicas do solo para a camada superficial e subsuperficial, e na Figura 4 e 5 as curvas dos ajustes dos diferentes IFQs, para a camada duas camadas do solo.

Embora, para o modelo do IFQs da ρ_d , muitos autores (GLOVER; REGANOLD & ANDREWS *et al.*, 2000; MUKHOPADHYAY *et al.*, 2019) sugeriram usar o modelo “menos é melhor”, pois consideraram, quanto mais baixo seu valor, melhor para as plantas, porém, o modelo proposto para o IFQs da ρ_d foi do tipo “ótimos”, concordando com outros autores (CHEONG; KEE KWONG & PREEZ, 2009; SOUZA *et al.*, 2015; SCARPARE *et al.*, 2019) que anotam, a ρ_d tem um efeito indireto no crescimento das plantas, mas altera fatores como a disponibilidade de água no solo e a porosidade, os quais sim afetam diretamente o crescimento, sugerindo ajustar essa propriedade às funções das capacidade do solo, nesse caso, para a retenção e disponibilidade de água para as plantas.

Tabela 5. Modelos de Indicadores físicos de qualidade (IQF) para um Argissolo Amarelo distroceso em duas profundidades.

IFQs	Camadas		Tipo
	0 - 0,20 m	0,20 - 0,40 m	
ρ_d	$\frac{-1}{1 + e^{(-29 \times (Ds - 1.658))}} + \frac{1}{1 + e^{(-29 \times (Ds - 1.278))}}$	$\frac{-1}{1 + e^{(-24 \times (Ds - 1.692))}} + \frac{1}{1 + e^{(-24 \times (Ds - 1.228))}}$	Ótima
Rp	$\frac{1}{1 + e^{(12 \times (Rp - 1.91))}}$	$\frac{1}{1 + e^{(3,7 \times (Rp - 3,1))}}$	Menos é melhor
CO	$\frac{1}{1 + e^{(-0,45 \times (CO - 19,32))}}$	$\frac{1}{1 + e^{(-0,642 \times (CO - 13,47))}}$	Mais é melhor
P_{mac}	$\frac{1}{1 + e^{(100 \times (P_{mac} - 0,169))}} + \frac{-1}{1 + e^{(120 \times (P_{mac} - 0,08))}}$	$\frac{1}{1 + e^{(120 \times (P_{mac} - 0,133))}} + \frac{-1}{1 + e^{(120 \times (P_{mac} - 0,068))}}$	Ótima
θ_{DIS}	$\frac{1}{1 + e^{(-150 \times (\theta_{DIS} - 1,17))}}$	$\frac{1}{1 + e^{(-138 \times (\theta_{DIS} - 0,12))}}$	Mais é melhor

ρ_d : densidade; Rp: resistência à penetração; CO: carbono orgânico; P_{mac} : Macroporosidade; θ_{DIS} : água disponível.

Segundo (Reis *et al.*, 2019) a densidade do solo pode encaixar perfeitamente nos indicadores do tipo “ótimo”, pois, tem inclinação positiva até um valor máximo e é usado em indicadores que alteram positivamente a qualidade do solo até que certos valores que, se passados, causem influência negativa.

Para o caso da Rp, nas duas camadas do solo, os modelos dos IFQs foram considerados do tipo “menos é melhor” (Tab. 5) pois quanto mais baixa os valores de Rp melhor para o crescimento radicular das plantas, Figura 5 e 6, podem ser observados que os IFQs da Rp apresentaram alcances entre os valores, diferentes nas duas camadas, por exemplo, na camada superficial, a Rp atingiu valores entre 1,45 e 2,35 MPa, considerados como de boa e ruim qualidade respectivamente; e para o caso da camada subsuperficial, os valores estiveram entre 1,60 e 4,60 MPa.

Vários autores (OTTO *et al.*, 2011; CASTIONI *et al.*, 2019; GUIMARÃES *et al.*, 2018) têm aceito alguns modelos já preestabelecidos, que explicam bem a resposta dessas propriedades físicas, por exemplo, a Rp foi aceita como IFQs do

tipo “menos é melhor”, ou seja, quanto menor for o valor da R_p do solo, melhor para os solos agrícolas. Para o caso do CO o modelo mais usual é “mais é melhor”, pois quanto mais CO apresentar, melhor para o solo.

Na Figura 4 foram apresentadas as curvas ajustadas dos IFQs das propriedades físicas da camada superficial do solo, com os respectivos alcances e valor de qualificação. Segundo as curvas de IFQs, quando a ρ_d atingiu valores $\sim 1,48 \text{ g cm}^{-3}$ a performance apresentou a melhor qualidade, e valores superiores reduzem a qualidade, até o ponto 0, quando a $\rho_d \simeq 1,88 \text{ g cm}^{-3}$. Para o caso da R_p , valores $\sim 1,45 \text{ MPa}$ apresentaram a melhor qualidade, e superiores $1,9 \text{ MPa}$, a IFQs diminuiu para 0,5, considerada uma qualidade média.

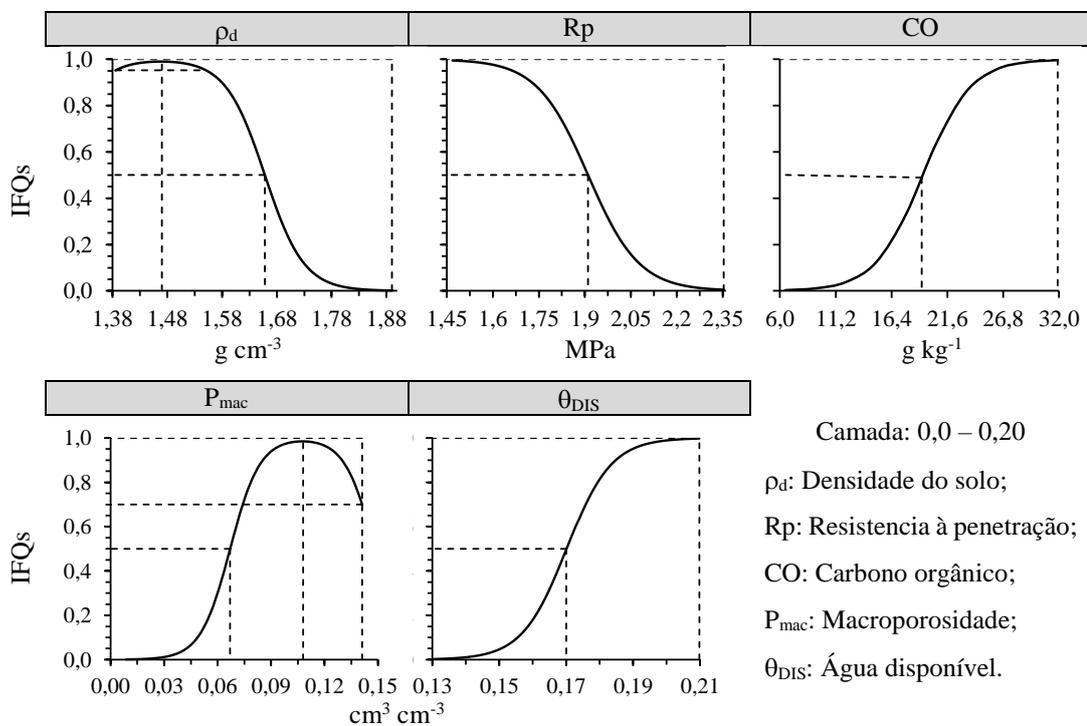


Figura 4. Curvas dos indicadores físico de qualidade da camada superficial para Argissolo Amarelo distrocoeso com cana-de-açúcar.

Segundo Otto *et al.* (2011), valores $>2 \text{ MPa}$ são críticas para qualidade e para o crescimento das raízes da planta, embora, esses valores foram registados com densidade do solo $\geq 1,78 \text{ g cm}^{-3}$ e em conteúdo de água igual com a capacidade de campo. Castioni *et al.* (2019) em solos arenosos e com remoção de palha, observaram aumento das respostas de resistência à penetração, mesmo mantendo as mesmas ρ_d , obtendo valores entre $\sim 1,70 \text{ MPa}$ e $3,00 \text{ MPa}$.

Embora, Guimarães *et al.* (2018) enfatizaram que $R_p > 2,00 \text{ MPa}$ não podem ser consideradas restritivas, sendo necessário redefinir os limites da R_p , e

Tormenta *et al.* (2017) observaram o crescimento adequado das raízes quando a $R_p > 2,00$ MPa. Segundo de Lima *et al.* (2020) resistências de 4,5 MPa não deveríamos ser consideradas como restritiva, senão, impeditiva pois a taxa de alongamento das raízes é diminuída em 80% pela resistência à penetração do solo, porém isso dependera da textura do solo, limite crítico de umidade, estrutura do solo e tamanho de poros.

Para o caso do CO apresentou um IFQs com modelo do tipo “mais é melhor”, ou seja, quanto maior conteúdo de CO, melhor a estruturação do solo e melhor suporte radicular para as plantas; na camada superficial, o modelo foi ajustado para os valores que estiveram entre 6,0 e 32,0 g kg⁻¹, permitindo obter a curva do IFQs conforme a Figura 4.

O carbono orgânico também tem sido classificado com um indicador de qualidade física, do tipo “mais é melhor”, ou seja, quanto maior o conteúdo no solo melhor para a qualidade; os valores de referência, segundo Hussain *et al.* (1999) podem variar entre 3 e 65 g kg⁻¹; para o conteúdo de matéria orgânica, segundo Dexter (2004) e Budak *et al.* (2018) valores CO <4,2% (42 g kg⁻¹) podem ser considerados críticos, e para Johannes *et al.* (2017) relacionaram o conteúdo de carbono a proporção de argila no solo, considerando que 1:8 ótima para a qualidade do solo, 1:10 razoável e 1:13 ou inferiores inaceitáveis. Embora para os solos Argissolo costeiros de clima quente e úmido, o IFQs do CO, deste estudo, conteúdos de $20 \leq CO \leq 32$ g kg⁻¹ foram considerados de média a ótima qualidade, para a camada superficial (Fig. 4).

Os modelos de ajuste para o IFQs da P_{mac} também foram do tipo “ótimo” (Tab. 4), pois, quando o solo apresentou os valores mais elevados P_{mac} , a quantidade de θ_{DIS} foi reduzida, de igual maneira, quando a P_{mac} foi muito baixa, a θ_{DIS} foi também reduzida.

Portanto, foi determinado que os valores ótimos de P_{mac} nas duas profundidades do solo, considerando poder obter a maior quantidade de água retida no solo e disponibilizá-la para as plantas, foram para a camada superficial $P_{mac} = 0,11$ cm³ cm⁻³, obtendo IFQs = 1,00; para o caso de valores superiores até $P_{mac} = 0,15$ cm³ cm⁻³, a qualidade diminuiu para 0,70, e para obter qualidade intermedia com IFQs = 0,50, a $P_{mac} \sim 0,06$ cm³ cm⁻³, ou seja, valores abaixo desse ponto intermediário podem ser restritivos para disponibilizar e facilitar a absorção de água do solo (Fig. 4).

Para a camada subsuperficial as curvas dos IFQs mantiveram o mesmo formato, observado na camada superficial (Fig. 5) porém, os modelos de ajuste foram diferentes, conforme a Tabela 5, significa que, as P_{mac} na curvas dos IFQs atingiram o máximo valor, quando a P_{mac} foi de 0,12 cm³ cm⁻³, para obter uma qualificação de 1,0, e valores

superiores, até $0,16 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, a qualidade diminui para 0,75 na escala do IFQs; para qualidade intermedia (IFQs= 0,50) a P_{mac} foi $0,08 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, e valores abaixo podem ser considerados restritivos para as plantas, pois atingiram baixas qualificações na escala do IFQs da P_{mac} .

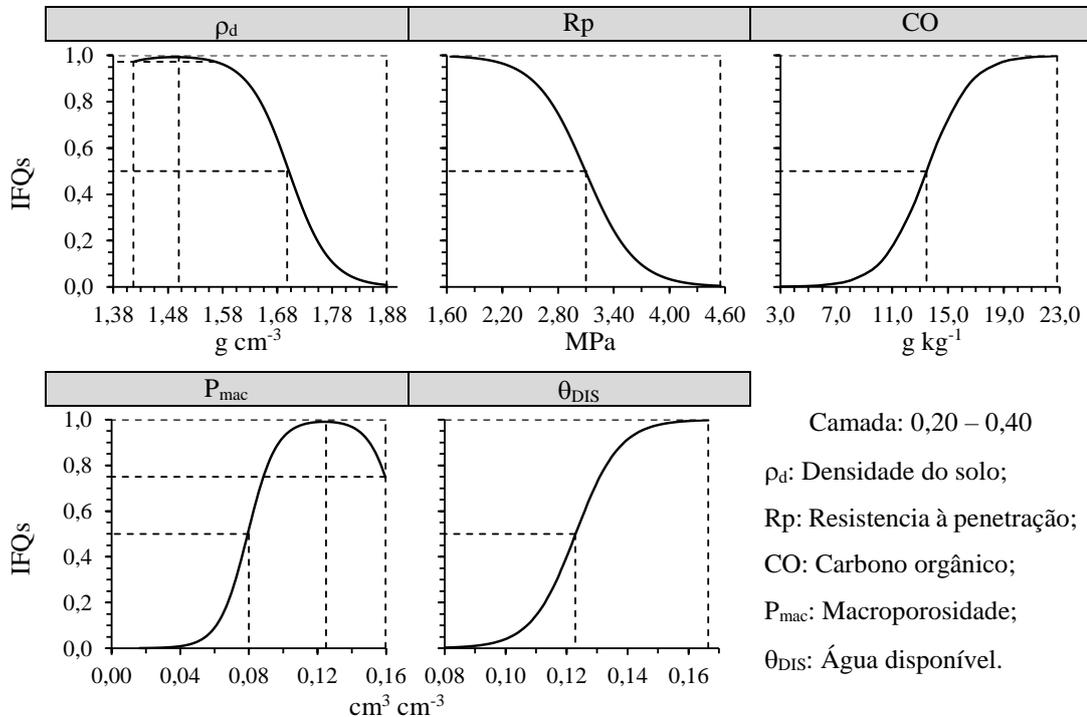


Figura 5. Curvas dos Indicadores Físico de qualidade da camada subsuperficial para Argissolo Amarelo distroco com cana-de-açúcar.

Para a camada subsuperficial as curvas dos IFQs mantiveram o mesmo formato, observado na camada superficial (Fig. 4) porém, os modelos de ajuste foram diferentes, conforme a Tabela 5, significa que, as P_{mac} na curvas dos IFQs atingiram o máximo valor, quando a P_{mac} foi de $0,12 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, para obter uma qualificação de 1,0, e valores superiores, até $0,16 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, a qualidade diminui para 0,75 na escala do IFQs; para qualidade intermedia (IFQs= 0,50) a P_{mac} foi $0,08 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, e valores abaixo desse podem ser considerados restritivos para as plantas, pois atingiram baixas qualificações na escala do IFQs da P_{mac} .

Segundo (Reis *et al.*, 2019) através da seleção de muitas características físicas do solo determinaram que a macroporosidade apresentou as melhores características para ser um indicador físico do solo, pela sua alta sensibilidade ao preparo do solo, permitindo detectar mudanças na qualidade do solo, da mesma maneira, (Mukhopadhyay *et al.*, 2019) também afirmaram que, as características relacionadas com a porosidade são as principais variáveis que mais influem na qualidade do solo.

(Barbosa *et al.*, 2019) também evidenciaram que as macroporosidade, em solos arenosos, foram mais reduzidas, do que as microporosidades, registrando altos valores da macroporosidade após o preparo do solo, $<0,10 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, com reduções $>40\%$; e que o preparo do solo aumenta a macroporosidade apenas para a fase após o plantio de cana-de-açúcar.

Para o IFQs da água disponível (θ_{DIS}) os modelos ajustados foram do tipo “mais é melhor” para as duas profundidades do solo (Tab. 5) considerando que quanto maior for os valores de θ_{DIS} , mais favorável para a absorção de água pelas plantas, vale destacar que apesar de os modelos das curvas apresentarem o mesmo formato, cada camada teve seu modelo de ajuste e com valores diferenças nas escalas dos IFQs dos θ_{DIS} , conforme as Figuras 4 e 5, respectivamente para as duas camadas do solo.

O IFQs do θ_{DIS} da camada superficial, a escala de valores esteve entre 0,13 e $0,21 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, sendo respectivamente para a pior e a melhor qualidade, ou seja, quanto mais baixos os valores de θ_{DIS} , menor qualidade e vice-versa (Fig. 4), e θ_{DIS} com valor de $0,17 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, qualidade intermediária (IFQs = 0,50). Na camada subsuperficial, o IFQs do θ_{DIS} manteve o mesmo padrão de resposta, embora, com escala de valores inferiores do que na camada superficial, ou seja, o θ_{DIS} esteve entre 0,08 e $0,16 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ considerados de ruim e boa qualidade, respectivamente, e para intermediária qualidade (IFQs= 0,50) para o valor $\sim 12 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (Fig. 5).

Segundo (Mukhopadhyay *et al.*, 2019) entre os parâmetros mais importante no armazenamento de água do solo, e a quantidade de água disponível, pois é um fator que influência diretamente na produtividades das plantas, sendo essa a diferença entre os vários tipos de solos, pois nem sempre alta capacidade de armazenamento de água no solo apresenta alta disponibilidade, e para Tim Chamen *et al.* (2015), Soracco *et al.* (2015) e o principal efeito da compactação ao solo é alteração do volume e porosidade, pois provocam a diminuição de água disponível para planta.

Na Figura 6 foram apresentados os diagramas de radar onde mostram as respostas médias de cada um dos IFQs, em uma escala entre 0,0 e 1,0, indicando 0 a menor qualidade e 1,0 a melhor qualidade, organizados por camada do solo e nas áreas A e B e nas diferentes fases da cultura.

Na fase após o PL, os radares de qualidade mostraram a camada superficial com boa qualidade, pois, em média todos os IFQs atingiram valores $>0,5$, embora e mais especificamente, a área mecanizada (A) os IFQs com melhores respostas foram a Rp, pd,

θ_{DIS} e P_{mac} , atingido valores $>0,80$, somente o CO teve uma qualificação menor, mas com adequado desenvolvimento, IFQs $\sim 0,70$ (Fig. 6A). Para o caso da Área B, os IFQs também apresentaram bons desenvolvimentos, com valores $>0,80$, exceto para a P_{mac} que apresentou uma qualificação menor $\sim 0,60$.

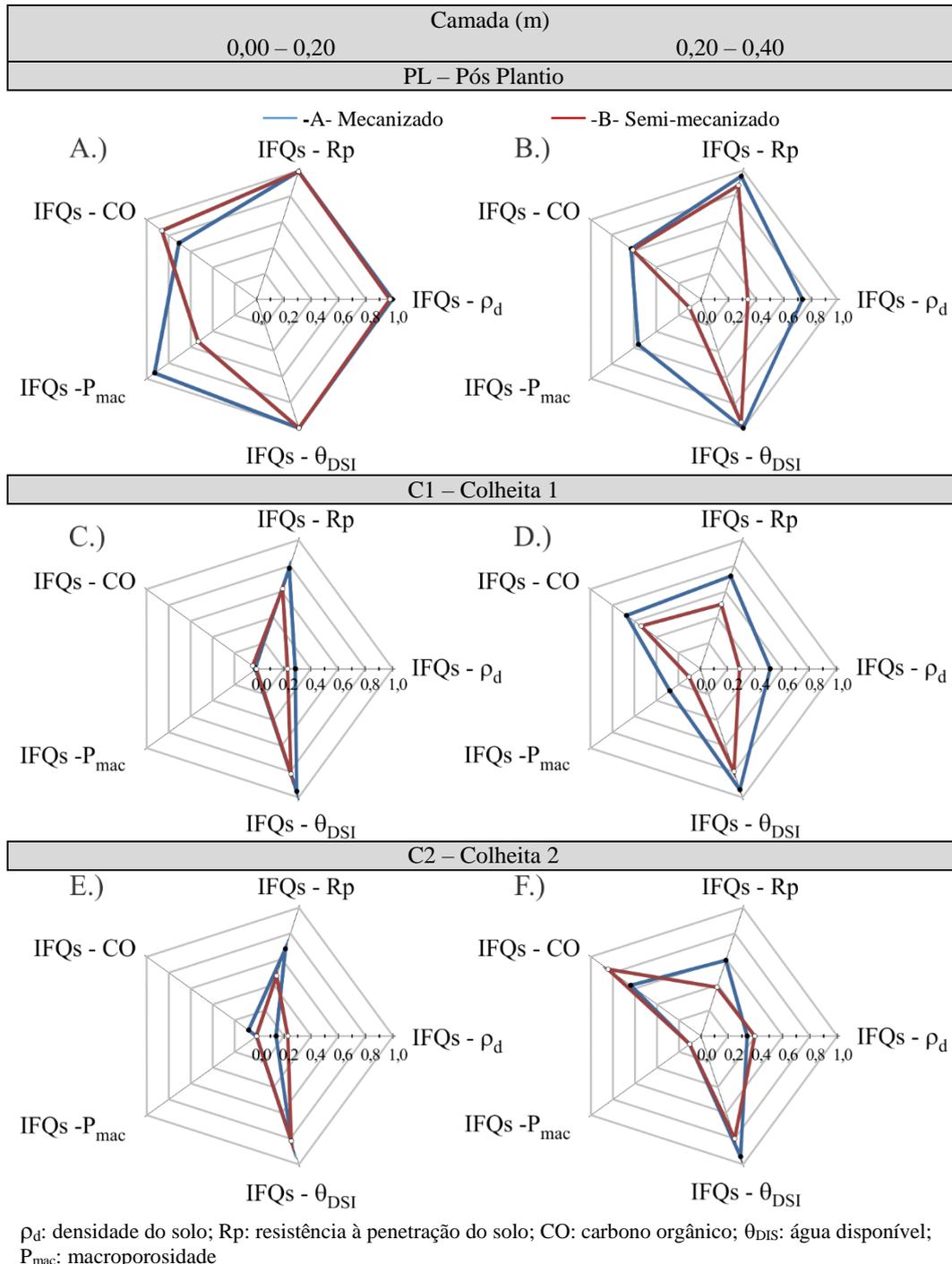


Figura 6. Radares dos indicadores físicos da qualidade (IFQs) para duas camadas de um Argissolo Amarelo distroceso em dois sistemas de colheita e diferentes fases da cana-de-açúcar.

Reis *et al.* (2019) mencionaram a importância do preparo do solo, pois independentemente da técnica utilizada, podem reduzir a compactação do solo, podendo ser uma opção útil para promover a produção agrícola nas quais áreas apresentem esses limitantes.

Embora, para o caso da camada subsuperficial, os radares de qualidade (Fig. 6B) relevaram uma qualidade menos favorável para o desenvolvimento das plantas, pois ainda pode ser observada uma redução da performance da P_{mac} , principalmente na área B com valores $<0,50$, refletindo menor eficiência das práticas de preparo nessas camadas e podendo evidenciar existência dos efeitos da compactação, mesmo antes da renovação da área de cana-de-açúcar.

Após a primeira colheita da cana (C1), o radar (Fig. 6C) mostraram redução em todos os IFQs da camada superficial, tanto na área com o sistema de colheita mecanizado (A), como na semi-mecanizado (B), evidenciando reduções críticas da performance da ρ_d , CO e P_{mac} , obtendo valores de IFQs $<0,30$, sendo a área A (sistema mecanizado) menos afetado; e para os casos da R_p e θ_{DIS} essas reduções foram menos drásticas e mantiveram-se com boa qualidade (IFQs $>0,60$), e sendo superior na área A.

Para Oliveira *et al.* (2014) os principais problemas do tráfego das máquinas nas colheitas de cana-de-açúcar é a eliminação da palha, pois, esta ajuda conservar a qualidade física do solo e contrapor resistência aos efeitos da compactação; Braida *et al.* (2006) também afirmam que, a palhada da cana, depositada sobre o solo, atenua as cargas aplicadas e dissipa em até 30% a energia de compactação.

Embora, conforme afirmaram (Galdos *et al.*, 2009) as alterações do solo durante o preparo, influência na dinâmica do carbono, podendo causar perdas de carbono orgânico, pois, com o revolvimento da camada superficial, a matéria orgânica permanece mais exposta à degradação, e só em longo prazo é possível ver os declínios do carbono. Por sua vez, a camada subsuperficial (Fig. 6D) também houve reduções dos IFQs após C1, em menor proporção do que na camada superficial, e pode ser observada que as maiores reduções estiveram presentes na área B com o sistema de colheita semi-mecanizada, sendo na área A, a ρ_d e a P_{mac} as propriedades que que reduziram sua performance, e na área B, essas reduções estiveram evidente em todas propriedades, e destaca-se a estabilidade de θ_{DIS} aos efeitos do tráfego dos dois sistemas de colheita de cana-de-açúcar.

Para vários autores (*e.g.* DORAN & PARKIN, 1994; BÜNEMANN *et al.*, 2018) essa diminuição da qualidade do solo, nos sistemas agrícolas que utilizam máquinas, estariam

relacionadas, principalmente com os efeitos da compactação e alterações na estrutura físicas do solo, pelo tráfego de máquinas agrícolas; segundo Lima *et al.*, (2017), Naderi-Boldaji *et al.* (2018) e Esteban *et al.* (2019) o aumento da densidade do solo, resistência a penetração, e redução da macroporosidade, estão relacionada com a frequência do tráfego de máquinas, pois quanto mais frequente, mais evidentes serão as mudanças na qualidade físicas do solo.

Após a segunda colheita (C2) os diferentes IQFs também foram reduzidos nas das áreas de cana, A e B, e em proporções menores como foi observado na C1. Na camada superficial da Área A (Fig. 6E) a ρ_d continuou diminuído, obtendo qualificação de $\sim 0,20$, da mesma maneira, a P_{mac} atingiu valores críticos ($\sim 0,0$) a R_p diminui suas qualificações ($R_p \sim 0,70$) mas manteve sua boa performance, e para o caso do CO e θ_{DIS} os valores dos IQFs não apresentaram mais mudanças às observadas após C1. Na Área B, após C2, a camada superficial não evidenciou na maioria dos IQFs, mas pode ser destacada a redução da performance da R_p , pois qualidade diminuiu de $\sim 0,60$ para $\sim 0,40$.

Na camada subsuperficial, os IQFs evidenciaram redução na performance das propriedades físicas do solo, e observa-se que nas duas áreas de cana (A e B) a θ_{DIS} foi a propriedades mais resistente aos efeitos de compactação do tráfego das máquinas, pois seus valores se mantiveram semelhantes desde a primeira fase (Fig. 6F) com valores $> 0,80$.

Para o caso das outras variáveis, foram observadas reduções em menor proporção do que na camada superficial, e evidente que após a C2, os IQFs apresentaram também melhor performance, na área B, o IQFs do CO evidenciou melhora na performance (IQFs $\sim 0,80$), a ρ_d apresentou valores $\sim 0,30$ tanto na área A e B, enquanto a R_p apresentou melhor performance na área com o sistema de colheita mecanizado.

(Graham *et al.*, 2002) comparando o aporte de CO no solo entre sistemas de colheita com queima e sem, também evidenciaram as reduções de carbono nos dois sistemas, porém após um ano, mostrou recuperação no sistema de colheita sem queima, contrastando significativamente com o sistema com queima.

Após a primeira colheita de cana-de-açúcar (C1) foi evidente que independente do sistemas de colheita, mecanizado ou semi-mecanizado, o solo foi mais compactado do que nas outras fases, e alguns autores (BRAUNACK *et al.*, 2006, SOUZA *et al.*, 2015, e MANHÃES *et al.*, 2018) destacam a importância do controle de tráfego agrícola, pois, na sua ausência o problema de compactação, gerada durante as colheitas, pode ser

agravado, alterando progressivamente as condições físicas do solo e a produtividade das socarias de cana-de-açúcar.

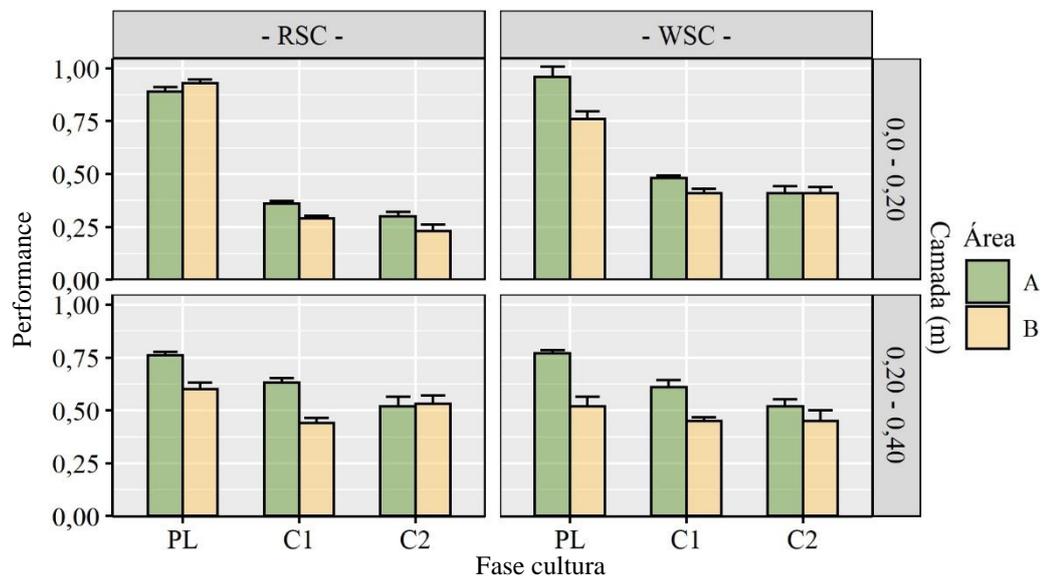
Segundo Lozano *et al.* (2013) e Silva *et al.* (2018) a colheita semi-mecanizada de cana-de-açúcar tem algumas desvantagens frente a mecanizadas, por exemplo, o controle de tráfego é ausente e as máquinas não são adequadas para o tráfego agrícola, porém, conforme Manhães *et al.* (2015) os impactos podem ser menores superficialmente do que na colheita mecanizada, embora pontualmente mais graves, pois, as máquinas trafegam menos nas área do cultivo, mas as máquinas não transitam exclusivamente na zona de tráfego (entrelinhas do plantio), senão também, sobre as linhas do plantio, aumentando a compactação nas linhas do plantio e causando danos diretos sobre as socas e levando a perdas produtivas.

Em termos gerais, as mudanças dos IQFs foram evidentes após a primeira colheita, seja mecanizada ou semi-mecanizada, embora e principalmente, as mudanças mais imediatas e drásticas foram observadas na ρ_d , CO e na P_{mac} da camada superficial, pois essas propriedades físicas, logo após a primeira colheita passaram de qualidade boa para ruim, mostrando alta sensibilidade ao tráfego das máquinas, possivelmente por ser a camada de contato direto com as máquinas da colheita, e além de outros fatores, ambientais, clima, temperatura e as chuvas, etc., que intervêm mais com as mudanças do CO do solo.

Segundo (Sousa *et al.*, 2017) os conteúdos de CO no solo podem decrescer após um ano, dependendo da quantidade de palha que seja depositado, ou seja, quanto menor for a quantidade de palha menor os conteúdos no solo, e segundo White e Webber (2018) fatores como temperatura, umidade favorecem a decomposição microbiana dos resíduos da cana no solo, facilitando a incorporação do carbono orgânico no solo.

Pode ser considerado que além do frequente tráfego de máquinas e sua relação com a compactação e mudanças nas propriedades físicas do solo, também relacionam com a eliminação total o parcial da palha de cana, utilizada como cobertura vegetal, por exemplo, Castioni *et al.* (2018) afirmaram que a remoção da palha induziu a degradação da qualidade física do solo, quando as operações de colheita foram realizadas sem a presença de palha no solo; Ceddia *et al.* (1999) concluíram que, após seis anos de cultivo de cana que incluiu a queima da palha, o solo apresentou redução no diâmetro médio dos agregados e aumento na densidade, e também detectaram alterações significativas na porosidade total e na distribuição de poros, constatadas pela redução da velocidade de infiltração.

No modelo aditivo para a determinação da qualidade física do solo, os IFQs indicaram de maneira específica as alterações que o solo apresentou, embora, de forma conjunta foram obtidas as performances das funções da capacidade de suporte ao crescimento radicular das plantas (RSC) e de armazenamento de água (WSC) no solo, conforme a Figura 7.



*RSC: Capacidade suporte ao crescimento radicular das plantas; WSC: Capacidade de armazenamento de água; PL: após o plantio; C1: após a primeira colheita; C2: após a segunda colheita.

Figura 7. Capacidades suporte ao crescimento radicular das plantas e armazenamento de água em duas camadas de um Argissolo distroceso em dois sistemas de colheita e diferentes fases da cana-de-açúcar.

As mudanças nas respostas dessas duas capacidades (RSC e WSC) estiveram diretamente relacionadas com as propriedades do solo, significa que, alterações na Δd , R_p e CO alteraram a RSC, e por sua vez, alterações no ΔDIS e P_{mac} alteraram a WSC.

Após o plantio (PL) na camada superficial do solo, as duas áreas de cana (A e B) apresentaram boa performance na capacidade do solo RSC e WSC, com valores $>0,75$ (Fig. 7), apresentando o menor valor na WSC da área B. Na camada subsuperficial, essa performance atingiu valores entre 0,50 e $\sim 0,75$, evidenciando também a melhor performance da RSC e WSC da área A, pois os valores foram mais elevados (Fig. 7).

Essas respostas evidenciaram que as práticas de preparo do solo e plantio, favoreceram a capacidade do solo na camada superficial, melhorando as condições para o desenvolvimento radicular e também para o armazenamento de água no solo, mas para o caso da camada subsuperficial, essas práticas não permitiram obter a melhor performance nas capacidades do solo (RSC e WSC) principalmente na área B, que apresentou 21% e 32%, performances mais baixas do que na área A, embora os valores

das capacidades ainda estiveram com performance $>0,50$, significa que, a qualidade esteve no ponto médio, e ainda susceptível à compactação do solo pelo tráfego das colhedoras e reduzir ainda mais a qualidade física do solo e limitar a desempenho da cana-de-açúcar

Após a primeira colheita (C1) a RSC e WSC da camada superficial do solo foram drasticamente reduzidas para os dois sistemas de colheita da cana. Para o caso da área A, sistema de colheita mecanizado, a RSC e WSC foram reduzidas 60% e 50% respetivamente, atingindo performances $<0,50$ (Fig. 7) consideradas de baixa performance; para o caso da área B, sistema de colheita semi-mecanizada, as capacidades (RSC e WSC) foram reduzidas 69% e 49%, com performances $\leq 0,35$ (Fig. 7).

Com a primeira colheita da cana, foi evidente observar que os sistemas de colheita, mecanizado e semi-mecanizado, causaram redução de $\sim 55\%$ nas capacidades do solo (RSC e WSC) e mostrando que a capacidade RSC apresentou maior sensibilidade ao tráfego das máquinas, principalmente pelas utilizada no sistema semi-mecanizado que causaram as maiores reduções.

Vários autores (*e.g.* DORAN & PARKIN, 1994; BÜNEMANN *et al.*, 2018; ESTEBAN *et al.*, 2019) afirmam que a perda da qualidade do solo, nos sistemas que utilizam máquinas, está relacionada, entre vários aspectos, com a compactação do solo, por sua vez, relaciona as alterações na estrutura e nas propriedades físicas (resistência à penetração, porosidade) que governam a funcionalidade dos solos, prejudicando a capacidade de suporte radicular.

Para Castioni *et al.* (2018) e Cherubin *et al.* (2018) além dos processos de compactação gerado pelo sistema de colheita, a eliminação da palha por queima ou extração, diminuem os conteúdos de carbono no solo, limitando a macro-agregação que compromete sua função de suporte e crescimento das plantas.

As capacidades da camada subsuperficial do solo (RSC e WSC) mostra maior resistência ao tráfego das máquinas, pois as reduções foram proporcionalmente menores tanto na área com o sistema mecanizado como no semi-mecanizado. Nas áreas A e B as capacidades RSC e WSC foram reduzidas $\sim 20\%$, porém as performances foram diferentes, na área A os valores estiveram $\sim 0,60$ e na área B $\sim 0,45$ (Fig. 7), ou seja, o tráfego das máquinas do sistema mecanizado ocasionou menor mudanças nas propriedades físicas da camada subsuperficial do solo.

Essas reduções na capacidade do solo, segundo a Figura 7C e D estiveram estreitamente relacionadas com as mudanças dos IFQs da P_{mac} e CO, pois foram os indicadores com maior redução após a primeira colheita da cana, tanto na área A como na B.

A compactação do solo não só prejudica as propriedades físicas do solo, como também, a relação solo-água-planta, por exemplo, com a diminuição dos poros do solo, aumenta a densidade, e com isso menor capacidade hidráulica (infiltração) e de armazenamento de água, e finalmente a disponibilidade de água para a planta é reduzida (e.g. BRAUNACK *et al.*, 2006; CHEONG; KEE KWONG & PREEZ, 2009; SOUZA *et al.*, 2015; SCARPARE *et al.*, 2019).

Da mesma maneira, Ceddia *et al.* (1999) após avaliarem os sistemas de colheita com queima e sem queima da palha, concluíram que, após seis anos de cultivo, os solos do sistema de cana queimada, reduziram o tamanho dos agregados, aumentando a densidade do solo, alterações significativas na distribuição de poros, e redução na velocidade de infiltração do solo.

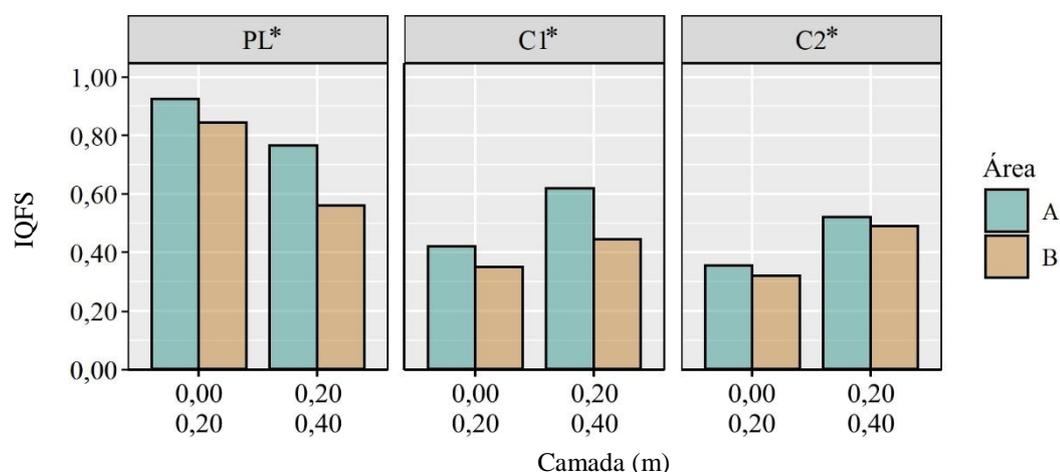
Após a segunda colheita (C2) a RSC e WSC continuaram reduzindo, na área A, reduziu suas performances, em uma proporção menos pronunciada do que na C1; com mudanças na capacidade do solo, as respostas entre os sistemas de colheita foram assemelhadas, pois as performances obtiveram valores muito próximos entre as duas áreas A e B. A RSC e WSC da camada superficial nas duas áreas apresentaram performances ~0,25 e ~0,35, respectivamente (Fig. 7).

Para (Lozano *et al.*, 2013) foi evidente que a utilização de tratores e reboques convencionais provocam altos riscos de compactação, quando utilizado nas colheitas convencionais da cana, e principalmente, quando trafegam em condições de umidade elevada, além disso, afirmaram que a medida que a densidade aumentou, a tendência do solo a ser compactado, pelo tráfego de veículos, foi menor.

Na camada subsuperficial das duas áreas, as respostas da capacidade do solo (RSC e WSC) também não foram diferentes, para os efeitos do tráfego das máquinas dos sistemas de colheita mecanizado e semi-mecanizado, pois ainda na área A, a performance após C2 foi reduzida, aproximando seus valores com as respostas da área B; para o caso da RSC os valores estiveram próximas de $\geq 0,50$, considerados de média performance (Fig. 7); para a área B vale destacar a recuperação da performance da RSC, que esteve relacionada com o aumento nos conteúdos de CO na camada subsuperficial, conforme a Figura 7F.

Para o caso da WSC, com a segunda colheita (C2), na área A, essa performance foi reduzida nas duas camadas do solo, e na área B, os valores se mantiveram constantes, como observados após C1; apesar das mudanças registradas na WSC da área A, os valores entre as duas área A e B mostraram-se mais próximo, na camada superficial, a performance foi ~0,35, e na camada subsuperficial foi ~0,50 e ~0,40, respectivamente para cada área (Fig. 7).

Na Figura 8 estão apresentados os resultados dos índices de qualidade físico em duas camadas do solo (IQFS) e nas diferentes fases da cultura da cana-de-açúcar, tanto na área com colheita mecanizada, como na semi-mecanizada (A e B).



*PL: após o plantio; C1: após primeira colheita; C2: após segunda colheita.

Figura 8. Índice de qualidade física para duas camadas de um Argissolo distroceso em dois sistemas de colheita e diferentes fases da cana-de-açúcar.

Alguns autores (LOZANO *et al.*, 2013; SILVA *et al.*, 2018) têm reportado que o tráfego das diferentes máquinas utilizada na colheita da cana-de-açúcar, causam a maior compactação após os preparos do solo, quando o solo apresenta densidade baixas (<1,5 g cm⁻³) e alta porosidade; sendo logo após, o solo atingir densidade mais elevadas, a tendência é diminuir a umidade reduzindo os efeitos da compactação.

Vale destacar que, na camada superficial, a WSC apresentou melhores respostas do que na camada subsuperficial, significa que o efeito do sistema de colheita, seja mecanizado ou semi-mecanizado, impactaram mais a camada superficial, principalmente a parte estrutural do solo, reduzindo as capacidades de suporte ao crescimento radicular, mas também foi evidente que a conservação parcial ou total da palha da cana, permitiu após um ano das colheitas (mecanizada ou semi-mecanizada) a camada subsuperficial manteve os conteúdos de CO e permitiu que a performance da RSC estivesse mais estável.

Antes da colheita, após plantio da cana (PL), o IQFS apresentou valores que indicam boa qualidade física do solo ($>0,70$) principalmente nas camadas superficial dos solos das duas áreas (Fig. 8) embora também é observada uma menor performance nas camadas subsuperficiais e principalmente na área B, mas com valores ($>0,50$) que indicam relativamente boa qualidade física do solo. Esses resultados sugerem que a prática de preparo do solo, utilizando aradores de disco e sulcagem, melhoraram temporalmente as condições físicas, favorecendo o suporte radicular e capacidade de armazenamento de água, principalmente na camada superficial do solo.

Após a primeira colheita (C1) da cana-de-açúcar, os IQFS (Fig. 8) tiveram um decréscimo nos valores nas duas áreas de cana (A e B), principalmente naquela com o sistema de colheita semi-mecanizado. Na camada superficial, tanto na área A como na B apresentaram redução de 54% e 58% da qualidade, respectivamente, ou seja, os IQFS indicaram qualidade ruim, pois os valores foram $\sim 0,40$ conforme a Figura 8.

Na camada subsuperficial essas reduções dos IQFS foram menos severas do que na camada superficial, contudo esses decréscimos nos valores foram maiores na área B, ou seja, o sistema de colheita semi-mecanizado causou mudanças nas propriedades físicas da camada superficial e também da camada subsuperficial (Fig. 8). Na área A, o IQFS mudou de 0,76 para 0,62, e na área B de 0,56 para 0,44, significando que, a qualidade física foi reduzida $\sim 18\%$ e 21% , respectivamente em cada área.

Segundo (Lozano *et al.*, 2013) em Ultisol para cana-de-açúcar, a superfície do solo apresentou os maiores risco de compactação, durante as colheitas de cana, principalmente quando as máquinas trafegam com umidades elevadas, ou quando o solo apresenta a densidade $<1,50 \text{ g cm}^{-3}$, podendo causar impactos além dos 0,20 m de profundidade do solo.

Da mesma maneira (Silva *et al.*, 2018) afirmaram que a preparação do solo reduz a densidade e a resistência à penetração, principalmente na camada superficial, porém, também enfatizaram que após o preparo, o solo fica mais susceptível, facilitando a compactação do solo em profundidades superiores aos 40 cm, quando trafegam veículos pesados, como tratores e caminhões, durante a colheita de cana.

Os resultados de IQFS nas áreas com o sistema de colheita mecanizado e semi-mecanizado, evidenciaram a maior susceptibilidade de compactação após PL, ou seja, a primeira colheita (C1) causou a maior diminuição da qualidade, na camada superficial a qualidade diminuiu $\sim 55\%$ e a camada superficial $\sim 20\%$, sendo isso mais drástico na área com o sistema semi-mecanizado.

O problema da compactação, gerada durante as colheitas, pode ser agravado com a ausência de controle do tráfego, pois, o tráfego das máquinas sem controles, prejudica progressivamente as condições físicas do solo. Vários autores (*e.g.* RODRÍGUEZ; VALENCIA & URBANO, 2012; LOZANO *et al.*, 2013; SILVA *et al.*, 2018) tem afirmado que a colheita semi-mecanizada da cana-de-açúcar tem algumas desvantagens frente a mecanizadas, primeiramente, o controle de tráfego é praticamente ausente, e as máquinas não são bem ajustadas ao desenho do plantio, além de inadequadas para uso agrícola.

A colheita mecanizada, contam com um desenho de plantios ajustado para o tráfego das máquinas agrícolas, que permitem confinar o tráfego e os efeitos de compactação na área trafegável (*e.g.* MAGALHÃES; BALDO & CERRI, 2008; KINGWELL & FUCHSBICHLER, 2011); além disso, as máquinas apresentam-se mais adequados para seu tráfego nas áreas agrícolas, reduzindo os riscos de compactação do solo (*e.g.* CAMBI *et al.*, 2016; GUIMARÃES JÚNNYOR *et al.*, 2019).

Após a C2, os IQFS continuaram a diminuir, embora em menor proporção do que após C1, ou seja, na camada superficial os valores, entre as duas áreas, estiveram mais próximos, ou seja, apesar da área A ter apresentado redução de 16% e na área B 8%, com respeito a C1, os valores de IQFS (~0,33) foram semelhantes nas duas áreas (Fig. 8) podendo mostrar estabilidade nas mudanças físicas do solo quando o solo atingiu esses IQFS.

Na camada subsuperficial, os IQFS evidenciaram resultados diferentes, ou seja, a redução foi menos acentuada do que na camada superficial, evidenciando melhor qualidade física do solo nessa camada; além disso, observa-se que os valores, entre a área A e B, também ficaram mais semelhantes, mostrando que a área A ainda provocou diminuição da IQFS, e na área B o IQFS aumento, deixando as duas áreas com valores próximos, 0.52 e 0.49, respectivamente (Fig. 8).

Esses resultados evidenciaram que após as colheitas, a maior redução do IQFS foi observada após a primeira colheita de cana e em proporções mais baixas com o sistema mecanizado, atingindo os menores valores, somente após a segunda colheita, por sua vez, o sistema semi-mecanizado apresentou poucas mudanças na qualidade física após a segunda colheita, pois a menor qualidade e os valores mais baixos foram atingidos coma primeira colheita de cana, significa que, a redução da qualidade física do solo foi paulatina com as colheita do sistema mecanizado, e os valores dos IQFS foram semelhantes nas duas áreas pós a segunda colheita.

4. Conclusões

O modelo aditivo utilizado para o desenvolvimento do índice qualidade física do solo permitiu evidenciar, a cada fase da cana-de-açúcar, mudanças nos indicadores físico de qualidade, nas capacidades de suporte ao crescimento radicular e armazenamento de água no solo.

O índice qualidade física do solo apresentou as melhores respostas após o plantio da cana-de-açúcar, quanto a maior perda de qualidade foi observada na camada superficial, logo após a primeira colheita, reduzindo principalmente sua capacidade de suporte ao crescimento radicular, sendo isto mais evidente no sistema de colheita semi-mecanizado do que no mecanizado.

A densidade, a macroporosidade e o carbono orgânico do solo foram as propriedades física do solo que como indicadores de qualidade mostraram alta sensibilidade, tanto na camada superficial como na subsuperficial, ao tráfego de máquinas agrícolas para a colheita de cana-de-açúcar.

Bibliografia

- ABNT, NBR. NBR 7182: solo—ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1986.
- Awe, G. O.; Reichert, J. M.; Fontanela, E. (2020). Sugarcane production in the subtropics: Seasonal changes in soil properties and crop yield in no-tillage, inverting and minimum tillage. *Soil & Tillage Research*, v. 196, p. 104447.
- Barbosa, L.C.; Sérgio, P.; Magalhães, G.; *et al.* (2019). Soil physical quality associated with tillage practices during sugarcane planting in south-central Brazil. *Soil & Tillage Research*, v. 195, p. 1–11.
- Brady, N. C.; Weil, R. R.; Weil, R. R. (2008). *The nature and properties of soils*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Braida, J.A.; Reichert, J.M.; Veiga, M.D.; *et al.* (2006). Resíduos vegetais na superfície e carbono orgânico do solo e suas relações com a densidade máxima obtida no ensaio Proctor. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 30, p. 605-614.
- Braunack, M.V.; Arvidsson, J.; Håkansson, I.; (2006). Effect of harvest traffic position on soil conditions and sugarcane (*Saccharum officinarum*) response to environmental conditions in Queensland, Australia. *Soil & Tillage Research*, v. 89, p. 103–121.
- Budak, M.; Gunal, H.; Celik, I.; *et al.* (2018). Soil quality assessment of upper Tigris basin. *Carpathian J. Earth Environ. Sci.*, v. 13, p. 301–316.
- Bünemann, E.K.; Bongiorno, G.; Bai, Z.; *et al.* (2018). Soil quality – A critical review. *Soil Biol. Biochem*, v. 102, p. 105–125.
- Cambi, M.; Certini, G.; Fabiano, F.; *et al.* (2016). Impact of wheeled and tracked tractors on soil physical properties in a mixed conifer stand. *IForest*, v. 9, p. 89–94.

- Castioni, G. A.; Cherubin, M. R.; Bordonal, R.; *et al.* (2019). Straw removal affects soil physical quality and sugarcane yield in Brazil. *BioEnergy Research*, v. 12, p. 1–12.
- Castioni, G.A.; Cherubin, M.R.; Menandro, L.M.; *et al.* (2018). Soil physical quality response to sugarcane straw removal in Brazil: A multi-approach assessment. *Soil & Tillage Research*, v. 184, p. 301–309.
- Cavalcanti, R. Q.; Rolim, M. M.; De Lima, R. P.; *et al.* (2019). Soil physical and mechanical attributes in response to successive harvests under sugarcane cultivation in Northeastern Brazil. *Soil & Tillage Research*, v. 189, p. 140–147.
- Ceddia, M.B.; Dos Anjos, L.H.; Lima, E.; *et al.* (1999). Sistemas de colheita da cana-de-açúcar e alterações nas propriedades físicas de um solo podzólico amarelo no estado do Espírito Santo. *Pesqui. Agropecu. Bras.*, v. 34, p. 1467–1473.
- Cheong, L.R.; Kee Kwong, K.F.; Preez, C.C. (2009). Soil compaction under sugar cane (*Saccharum hybrid sp.*) cropping and mechanization in Mauritius. *South African J. Plant Soil*, v. 26, p. 199–205.
- Cherubin, M. R.; Lisboa, I. P.; Silva, A. G.; *et al.* (2019). Sugarcane straw removal: implications to soil fertility and fertilizer demand in Brazil. *Bioenergy Research*, v. 12, p. 888–900.
- Cherubin, M.R.; Oliveira, D.M.; Feigl, B. J.; *et al.* (2018). Crop residue harvest for bioenergy production and its implications on soil functioning and plant growth: A review. *Sci. Agric.*, v. 75, p. 255–272.
- de Lima, R. P.; Rolim, M. M.; Dantas, D.; *et al.* (2020). Compressive properties and least limiting water range of plough layer and plough pan in sugarcane fields. *Soil Use and Management*, v. 00, p. 1–12.
- de Sousa, A. C.; Farhate, C. V.; de Souza, Z. M.; Torres, J. L.; *et al.* (2019). Soil load-bearing capacity and development of root system in area under sugarcane with traffic control in Brazil. *Sugar Tech*, v. 21, 153–161.
- Dexter, A.R. (2004). Soil physical quality Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma*, v. 120, p. 201–214.
- Doran, J.W.; Parkin, T.B. (1994). Defining and assessing soil quality. *Defining soil quality for a sustainable environment*, v. 35, p. 1-21.
- Dörner, J.; Sandoval, P.; Dec, D. 2006. The role of soil structure on the pore. *J. Soil Sci. Plant Nutr.*, v. 4, p. 495–508.
- dos Santos, H. G.; Jacomine, P. T.; dos Anjos, L. H.; de Oliveira, V. A.; *et al.* (2018). Brazilian soil classification system. *Embrapa Solos-Livro técnico (INFOTECA-E)*.
- Esteban, D. A.; De Souza, Z. M.; Da Silva, R. B.; *et al.* (2020). Impact of permanent traffic lanes on the soil physical and mechanical properties in mechanized sugarcane fields with the use of automatic steering. *Geoderma*, v. 362, p. 114097.
- Esteban, D. A.; De Souza, Z. M.; Tormena, C. A.; *et al.* (2019). Soil compaction, root system and productivity of sugarcane under different row spacing and controlled traffic at harvest. *Soil & Tillage Research*, v. 187, p. 60–71.
- Galdos, M. V.; Cerri, C. C.; Cerri, C. E. (2009). Soil carbon stocks under burned and unburned sugarcane in Brazil. *Geoderma*, v. 153, p. 347–352.

- Gírio, L. A.; Silva, R. P.; Menezes, P. C.; Carneiro, F. M. *et al.* (2019). Quality of multi-row harvesting in sugarcane plantations established from pre-sprouted seedlings and billets. *Ind. Crops Prod.*, v.142, 111831.
- Glover, J. D.; Reganold, J. P.; Andrews, P. K. (2000). Systematic method for rating soil quality of conventional, organic, and integrated apple orchards in Washington State. *Agric. Ecosyst. Environ.*, v. 80, p. 29–45.
- Graham, M. H.; Haynes, R. J.; Meyer, J. H. (2002). Changes in soil chemistry and aggregate stability induced by fertilizer applications, burning and trash retention on a long-term sugarcane experiment in South Africa. *Eur. J. Soil Sci.*, v. 53, p. 589–598.
- Guimarães Júnnyor, W. S.; Diserens, E.; De Maria, I. C.; *et al.* (2019). Prediction of soil stresses and compaction due to agricultural machines in sugarcane cultivation systems with and without crop rotation. *Science of the Total Environment*, v. 681, p. 424–434.
- Guimarães, L. A.; Dias, L. E.; Rocha, G. C.; *et al.* (2018). Physical quality of bauxite tailing after a decade of environmental recovery. *Rev. Cienc. Agron.*, v. 49, p. 192–200.
- Hussain, I.; Olson, K. R.; Wander, M. M.; *et al.* (1999). Adaptation of soil quality indices and application to three tillage systems in southern Illinois. *Soil & Tillage Research*, v. 50, p. 237–249.
- Johannes, A.; Matter, A.; Schulin, R.; *et al.* (2017). Optimal organic carbon values for soil structure quality of arable soils. Does clay content matter? *Geoderma*, v. 302, p. 14–21.
- Karlen, D. L.; Stott, D. E. (1994). A framework for evaluating physical and chemical indicators of soil quality. *Defining soil quality for a sustainable environment*, v. 35, p. 53-72.
- Karlen, D.L.; Ditzler, C.A.; Andrews, S.S. (2003). Soil quality: Why and how? *Geoderma*, v. 114, p. 145–156.
- Kingwell, R.; Fuchsbichler, A. (2011). The whole-farm benefits of controlled traffic farming: An Australian appraisal. *Agric. Syst.*, v. 104, p. 513–521.
- Lima, R. P.; Da Silva, A. P.; Giarola, N. F.; Da Silva, A. R; *et al.* (2017). Changes in soil compaction indicators in response to agricultural field traffic. *Biosystems Engineering*, v. 162, p. 1-10.
- Lisboa, I. P.; Cherubin, M. R.; Satiro, L. S.; *et al.* (2019). Applying Soil Management Assessment Framework (SMAF) on short-term sugarcane straw removal in Brazil. *Industrial Crops & Products*, v. 129, p. 175–184.
- Lozano, N.; Rolim, M.M.; Oliveira, V.S.; *et al.* (2013). Evaluation of soil compaction by modeling field vehicle traffic with SoilFlex during sugarcane harvest. *Soil & Tillage Research*, v. 129, p. 61–68.
- Magalhães, P.S.; Baldo, R.F.; Cerri, D.G. (2008). Sistema de sincronismo entre a colhedora de cana-de-açúcar e o veículo de transbordo. *Eng. Agrícola*, v. 28, p. 274–282.
- Manhães, C.M.; Francelino, F.M.; Araújo, R.A.; *et al.* (2018). Visible losses to the mechanical harvesting of ratoon sugarcane using the harvester John Deere 3520. *Am. J. Anal. Chem.*, v. 09, p. 580–590.
- Manhães, C.M.; Garcia, R.F.; Francelino, F. M.; *et al.* (2015). Factors that affect sprouting and tillering of sugar cane. *Vértices*, v. 17, p. 163-191.

- McPhee, J. E.; Aird, P. L.; Hardie, M. A.; Corkrey, S. R. (2015). The effect of controlled traffic on soil physical properties and tillage requirements for vegetable production. *Soil & Tillage Research*, v. 149, p. 33–45.
- Menta, C.; Conti, F.D.; Pinto, S.; Bodini, A. (2018). Soil biological quality index (QBS-ar): 15 years of application at global scale. *Ecol. Indic.*, v. 85, p. 773–780.
- Moraes, M.; Debiassi, H.; Carlesso, R.; *et al.* (2016). Soil physical quality on tillage and cropping systems after two decades in the subtropical region of Brazil. *Soil & Tillage Research*, v. 155, p. 351–362.
- Mukhopadhyay, S.; Masto, R.E.; Tripathi, R.C.; *et al.* (2019). Application of soil quality indicators for the phytoremediation of mine spoil dumps, in: *Phytomanagement of Polluted Sites*. Elsevier Inc., p.p. 361–388.
- Naderi-Boldaji, M.; Kazemzadeh, A.; Hemmat, A.; Rostami, S. *et al.* (2018). Changes in soil stress during repeated wheeling: A comparison of measured and simulated values. *Soil Research*, v. 56, n. 2, p. 204-214.
- Oliveira, A.P.; Lima, E.; Anjos, L.H.; Zonta, E.; *et al.* (2014). Sistemas de colheita da cana-de-açúcar: conhecimento atual sobre modificações em atributos de solos de tabuleiro. *Rev. Bras. Eng. Agrícola e Ambient.*, v.18, p. 939–947.
- Oliveira, G. G.; Oliveira, G. C.; Silva, É. A.; *et al.* (2015). Indicadores de qualidade física para Argissolos sob pastagens nas regiões leste e sul de Minas Gerais. *Rev. Ciências Agrárias - Am J. Agric. Sci.*, v. 58, p. 388–395.
- Ortiz, P. F.; Rolim, M.; De Lima, J. L.; *et al.* (2017). Physical qualities of an Ultisol under sugarcane and Atlantic forest in Brazil. *Geoderma Regional*, v. 11, p. 62–70.
- Otto, R.; Silva, A. P.; Franco, H. C.; Oliveira, E. C.; *et al.* (2011). High soil penetration resistance reduces sugarcane root system development. *Soil & Tillage Research*, v. 117, p. 201–210.
- Reis, D. A.; Liane, C.; Lima, R.; Bamberg, A. L. (2019). Developing a Soil Physical Quality Index (SPQi) for lowlands under different deployment times of no-tillage. *Sci. Agric.*, v.1, p. 157–164.
- Rodríguez, L. A.; Valencia, J. J.; Urbano, J. A.; (2012). Soil compaction and tires for harvesting and transporting sugarcane. *J. Terramechanics*, v. 49, p. 183–189.
- Rossi Neto, J.; Souza, Z. M.; Kölln, O. T.; Carvalho, J. L. *et al.* (2018). The arrangement and spacing of sugarcane planting influence root distribution and crop yield. *Bioenergy Res.*, v.11, p. 291–304.
- Scarpare, F. V.; van Lier, Q. D.; de Camargo, L.; *et al.* (2019). Tillage effects on soil physical condition and root growth associated with sugarcane water availability. *Soil & Tillage Research*, v. 187, p. 110–118.
- Silva, R. P.; Rolim, M. M.; Gomes, I. F.; *et al.* (2018). Numerical modeling of soil compaction in a sugarcane crop using the finite element method. *Soil & Tillage Research*, v. 181, p. 1–10.
- Soracco, C.G.; Lozano, L.A.; Villarreal, R.; *et al.* (2015). Efeito da compactação do solo pelo tráfego de máquinas na configuração dos poros do solo. *Rev. Bras. Cienc. do Solo*, v. 39, p. 408–415.

- Sousa, J.G.; Cherubin, M.R.; Cerri, C.E.; *et al.* (2017). Sugar cane straw left in the field during harvest: decomposition dynamics and composition changes. *Soil Res.*, v. 55, p. 758–768.
- Souza, G. S.; Souza, Z. M.; Cooper, M.; Tormena, C. A. (2015). Controlled traffic and soil physical quality of an Oxisol under sugarcane cultivation. *Sci. Agric.*, v. 72, p. 270–277.
- Stolf, R. (1991). Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência de solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 15, p. 229-235.
- Surendran, U.; Ramesh, V.; Jayakumar, M.; *et al.* (2016). Improved sugarcane productivity with tillage and trash management practices in semiarid tropical agroecosystem in India. *Soil & Tillage Research*, v. 158, p. 10–21.
- Teixeira, P. C.; Donagemma, G. K.; Fontana, A.; Teixeira, W. G. (2017). Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro, Embrapa. 573p.
- Tim Chamen, W.C.; Moxey, A.P.; Towers, W.; *et al.* (2015). Mitigating arable soil compaction: a review and analysis of available cost and benefit data. *Soil & Tillage Research*, v. 146, p. 10–25.
- Tormena, C. A. Karlen, D. L.; Logsdon, S. *et al.* (2017). Corn stover harvest and tillage impacts on near-surface soil physical quality. *Soil & Tillage Research*, v. 166, p. 122-130.
- Vischi Filho, O. J.; de Souza, Z. M.; de Souza, G. S.; *et al.* (2017) Physical attributes and limiting water range as soil quality indicators after mechanical harvesting of sugarcane. *Australian Journal of Crop Science*, v. 11, p. 169–176.
- Warrick, A. W.; Nielsen, D.R. (1980). Spatial variability of soil physical properties in the field. *Application of soil physics*. p. 319-344.
- White, P.M.; Webber, C.L.; (2018). Green-cane harvested sugarcane crop residue decomposition as a function of temperature, soil moisture, and particle size. *Sugar Tech*, v. 20, p. 497–508.
- Wymore, A. (1993). *Model-based systems engineering: an introduction to the mathematical theory of discrete systems and to the tricotyledon theory of system design*. Tokyo: CRC press, 730 p.
- Yeomans, J. C.; Bremner, J. M. (1988). A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. *Communications in soil science and plant analysis*, v. 19, p. 1467-1476.

- CAPÍTULO III –

Falhas na cultura de cana-de-açúcar e qualidade física de um Argissolo sob colheita semi-mecanizada e mecanizada

Falhas na cultura de cana-de-açúcar e qualidade física de um Argissolo sob colheita semi-mecanizada e mecanizada

RESUMO: A ocorrência de falhas em cana-de-açúcar é muito comum, sendo quantificadas manualmente; mas recentemente, através do processamento de imagens. Considera-se falhas os espaços ($>0,50$ m) entre uma cana e outra, de uma mesma linha de plantio, ocasionadas por colmos não brotados, que em alta incidência, resultam em perdas na produtividade da cultura. As falhas ocorrem por vários fatores (bióticos e abióticos) e durante diferentes fases ou ao longo do ciclo da cana; embora, essas podem também resultar durante as colheitas de cana-de-açúcar, após o tráfego das máquinas, originadas por danos físicos diretos ou indiretamente pela redução da qualidade física e compactação do solo. Objetivou-se avaliar as ocorrências de falhas e a qualidade física do solo, sob dois sistemas de colheita de cana-de-açúcar. Em uma plantação de 18 ha de cana-de-açúcar foram eleitas duas áreas de 1 ha, e em cada uma delas, delimitadas em 12 parcelas para a avaliação de falhas de cana-de-açúcar e para a determinação da qualidade física solo. Após 90 dias de cada fase da cultura (plantio e colheita) na área mecanizada e semi-mecanizada, foram capturadas imagens via drone para a avaliação de falhas na cana-de-açúcar e também a amostragem física de solo na camada superficial e subsuperficial, para a determinação da qualidade física, através de um modelo aditivo, considerando as variáveis, densidade, resistência à penetração, carbono orgânico, macroporosidade do solo e água disponível para as plantas. A medição de falhas por geoprocessamento de imagens RGB permitiu identificar falhas $>0,50$ m em cada uma das áreas nas diferentes fases culturais. Para o sistema de colheita semi-mecanizado, que inclui o corte manual, as falhas aumentaram de 12 para 23 a cada 100, representando ~ 22 m, ou seja, $\sim 27\%$ de falhas. No sistema semi-mecanizado também foi evidenciada uma redução significativa da qualidade física do solo, principalmente da camada superficial, quando comparadas com a qualidade após plantio e colheita mecanizada, pois houve aumento da densidade, resistência à penetração do solo, e redução da água disponível e porosidade do solo. Com as análises foi possível observar uma considerável correlação entre a qualidade física do solo e a ocorrência de falhas na cana-de-açúcar, ou seja, quando a qualidade diminuiu as falhas aumentaram. Contudo, após a primeira colheita da cana-de-açúcar, o sistema mecanizado apresentou as melhores respostas tanto na menor ocorrência de falhas, quanto na conservação da qualidade física do solo.

Palavras-chave: agricultura, compactação, drone, física do solo, geoprocessamento, *Saccharum spp.*, VANT.

Sugarcane gaps and physical quality of an Argissolo under semi-mechanized and mechanized harvests

ABSTRACT: The occurrence of gaps in sugarcane is very common, and are quantified manually, but recently through image processing. Gaps are considered to be the spaces (>0.50 m) between one sugarcane and another, of the same line, caused by unsprouted stalks, which in high incidence, result in losses in crop productivity. Gaps occur due to several factors (biotic and abiotic) and during different phases or along the sugarcane cycle; however, they can also result during sugarcane harvests, after machine traffic, originated by direct or indirect physical damage by reducing physical quality and soil compaction. The objective was to evaluate the occurrences of gaps and the physical quality of the soil, under two sugarcane harvesting systems. In an 18 ha sugarcane plantation, two 1 ha areas were elected, and in each one of them were delimited in 12 plots for the evaluation of sugarcane gaps and for the determination of the physical soil quality. After 90 days of each crop phase (planting and harvesting) in the mechanized and semi-mechanized area, images were captured via drone for the evaluation of gaps in sugarcane and also the physical sampling of soil in the superficial and subsurface layer, for the determination of physical quality, through an additive model, considering the variables, bulk density, resistance to penetration, organic carbon, macroporosity of the soil and water available for the plants. The measurement of gaps by geoprocessing RGB images allowed the identification of gaps >0.50 m in each area in the different cultural phases. For the semi-mechanized harvesting system, which includes manual cutting, the gaps increased from 12 to 23 every 100, representing ~ 22 m, or $\sim 27\%$ of gaps. In the semi-mechanized system there was also a significant reduction in the physical quality of the soil, especially the superficial layer, when compared to the quality after planting and mechanized harvesting, because there was an increase in bulk density, penetration resistance of the soil, and a reduction in the available water and soil porosity. With the analyses it was possible to observe a considerable correlation between the physical quality of the soil and the occurrence of gaps in the sugarcane, in other words, when the quality decreased the gaps increased. However, after the first sugarcane harvest, the mechanized system showed the best responses both in the lower occurrence of gaps and in the conservation of soil physical quality.

Key-words: agriculture, compaction, drone, geoprocessing, *Saccharum spp.*, soil physics, UAV.

1. Introdução

Entre os países de maior produção de cana-de-açúcar no mundo encontra-se o Brasil e em várias das suas regiões vêm sendo implementado o sistema de colheita mecanizada, em contraponto ao tradicionalmente utilizado, o semi-mecanizado, o qual inclui o uso de caminhões convencionais e a queima anterior ao corte manual da cana.

Essa transição para o novo sistema de colheita, a exemplo o mecanizado, levanta discussões sobre as vantagens e desvantagens de cada forma de colheita, que incluem a eficiência do trabalho de colheita, até os efeitos na compactação e degradação que podem causar no solo (CAPAZ *et al.*, 2013; MA *et al.*, 2014; BASTOS *et al.*, 2016).

Entre os temas em destaque está a deterioração do canavial ao longo dos ciclos, a redução da longevidade e produtividade, podendo estar relacionadas com as atuais práticas de colheita utilizadas que causam danos diretos as plantas, ocasionando falhas nas linhas de plantio ao ponto de antecipar custosa renovação do canavial.

As falhas da cana-de-açúcar são consideradas como espaços (>0,50 m) com colmos nulos ou não brotados, entre uma cana e outra de uma mesma linha de plantio, (STOLF *et al.*, 2016); essas falhas geralmente são ocasionadas pelo tráfego inadequado de máquinas colhedoras que causam danos físicos diretos sobre a cana, ou indiretamente com a compactação do solo, que diminuir progressivamente sua qualidade física e cria condições desfavoráveis para o desenvolvimento das rebrotas da cana-de-açúcar.

Segundo Stolf *et al.* (2016) a alta ocorrência de falha, podem diminuir a produtividade, considerando a alta porcentagem de falhas como não normais ao plantio, ou seja, existem fatores externos que prejudicam a qualidade do plantio, podendo causar perdas produtivas. Para Manhães *et al.* (2015) a compactação do solo está fortemente vinculada com a queda acelerada e sucessiva da produtividade da cana-de-açúcar, pelos inúmeros danos causados nas rebrotas da cana após as colheitas.

Segundo Benedini e Silva (2010) os danos mais comuns são: pisoteio e arranque das soqueiras, declínio no desenvolvimento e até as falhas nas rebrotas, que terminam por reduzir o número de colmos efetivos por linha de cana. Embora, outros autores (VISCHI FILHO *et al.*, 2017; DE SOUSA *et al.*, 2019; ESTEBAN *et al.*, 2020) também relataram a perda produtiva, ocasionada pela compactação do solo dos sistemas de colheitas, pois, aumentam a densidade, resistência à penetração e reduz a disponibilidade de água do solo, ao ponto de impedir o crescimento radicular das plantas.

Nesses sentido, para a avaliação dos impactos no solo, em relação ao tráfego de máquinas agrícolas, indicadores de qualidade têm sido desenvolvido, com o propósito de identificar mudanças pontuais nas propriedades do solo, através de modelos que envolvem várias variáveis, permitindo determinar a qualidade do solo e sua variação de forma espacial e temporal (DEXTER, 2004; VISCHI FILHO *et al.*, 2017; DO PRADO *et al.*, 2019; KARLEN *et al.*, 2003; MENTA *et al.*, 2018; SAHA *et al.*, 2018).

Atualmente com o geoprocessamento de imagens obtidas via drone (STOLF *et al.*, 2016; SOUZA *et al.*, 2017; MONTIBELLER *et al.*, 2017) também foi otimizado o processo de monitoramento de falhas nos canaviais, gerando estudos mais precisos de maneira espacial e temporal, que poderiam evidenciar a relação da ocorrência de falhas, com a compactação gerada pelo tráfego das máquinas agrícola e a perda de qualidade do solo.

Com atual aumento das áreas mecanizadas, torna-se importante essas avaliações e ainda se faz necessário comparar os atuais sistemas de colheita com os sistemas mais vanguardistas e avaliar suas performances, através da avaliação espaço-temporal da qualidade física do solo e as alterações diretas sobre a cultura, a exemplo, a ocorrência de falhas nas diferentes fases culturais (após plantio e após colheitas).

Nessa transição de sistemas colheita semi-mecanizado para mecanizado, há necessidade de avaliar a eficiência desses sistemas, considerando que, com o sistema mecanizado os efeitos negativos na qualidade física do solo e a ocorrência de falhas de cana-de-açúcar serão menores do que com o tradicional sistema de colheita. Diante disto objetivou-se determinar a ocorrência de falhas de cana-de-açúcar e a qualidade física em um Argissolo Amarelo distrocoeso sob colheita semi-mecanizada e mecanizada.

2. Material e métodos

2.1 Sítio experimental

O estudo foi realizado durante os meses de janeiro de 2018 até março de 2020, numa área cultivada com cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) localizada no município de Igarassu, Estado de Pernambuco, Brasil (Fig. 1, ver mapas) altitude de 180 m e conforme classificação de Köppen, clima quente e úmido, megatérmico (As') com temperatura média de $\sim 25 \pm 0,31$ °C, com máximos e mínimos de 33,1 e 18,6 °C, umidade relativa média de $\sim 77 \pm 0,95\%$, com máximas e mínimas de 95 e 42%, e precipitação anual de $\sim 1487 \pm 63$ mm variando entre ~ 1304 e 1583 mm ano, para os períodos de 2016 - 2019.

O solo da área foi classificado como Argissolo/*Ultisol* (dos Santos, 2018; Soil Survey Staff, 2014) com boas características para o desenvolvimento da agricultura, porém, com fertilidade natural limitada, predominância de areia com baixos conteúdos de argila e considerado suscetível ao efeito de erosão hídrica (BRADY & WEIL, 2008; dos Santos, 2018).

Para a caracterização física do solo foram coletadas amostras deformadas, entre a camadas superficial (0–0,20 m) e subsuperficial (0,20–0,40 m) e as análises realizadas no Laboratório de Mecânicas dos Solo e Aproveitamento de Resíduos da UFRPE, conforme Teixeira *et al.* (2017) e NBR 7182 (ABNT, 1986).

Nas características do solo da área cultivada com cana-de-açúcar, Tabela 1, destaca-se a mudança na textura, de areia franca na camada superficial, para franco arenosa nas camadas mais profundas, como também maior conteúdo de matéria orgânica na camada superficial pela prévia adubação com resíduos, torta-de-filtro (20 t ha⁻¹).

Tabela 1. Caracterização do solo e da área de cana-de-açúcar.

Características	Áreas de cana-de-açúcar	
Classe	<i>Ultisol</i> / Argissolo*	
Densidade de partícula (g cm ⁻³)	2,63	
Anos de cultivo	50 anos (Registro. 1969)	
Ciclo produtivo	1	
Fase cultura	Renovação de plantio	
Camada (m)	0 – 0,20	0,20 – 0,40
Textura	Areia Franca	Franco arenoso
Areia (%)	83,36	78,65
Silte (%)	9,07	9,28
Argila (%)	7,57	12,07
Matéria orgânica (g kg ⁻¹)	4,00	2,44
Densidade máxima (g cm ⁻³)	1,90	1,85
Umidade crítica (%)	8,16	8,64

*Sistema brasileiro de classificação de solos (dos Santos, 2018)

2.2 Áreas de Estudo

Num talhão de 18 ha (Fig. 1) cultivado com cana-de-açúcar, renovado com preparo convencional do solo em toda a área e em condições de relevo relativamente homogêneas (inclinação $\leq 10\%$) foram delimitadas duas parcelas de 100 × 100 m, denominadas, Área A, a ser colhida com o sistema totalmente Mecanizado, e Área B, com o sistema Semi-mecanizado. Em cada uma das áreas experimentais (Áreas A e B) foram delimitados e marcados pontos espaçados no perímetro das áreas, utilizando-se trena e GPS para a georreferenciação (Fig. 1).

Em toda área foi realizado preparo convencional do solo (02/2016), constando de subsolagem, gradagem, nivelamento e sulcagens, fazendo uso de tratores e implementos

agrícolas. Para a execução do plantio foram utilizados tratores, que carregaram e distribuíram a cana (variedade RB92579) pela área entre os sulcos.

O plantio foi organizado em linhas duplas ou espaçamento combinado, onde um par de fileiras de cana-de-açúcar, formam a linha de plantio, e entre cada linha, deixados um espaço que formam as entrelinhas de cana, reservado para o tráfego das máquinas agrícolas, conforme a Figura 2.

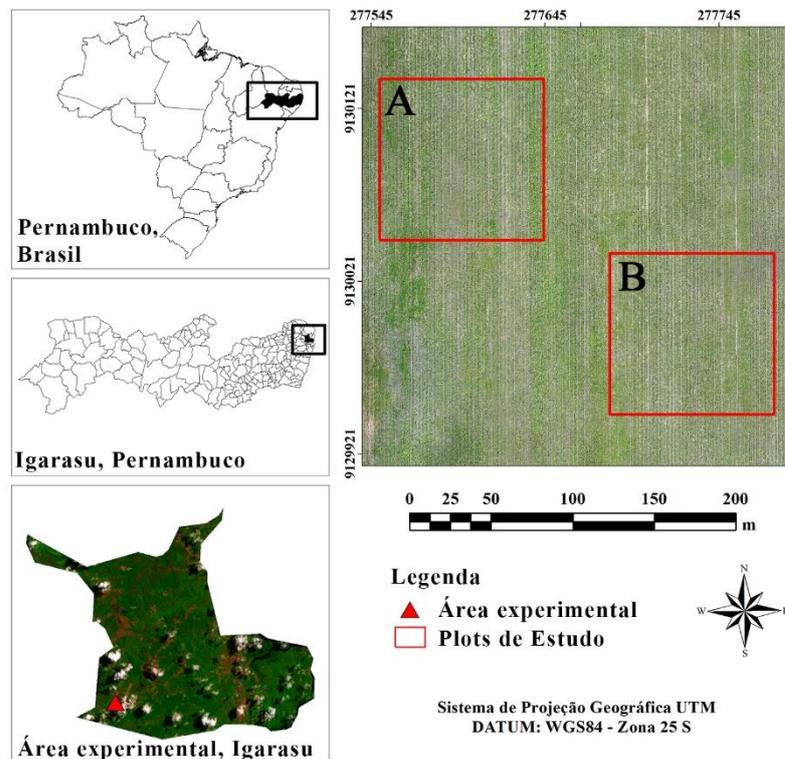


Figura 1. Localização experimental, área agrícola da cana-de-açúcar e delimitações da área após plantio em Igarassu, PE, Brasil.

No sistema mecanizado (Área A) todo o processo foi realizado por máquinas em ausência de controle de tráfego de precisão. Nessa área foi utilizada a colhedora de esteira (modelo CH670) com cortador de base e rolo elevador, com ~20 t de peso, e o sistema de transbordo (trator agrícola e transbordo) com capacidade de 10 t, utilizado para o transporte da colheita (Fig. 2B). Nessa área a colheita também é denominada como “cana-crua”, pois a cana-de-açúcar não foi queimada para execução do processo.

Em termos operacionais, as duas máquinas trafegam na área de cana-de-açúcar de maneira simultânea e paralelas uma com a outra, no sentido das linhas de cana-de-açúcar, trafegando nos espaços das entrelinhas da cana (Fig. 2A), e executando o corte de duas linhas por vez, a uma velocidade ~12 km h⁻¹.

Para o caso da colheita semi-mecanizada, utilizada na Área B, foi realizada com queima da palha e corte manual, e o carregamento foi realizado com máquinas

carregadeiras convencionais (trator com garra hidráulica); e para o transporte, trator e reboque convencionais com capacidade de carregamento de 12 t, destacando a ausência de controle de tráfego em toda a operação (Fig. 2C).

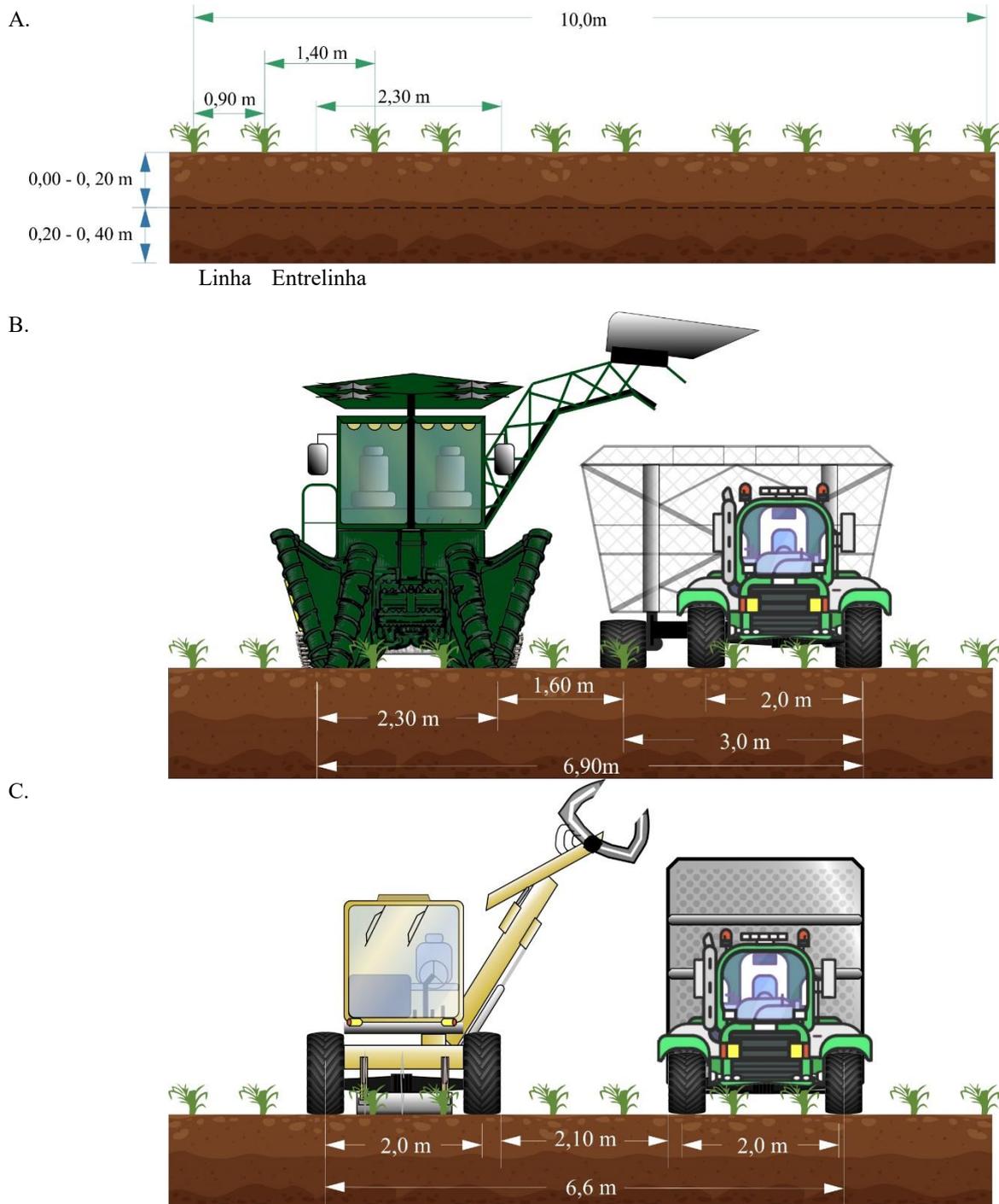


Figura 2. Esquema do plantio de cana-de-açúcar, sistema de colheita mecanizado (colheitadeira e transbordo e trator) e sistema de colheita semi-mecanizado (carregadeira e trator com reboque convencional).

Em termos gerais, o processo de colheita da cana foi realizado em 3 partes, I corte da cana, II carregamento, III transporte, independente do sistema de colheita, porém utiliza diferentes máquinas.

2.3 Variáveis estudadas e experimento

Em cada uma das áreas foram avaliados os efeitos de dois sistemas de colheita de cana-de-açúcar, na ocorrência de falhas e qualidade física do solo, em diferentes fases da culturais, ou seja, as avaliações foram realizadas após 90 dias após o plantio (PL), e após a primeira (C1) e segunda (C2) colheita de cana-de-açúcar.

Em cada uma das áreas de cana-de-açúcar foram delimitadas 12 parcelas, de 2 × 40 m, para a avaliação das falhas (Fig. 3) e para a avaliação da qualidade física do solo; essa medição foi realizada mediante o geoprocessamento de imagem (e.g. Fig. 3) obtidas via VANT (veículo aéreo não tripulado) ou *Drone*, o qual estava equipado com um sensor FC220 que permitiu obter as imagens RGB (*Red, green and blue bands*) com 18 MP e resolução de 4000 × 3000 pixels (72 ppp).

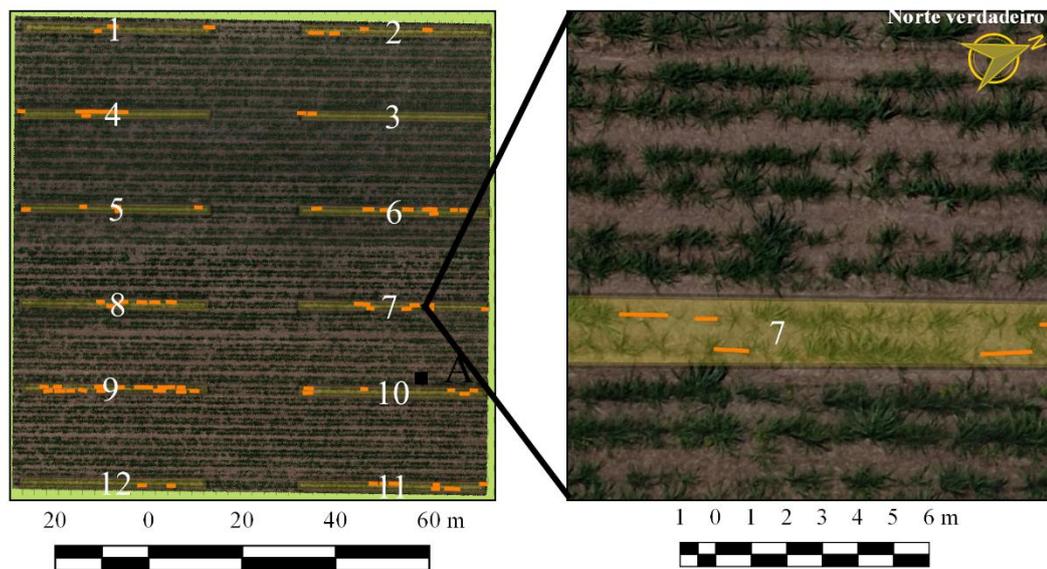


Figura 3. Parcelamento das áreas de cana-de-açúcar, medição de falhas de cana-de-açúcar.

Para a programação dos voos foi utilizada a plataforma *Dronedeploy*, com os *inputs* das coordenadas, sistema de referência (WGS84/Pseudo Mercator) altura do voo ~60 m e com sobreposição frontal e lateral de 80% e 75% respectivamente, para cada captura de imagem.

O processamento de imagens foi realizado utilizando o *Software* QGIS 2.18 e os complementos *PlaceaPin* e *PoinConector*, com o qual foi possível realizar a identificação supervisionada e a mediação automáticas de falhas (Fig. 3), logo após, foram geradas planilhas eletrônicas com informações de comprimento das falhas.

Na avaliação das falhas foram considerados os parâmetros propostos por Stolf (2015), sendo necessário primeiramente filtrar todas as falhas, identificadas e com comprimentos $<0,5$ m, e poder determinar número de falhas em 100 m (F_{100m}), falha total (F_T), porcentagem de falhas ($F\%$), tamanho médio da falha (F_{TM}),

Para avaliação da qualidade física do solo das parcelas, amostras de solos foram realizadas, em três pontos específicos, no início, parte média e parte final, ou seja, a cada 20 m de um ponto para outro, e sucessivamente para cada uma das parcelas. Essas amostragens foram realizadas em duas camadas diferentes do solo, camada superficial (0,0 – 0,20 m) e subsuperficial (0,20 – 0,40 m), conforme a Figura 4.

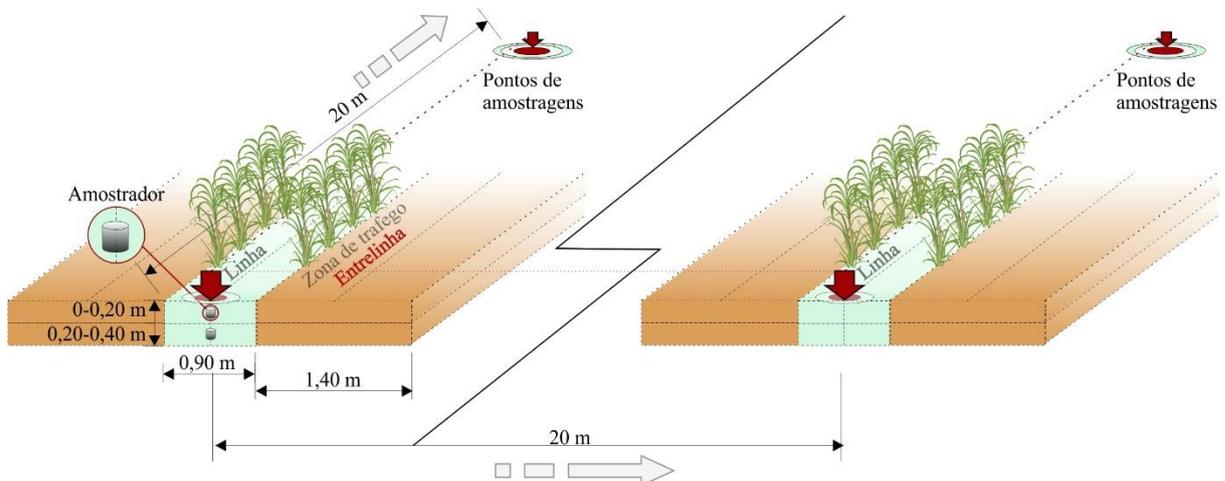


Figura 1. Esquema amostrais de solo nas parcelas de cana-de-açúcar.

Nos pontos para a avaliação de qualidade física do solo, algumas características do solo foram avaliadas, densidade do solo ($\rho_d - g\ kg^{-1}$), conteúdo de água no solo ($\theta - cm^3\ cm^{-3}$), macroporosidade ($P_{mac} - cm^3\ cm^{-3}$), água disponível ($\theta_{DIS} - cm^3\ cm^{-3}$) resistência à penetração do solo ($R_p - MPa$) e carbono orgânico ($CO - g\ kg^{-1}$).

Para determinar a ρ_d foi utilizado o amostrador de Ulhand para solo indeformado (Teixeira *et al.*, 2017). Com essa amostragem também foi possível determinar água disponível (θ_{DIS}) e macroporosidade (P_{mac}) do solo, conforme os seguintes modelos matemáticos, que consideram a densidade do solo (Tab. 2).

Tabela 2. Modelos para determinar os conteúdos de água disponível (θ_{DIS}) e macroporosidade (P_{mac}) para diferentes densidades do solo (ρ_d) e para duas camadas em um Argissolo com cana-de-açúcar.

Prof. (m)	θ_{DIS}	P_{mac}
0 - 0,20	$\theta_{DIS} = -0,785 + 1,35\rho_d - 0,458\rho_d^2$	$P_{mac} = 1,863 - 1,88\rho_d + 0,487\rho_d^2$
0,20 - 0,40	$\theta_{DIS} = -1,227 + 1,853\rho_d - 0,616\rho_d^2$	$P_{mac} = 1,22 - 1,104\rho_d + 0,25\rho_d^2$

Para determinar o conteúdo de água no solo (θ) e o carbono orgânico (CO) foram necessárias coleta de amostra de solo indeformadas (200 g.). O θ foi obtida pelo método gravimétrico e em relação à densidade do solo (Teixiera *et al.*, 2017), e o CO obtido pela metodologia de titulação proposta por Yeomans e Bremner (1988).

Para a estimação da resistência à penetração (Rp), foram consideradas, as ρ_d e os θ , para estimar as Rp ajustadas ao modelo de Busscher (1997), para as duas camadas de um Argissolo, conforme Tabela 3.

Tabela 3. Modelos para a resistência à penetração do solo (Rp) conforme o modelo de Busscher (1997) para duas camadas em um Argissolo com cana-de-açúcar.

Prof. (m)	Rp
0 - 0,20	$Rp = 0,5104 \times \theta^{-0,4730} \times \rho_d^{1,535}$
0,20 - 0,40	$Rp = 0,2213 \times \theta^{-0,667} \times \rho_d^{3,5460}$

Para determinar o índice de qualidade de cada uma das parcelas de cana-de-açúcar, cada uma das propriedades físicas do solo foi transformada para indicadores físicos de qualidade (IFQs) utilizando os modelos de IFQs, conforme a Tabela 4. Logo após, cada indicador esteve em função da capacidade de retenção de água no solo (WSC) e/ou na capacidade de suporte ao crescimento radicular das plantas (RSC).

Tabela 4. Modelos de Indicadores físicos de qualidade (IFQs) para um Argissolo em duas camadas.

IFQs	Camadas		Tipo
	0 - 0,20 m	0,20 - 0,40 m	
ρ_d	$\frac{-1}{1 + e^{(-29 \times (Ds - 1.658))}} + \frac{1}{1 + e^{(-29 \times (Ds - 1.278))}}$	$\frac{-1}{1 + e^{(-24 \times (Ds - 1.692))}} + \frac{1}{1 + e^{(-24 \times (Ds - 1.228))}}$	Ótima
Rp	$\frac{1}{1 + e^{(12 \times (Rp - 1,91))}}$	$\frac{1}{1 + e^{(3,7 \times (Rp - 3,1))}}$	Menos é melhor
CO	$\frac{1}{1 + e^{(-0,45 \times (CO - 19,32))}}$	$\frac{1}{1 + e^{(-0,642 \times (CO - 13,47))}}$	Mais é melhor
P_{mac}	$\frac{1}{1 + e^{(100 \times (P_{mac} - 0,169))}} + \frac{-1}{1 + e^{(120 \times (P_{mac} - 0,08))}}$	$\frac{1}{1 + e^{(120 \times (P_{mac} - 0,133))}} + \frac{-1}{1 + e^{(120 \times (P_{mac} - 0,068))}}$	Ótima
θ_{DIS}	$\frac{1}{1 + e^{(-150 \times (\theta_{DIS} - 1,17))}}$	$\frac{1}{1 + e^{(-138 \times (\theta_{DIS} - 0,12))}}$	Mais é melhor

ρ_d : densidade; Rp: resistência à penetração; CO: carbono orgânico; P_{mac} : Macroporosidade; θ_{DIS} : água disponível.

Na Tabela 5 apresenta-se o modelo aditivo para determinar índice de qualidade físico do solo, no qual foram consideradas as capacidades do solo em função dos IQFs, e os valores numéricos de importância, que para esse caso, os valores foram proporcionalmente iguais para cada propriedade do solo.

Tabela 5. Modelo aditivo para a determinação do Índice de qualidade física do solo (IQFS).

Função no solo	- A - PN	- B - IFQs	- C - PN	- D - B × C	- E - ΣD	- F - A × E	F1+F2
- RSC -	0,5	ρ_d Rp CO	0,33 0,33 0,33	D ₁ D ₂ D ₃	E ₁	F ₁	IQFS
- WSC -	0,5	θ_{DIS} P _{mac}	0,25 0,25	D ₁ D ₂	E ₂	F ₂	

RSC, WSC: capacidade de suporte radicular e de armazenamento de água do solo;

PN: peso numérico de importância para as funções e para os IFQ;

IFQs: Indicador físico de qualidade; IQFS: Índice de qualidade física do solo.

2.4 Análises estatísticas

Os resultados obtidos, das falhas de cana-de-açúcar, e os índices de qualidade física do solo, foram analisados, aplicando estatística descritiva, validação pela distribuição normalidade de *Shapiro-Wilk* ($n < 50$) considerando a probabilidade de significância $>0,05$.

A dispersão dos dados amostrais foi avaliada através do desvio padrão e o coeficiente de variação de Pearson (CV), considerando os critérios de Warrick e Nielsen (1980), baixa variação $CV < 0,15$, média $0,15 < CV < 0,5$ e alta quando o $CV > 0,5$.

Também foram avaliados o grau de correlação entre a ocorrência de falhas e os índices de qualidade dos solos. Para os casos de correlação linear foi avaliado pelo coeficiente de Person, e para não linear, o coeficiente de Spearman; nos casos de obtenção de modelos de regressão foi considerado coeficiente de determinação (r^2).

Para analisar a diferença dos resultados das diferentes fases culturais, comparação pelo teste de t, com probabilidade de 95%, foi aplicado, e nos casos que as fases apresentaram estatísticas significativas, aplicou-se o teste de Tukey (95%) para as comparações das médias.

3. Resultados e discussão

A estatística descritiva dos dados das propriedades físicas do solo, após o plantio e na colheita, mecanizada e semi-mecanizada, foram apresentadas na Tabela 6. A partir dos dados puderam ser observadas diferenças nas médias, ou seja, em termos gerais, acréscimos nos valores da ρ_d , Rp, P_{mac} e θ_{DIS} , e para o caso do CO decréscimo.

Estas mudanças nas propriedades do solo foram consequências do tráfego de máquinas, para a execução das colheitas da cana-de-açúcar. Segundo alguns autores (STRECK *et al.*, 2004, SILVA *et al.*, 2006; VISCHI FILHO *et al.*, 2015) o frequente

tráfego de máquinas agrícolas altera as condições físicas do solo, como o aumento da densidade e redução da porosidade; para este caso, a densidade da camada superficial passou de 1,50 para $\sim 1,70 \text{ g cm}^{-3}$ (Tab. 6), e na camada subsuperficial os valores foram mais constantes, após a primeira colheita da cana ($\sim 1,69 \text{ g cm}^{-3}$).

Tabela 6. Estatística descritiva das propriedades física, em duas camadas, de um Argissolo com cana-de-açúcar, após Plantio (PL) e colheitas mecanizada (CMz) e semi-mecanizada (CSM).

C. (m)*	Fases	$\rho_d (\text{g cm}^{-3})^*$			$R_p (\text{MPa})^*$			$CO (\text{g kg}^{-1})^*$			$P_{mac} (\text{cm}^3 \text{cm}^{-3})^*$			$\theta_{dis} (\text{cm}^3 \text{cm}^{-3})^*$		
		PL	CSM	CMz	PL	CSM	CMz	PL	CSM	CMz	PL	CSM	CMz	PL	CSM	CMz
0,00 – 0,20	Média	1,50	1,73	1,69	1,65	3,44	3,15	22,29	12,01	10,11	0,09	0,03	0,04	0,21	0,18	0,19
	Mín.	1,44	1,59	1,63	1,55	2,43	2,73	17,41	9,07	7,66	0,06	0,02	0,02	0,21	0,16	0,18
	Máx.	1,58	1,81	1,74	1,80	3,95	3,48	26,41	17,77	12,93	0,12	0,07	0,05	0,21	0,20	0,20
	Medi.	1,50	1,75	1,70	1,65	3,68	3,14	22,09	11,27	9,16	0,10	0,02	0,04	0,21	0,17	0,19
0,20 – 0,40	Média	1,68	1,70	1,69	3,10	2,00	1,99	14,21	13,71	14,57	0,06	0,05	0,06	0,14	0,14	0,14
	Mín.	1,53	1,61	1,55	2,14	1,79	1,70	5,15	9,87	11,37	0,03	0,03	0,02	0,12	0,11	0,08
	Máx.	1,78	1,80	1,87	3,75	2,24	2,29	19,76	17,43	17,39	0,11	0,08	0,10	0,16	0,16	0,16
	Medi.	1,70	1,70	1,69	3,11	1,98	2,04	14,70	13,79	15,06	0,06	0,06	0,06	0,14	0,14	0,14

ρ_d , densidade; R_p , resistência à penetração; P_{mac} , macroporosidade θ_{dis} , água disponível; C, camada do solo.

Para vários autores (Hillel, 2005; DÖRNER *et al.*, 2006; BRADY & WEIL, 2008; MORAES *et al.*, 2016; SORACCO *et al.*, 2018) essas alterações causadas pelo tráfego agrícola, resulta limitações nas propriedades hidráulicas, reduzindo o fluxo de água, inclusive para o funcionamento de aeração do solo, que terminam por refletir essa limitação no desenvolvimento radicular das planta.

A R_p também foi uma da propriedade do solo que apresentou mudanças após as colheitas da cana, principalmente na camada superficial do solo, pois os valores da R_p aumentaram de 1,65 para $\sim 3,2 \text{ MPa}$ (Tab. 6). Esse tipo de respostas também foi evidenciado por alguns autores (LOZANO *et al.*, 2013; SILVA *et al.*, 2018) coincidindo que o aumento esteve relacionado com o tráfego das máquinas agrícolas, por exemplo, Rodrigues, *et al.* (2015) afirmou que a camada superficial do solo é a mais susceptível às mudanças físicas, ocasionadas pelo tráfego de máquinas, como a colhedora, evidenciado com o aumento da R_p após, somente uma passada dessa máquina.

Para Otto *et al.* (2011) quando a R_p no solo é $>2,0 \text{ MPa}$ pode ser considerada de caráter restritivo para o crescimento radicular da cana-de-açúcar, e geralmente é atingida quando o tráfego agrícola aumenta a densidade do solo (arenosos) em valores $>1,78 \text{ g cm}^{-3}$. Embora para Leite, *et al.* (2020) a R_p é uma propriedade que está em função dos conteúdos de água, pois em solo com baixos conteúdos apresentam endurecimento característico do solo (solos coesos), e com consideráveis conteúdos de água, essa R_p diminui.

Embora, para o caso de CO do solo foi observada uma redução após as colheitas, produto da degradação dos adubos orgânicos aplicados, conforme afirmam Sousa Junior *et al.* (2018) e Cavalcanti *et al.* (2019), os resíduos de cana-de-açúcar apresentam alterações, aproximadamente, após 1 ano nos solos, pois depois das colheitas, os conteúdos de CO podem ser menores nas camadas superficial, mas após 2 anos de colheita, os conteúdos reverterem essa resposta e pode ser maior o ganho de CO na camada superficial (Tab. 6).

Para o caso da P_{mac} foram fortemente limitadas pelos sistemas de colheita da cana-de-açúcar, mostrando a variável bastante sensível aos efeitos dos sistemas de colheita, pois, com o preparo do solo e após o plantio os solos apresentaram P_{mac} bastante próximos aos valores de $0,10 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, embora após a colheitas, os valores foram bastante reduzidos ($\sim 0,03 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) na camada superficial (Tab. 6); e para o caso da camada subsuperficial, as respostas da P_{mac} foram mais estáveis, mantendo seus valores $\sim 0,06 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$.

Para Calonego *et al.* (2017) e Pires *et al.* (2017) os valores que favorecem o crescimento das plantas, alta infiltração e difusão do oxigênio, devem ser $P_{mac} > 0,10 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, pois, conforme outros autores (GEORGES, 1980, BAQUERO *et al.*, 2012, ARRUDA *et al.* 2016) P_{mac} baixas limitam ao crescimento radicular da cana e absorção de água.

Para o caso da θ_{DIS} , após as colheitas, foi mais estável com poucas mudanças observadas (Tab. 6) pois, inicialmente apresentou $0,21 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, e com o tráfego de máquinas para a colheita, os valores de θ_{DIS} , na camada superficial, reduziram para $\sim 0,18 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, e na subsuperficial, os valores estiveram mais estáveis, mesmo após as colheitas ($0,14 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$).

O resultado descritivo de falhas, considerando os diferentes parâmetros, e além de cada fase, após plantio (PL) e após a primeira colheita nos sistemas de colheita mecanizada (CMz) e semi-mecanizada (CSM) foram apresentados na Tabela 7. Em termos gerais, os parâmetros de avaliação de falhas estiveram dentro dos pressupostos de uma amostragem com características de normalidade.

Os resultados também evidenciaram alta variações entre as parcelas, com $CV > 0,50$ (Tab. 7), principalmente na quantidade de falhas encontradas nas parcelas, ou seja, todos os parâmetros que envolvem o número de falhas; isto significa que mesmo antes das colheitas, o processo do plantio apresentou irregularidade, gerando maior variação na ocorrência de falhas.

Embora, para o caso do tamanho médio das falhas F_{TM} , essas variações foram relativamente baixas <28% (Tab. 7), evidenciando que as falhas apresentaram tamanhos próximos, mesmo após cada fase cultural e após as colheitas, com os diferentes sistemas de colheita.

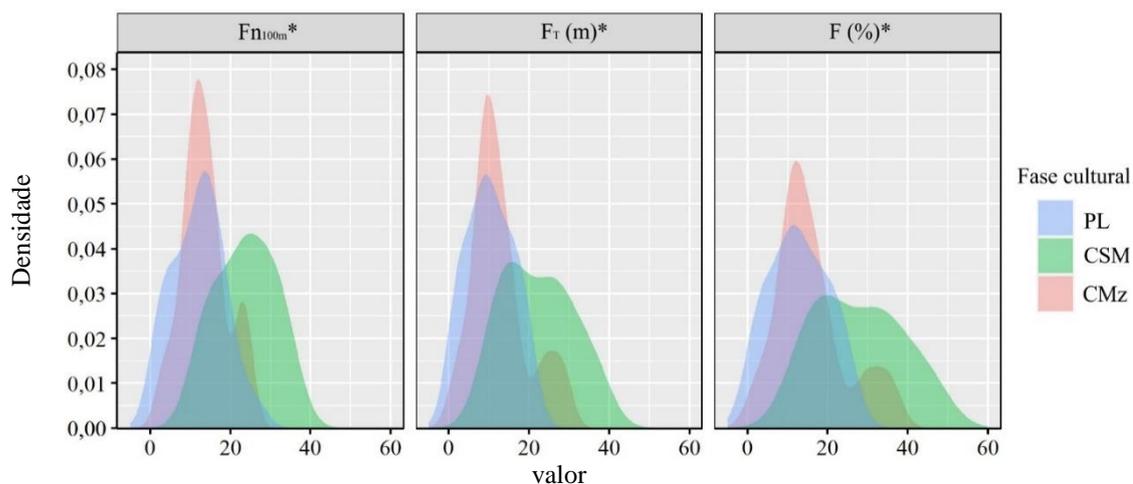
Tabela 7. Estatística descritiva e teste de normalidade para os diferentes parâmetros de quantificação de falhas de cana-de-açúcar, após Plantio (PL) e colheitas mecanizada (CMz) e semi-mecanizada (CSM).

Variável	Fase	Mín	Média	Mediana	Máx.	D.P.*	E.P*	CV*	S-W $\alpha>0,5$	p-valor
F_{n100m} *	PL	1,25	11,98	13,12	26,25	6,45	1,32	53,84	0,59	1,25
	CSM	12,50	23,75	23,75	35,00	7,37	2,13	31,03	0,75	12,50
	CMz	3,75	13,54	12,50	23,75	5,69	1,64	42,02	0,70	3,75
F_T (m)*	PL	1,17	10,26	9,31	20,80	5,85	1,19	57,02	0,34	1,17
	CSM	11,84	22,27	21,42	35,58	8,60	2,48	38,62	0,21	11,84
	CMz	2,36	12,75	10,88	28,21	7,22	2,08	56,63	0,28	2,36
F (%)	PL	1,46	12,83	11,64	26,00	7,31	1,49	56,98	0,34	1,46
	CSM	14,80	27,84	26,77	44,47	10,75	3,10	38,61	0,21	14,80
	CMz	2,95	15,94	13,59	35,26	9,03	2,61	56,65	0,28	2,95
F_{TM} (m)*	PL	0,72	1,07	1,00	1,66	0,29	0,06	27,10	0,05	0,72
	CSM	0,91	1,16	1,10	1,50	0,21	0,06	18,10	0,05	0,91
	CMz	0,79	1,12	1,09	1,48	0,23	0,07	20,54	0,43	0,79

– p-valor >0,05 apresentam normalidade –

* F_n , número de falhas; F_T , falha total; F_{n100m} , número de falhas em 100 m; F_{TM} , tamanho médio de falha; D.P., desvio padrão; E.P., erro padrão; CV, coeficiente de variação; S-W $\alpha>0,05$, teste *Shapiro-Wilk*.

Na Figura 5 foram apresentadas a distribuições F_{n100m} , F_{TM} e F, pode observado que após plantio (PL) e na colheita mecanizada (CMz) o F_{n100m} apresentou a maior concentração de dados para 15 falhas em 100 m, para o caso da colheita semi-mecanizada (CSM), essa concentração diminui, mas apresentou uma deslocação positiva, evidenciando concentração de dados 25 falhas em 100 m.



* F_{n100m} , número de falhas em 100 m; F_T , falha total; F, porcentagem de falhas.

Figura 5. Distribuição dos parâmetros de falhas de cana-de-açúcar após Plantio (PL), colheita mecanizada (CMz) e semi-mecanizada (CSM).

Segundo Montibeller *et al.* (2017) as perdas produtivas pela ocorrência de falhas após o plantio podem provocar perdas iniciais de até $\sim 4,0 \text{ t ha}^{-1}$, e segundo Braunack *et al.* (2006) após a primeira colheita, as produtividades de cana apresentaram uma redução significativa, devido ao tráfego direto sobre os colmos de cana, e ainda, podem ser observadas diferenças mais claras, quando são utilizadas máquinas diferentes, que para esses casos, observaram maior número de falhas, e conseqüente maior perda produtiva, quando usaram máquinas de colheita convencional.

Para o tamanho total de falhas (F_T) após plantio e colheita mecanizada, apresentaram as maiores densidades de dados nas medidas de 10 m de falha total, mas também, observa-se um segundo pico na CMz que evidencia F_T entre 20 e 25 m (Fig. 5). Para o caso da CMS, a F_T apresentou uma distribuição de dados mais ampla, e concentração de dados mais distribuídos, ou seja, o tamanho total de falhas entre ~ 15 e 25 m (Fig. 5).

Para o caso da porcentagem de falhas (Fig. 5) o PL apresentou uma faixa de valores entre 0 e 30%, com maior concentração em $\sim 15\%$ falhas, da mesma maneira foi observado na CMz, mas com uma concentração mais pronunciada em 15% de falhas, e para o caso da CSM, a faixa de valores foi deslocada para a direita, com porcentagem de falhas entre 10 e 50% e com maior concentração de dados na porcentagem entre 20 e 35% (Fig. 5).

Tabela 8. Teste de t entre as diferentes variáveis de falhas de cana-de-açúcar após Plantio (PL) e colheitas mecanizada (CMz) e semi-mecanizada (CSM).

Var.	Grupo 1	Grupo 2	Média (1)	Média (2)	DM*	t	gl	p-valor	
F_{n100m}^*	CMz	CSM	13,54	23,75	-10,21	-3,58	16	0,003	*
	CMz	PL	13,54	11,98	1,56	0,71	34	0,482	n.s.
	CSM	PL	23,75	11,98	11,77	4,14	14	0,001	**
F_T (m)*	CMz	CSM	12,75	22,27	-9,52	-3,18	22	0,004	*
	CMz	PL	12,75	10,26	2,49	1,11	34	0,274	n.s.
	CSM	PL	22,27	10,26	12,01	4,41	15	0,001	**
F (%)*	CMz	CSM	15,94	27,84	-11,9	-3,18	22	0,004	*
	CMz	PL	15,94	12,83	3,11	1,11	34	0,274	n.s.
	CSM	PL	27,84	12,83	15,01	4,41	15	0,001	**
F_{TM} (m)*	CMz	CSM	1,12	1,16	-0,04	-0,05	22	0,962	n.s.
	CMz	PL	1,12	1,07	0,05	0,50	34	0,621	n.s.
	CSM	PL	1,16	1,07	0,09	0,57	34	0,575	n.s.

– p-valor, Cod. Signif.: 0 ****; 0,001; *** 0,01; ** 0,0; n.s. 'não significativo'–

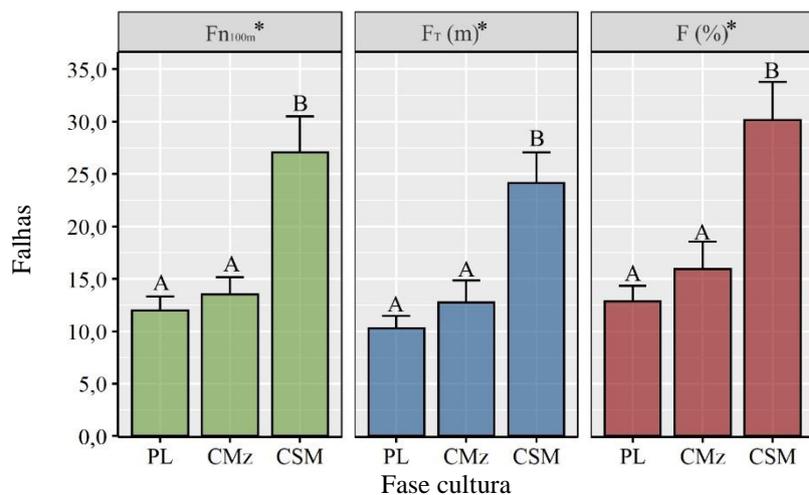
* F_n , número de falhas; F_T , falha total; F_{n100m} , número de falhas em 100 m; F_{TM} , tamanho médio de falha; DM, deferência de médias

Na Tabela 8 foram apresentados os resultados do teste de t para cada um dos parâmetros das falhas de cana-de-açúcar, sendo evidente que não existiu diferenças significativas para o tamanho médio das falhas (F_{TM}) entre as fases após plantio e pós

colheita, nem entre os efeitos dos sistemas de colheitas, sendo que nas três fases o tamanho médio foi de ~1,15 m.

Embora, para os outros parâmetros de falhas de cana-de-açúcar (F_{n100m} , F_T , e F), diferenças altamente significativas foram evidentes, principalmente entre as fases PL e após a colheita com o sistema de CMS; para o caso da CMz não foram observadas diferenças significativas com o PL, sugerindo que após a primeira colheita, o sistema mecanizado de colheita não causou mudanças significativas às falhas registradas no plantio (Tab. 8). Embora, o teste mostrou evidentes diferenças significativas para os parâmetros de falhas, entre os diferentes sistemas de colheita (CMz e CSM).

Na Figura 6 foram apresentadas as diferenças de médias de F_{n100m} e F_T e F , sendo evidente que com a colheita de cana-de-açúcar com o sistema CSM, o número de falhas aumentou significativamente, em comparação com as observadas antes das colheitas em PL e com o sistema CMz. Após o plantio, o número foi de ~12 falhas a cada 100 m de linha de cana, e com o sistema de colheita CMz as falhas apresentaram um aumento para ~14 falhas, mas com o sistema CSM, foram incrementadas para ~23 falhas (Fig. 6).



Letras diferente indicam diferenças estatísticas

* F_{n100m} ; número de falhas em 100 m; F_T , falha total; F , porcentagem de falhas

Figura 6. Comparação de médias pelo teste de Tukey do número de falhas em 100 m, falha total e porcentagem de falhas de cana-de-açúcar após Plantio (PL) e colheitas mecanizada (CMz) e semi-mecanizada (CSM).

Para Martins *et al.* (2017) independentemente do sistema de colheita utilizado, as falhas ocasionadas representam uma perda produtiva importante, e com o atual sistema colheita mecanizada, essas perdas podem continuar e ser ainda maiores, pois essas máquinas trabalham com velocidade mais altas do que nos sistemas de corte manual. Embora, os resultados nesta pesquisa evidenciaram que, após as colheitas de cana, o

número de falhas foi o parâmetro que apresentou as mudanças, principalmente com aumento no sistema de colheita semi-mecanizado.

As práticas de colheitas com o sistema CSM que incluiu o corte manual e para o transporte e carregamento, máquinas convencionais (Fig. 2C) favoreceram esse aumento do número de falhas, possivelmente pelo tráfego direto sobre as linhas de cana-de-açúcar; por sua vez, o sistema de CMz, mesmo usando máquinas mais robusta (Fig. 2B), o tráfego dessas máquinas foi mais ajustado ao desenho de plantio, evitando danos diretos sobre a linha de cana, mantendo a ocorrência de falhas semelhantes às observadas após PL (Fig. 6).

Para o caso da F_T (Fig. 6) após PL e CMz apresentaram em médias os menores tamanhos e sem apresentar diferenças entre as médias, com tamanho de ~ 11 m, e para o caso do sistema de CSM, diferenças estatísticas foram observadas com PL e CMz, apresentando a maior F_T , ~ 22 m; significa que, o tamanho de falha aumento 12 m, com o sistema CSM e vale destacar que, esse incremento foi causado pelo aumento no número de falhas e não por mudança na medida de falhas.

Para Stolf *et al.* (2016) quando o número de falhas em 100 m varia entre 21 e 27, o tamanho médio da falha deve ser próximo a 0,73 m para uma linha de cana bem regular, mas para este estudo, o tamanho médio foi $\sim 1,0$ m, pois as falhas observadas foram resultado das práticas de colheita que ocasionaram tamanho irregulares entre as falhas.

Em termos relativos, na Figura 6, observou-se que com o sistema CSM a falha nas linhas de plantio foi de $\sim 27\%$, ou seja, apresentou um incremento de $\sim 15\%$ com respeito às falhas observada após plantio (PL) e 12% com o sistema CMz; por sua vez, comparando as falhas de PL e CMz, esses resultados não evidenciaram diferença estatísticas, mas observa-se um aumento $\sim 3\%$ com esse sistema de colheita.

Para Manhães *et al.* (2018) após a colheita de cana, 45% do colmos de cana cortados permanecem ilesos, ou sejam, a colheita de cana-de-açúcar causa, principalmente, danos diretos ou visíveis nos colmos, resultando em rachadura dos colmos, esmagamento de colmos mal cortados, e inclusiva ataque por patógenos, que inabilitem a rebrota da cana, causando elevada ocorrência das falhas de cana.

Segundo Molin *et al.* (2016) além do tráfego e a compactação do solo e danos diretos na cana, a ocorrência de falhas também está relacionada com qualidade do corte que envolve o formato da lamina ângulo e altura, velocidade do corte e colheita, que ajudam na redução dessa ocorrência de falhas.

Significa que, possivelmente outra das causas do aumento de porcentagem de falhas, além dos danos diretos e compactação do solo pelo tráfego de máquinas, após a colheita de cana, pode estar relacionado com a qualidade do corte, sendo assim, o corte da cana-de-açúcar no sistema CSM foi realizado de forma manual, aumentando os riscos de danos nos colmos de cana, devido à irregularidade do corte da cana.

Na Tabela 9 foram apresentados os resultados de qualidade física do solo (IQFS), após o plantio da cana e após as colheitas com os diferentes sistemas (CMz e CSM). Os resultados evidenciaram uma distribuição normal e com médias que oscilaram entre 0,39 e 0,89 para a camada superficial do solo, e para o caso da camada subsuperficial os IQFS estiveram entre 0,39 e 0,62.

Em termos de variações, as respostas dos IFQS apresentaram CV <30%, considerados de média a baixa variabilidade (Tab. 9), com valores de IQFS que variaram, na camada superficial, entre 0,21 e 0,97, na camada subsuperficial, entre 0,23 e 0,68.

Na Tabela 10 o teste de T, evidenciando que as médias dos IQFS apresentaram diferenças significativas entre as diferentes fases culturais (PL, CSM e CMz), ou seja, a qualidade física do solo, tanto na camada superficial como na subsuperficial, apresentou mudanças nas respostas físicas do solo após colheita da cana-de-açúcar, e entre os diferentes sistemas de colheita, e nas diferentes camadas avaliadas.

Na Figura 7 foi apresentada a comparação de médias dos IQFS do solo, nas diferentes camadas do solo e diferentes fases culturais da cana-de-açúcar, e para os sistemas de colheita mecanizado (MCz) e semi-mecanizado (CSM).

Tabela 9. Estatística descritiva e Teste de Shapiro-Wilk para os índices físicos de qualidade (IQFS) em duas camadas de um Argissolo com cana-de-açúcar após Plantio (PL) e colheitas mecanizada (CMz) e semi-mecanizada (CSM).

Prof. (m)	Variável	Média	Mín	Máx	Mediana	D,P,*	E,P*,	CV (%)*	S-W $\alpha>0,05$ *	p-valor
0-0,20	PL	0,89	0,79	0,97	0,90	0,05	0,01	5,15	0,50	
	CSM IQFS	0,39	0,21	0,54	0,40	0,11	0,03	28,85	0,41	
	CMz	0,53	0,42	0,75	0,48	0,11	0,03	20,21	0,05	
0,20-0,40	PL	0,62	0,41	0,82	0,60	0,12	0,02	19,56	0,10	
	CSM IQFS	0,39	0,23	0,53	0,37	0,10	0,02	24,94	0,30	
	CMz	0,54	0,40	0,68	0,55	0,08	0,02	15,32	0,84	

*D,P., desvio padrão; E.P., erro padrão; CV, coeficiente de variação; S-W $\alpha>0,05$, teste de normalidade *Shapiro-Wilk*.

A partir da comparação das médias, ficaram evidentes as diferenças entre o PL, CSM e CMz de cana-de-açúcar; na camada superficial (0-0,20 m) após PL, o solo apresentou o melhor IQFS (~0,90), mostrando diferenças estatísticas com a qualidade após as colheitas, com os diferentes sistemas CMz e CSM (Fig. 7). A segunda melhor qualidade

do solo foi observada após a colheita da cana com o sistema CMz (IQFS ~0,50), evidenciando diferenças estatísticas com a qualidade do solo da área colheita com o CSM, que apresentou a mais baixa qualidade (IQFS <0,40).

Tabela 10. Teste de t para os índices de qualidade física do solo (IQFS) em duas camadas de um Argissolo cultivado com cana-de-açúcar após Plantio (PL) e colheitas mecanizada (CMz) e semi-mecanizada (CSM).

Prof. (m)	Var.	Grupo 1	Grupo 2	Média (1)	Média (2)	DM*	t	gl	P-valor	
0-0,20	IQFS	CMz	CSM	0,53	0,39	0,15	3,27	22	0,004	*
		CMz	PL	0,53	0,89	-0,36	-11,04	13	0,001<	**
		CSM	PL	0,39	0,89	-0,50	-15,04	13	0,001<	**
0,20-0,40	IQFS	CMz	CSM	0,54	0,39	0,15	4,09	22	0,001<	**
		CMz	PL	0,54	0,62	-0,08	-2,09	34	0,044	*
		CSM	PL	0,39	0,62	-0,23	-5,75	34	0,001<	**

– p-valor, Cod. Signif.: 0 ****; 0,001; *** 0,01; * 0,05 –
n°, número de parcelas; DM, diferença de médias

Significa que, as duas fases da cultura de cana, após plantio e após colheita, apresentaram diferente qualidade do solo, e além disso, também se observa diferenças da qualidade do solo com os diferentes sistemas de colheita, ou seja, a qualidade física do solo foi reduzida após a primeira colheita de cana e principalmente quando foi realizada com o sistema CSM.

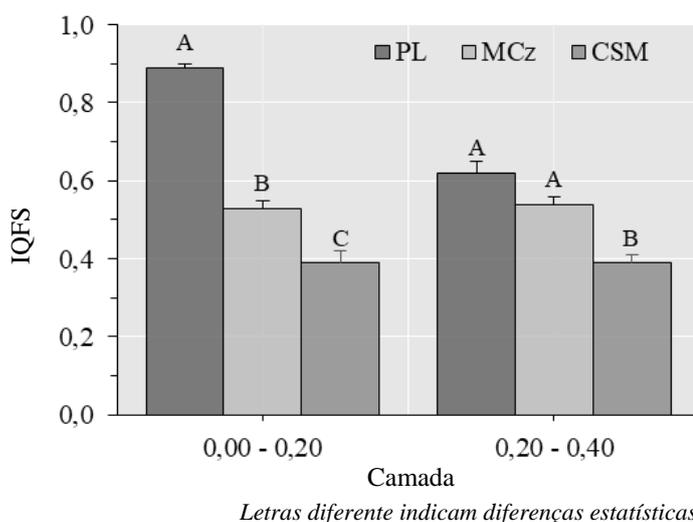


Figura 7. Comparação de médias pelo teste de Tukey entre os índices de qualidade física do solo (IQFS) em duas camadas de um Argissolo, cultivado com cana-de-açúcar, em diferentes fases da cultura.

Segundo Esteban *et al.* (2019) e Guimarães Júnnyor *et al.* (2019) o sistemas de colheita de cana-de-açúcar utilizam máquinas com pesos de até 20 t, como as colhedoras ou reboques, que podem aumentar o risco de compactação do solo, pois quando trafegam, podem afetar principalmente as propriedades físicas da camadas superficial do solo, ocasionando limitações na qualidade do solo e no desenvolvimento da cultura.

Entre as principais alterações físicas do solo, pelo tráfego de máquinas agrícolas, segundo de Lima *et al.* (2017) e Naderi-Boldaji *et al.* (2018) está o aumento da densidade e resistência à penetração do solo, de acordo como também foi observado neste estudo (Tab. 9).

Para o caso da camada subsuperficial, a comparação de média (Fig. 7) evidenciou diferenças estatísticas, entre as fases culturas da qualidade do solo, ou seja, após plantio (PL) apresentou novamente a melhor qualidade (IQFS $\sim 0,65$) e com semelhanças estatísticas com a qualidade após a colheita com o sistema CMz, que apresentou IQFS $\sim 0,60$, mas para o caso da área colhida com o sistema CMS, esse mostra diferenças estatísticas com PL e CMz, pois apresentou a média com a pior qualidade dos IQFS na camada sub superficial (IQFS $< 0,40$).

Segundo os resultados dos IQFS (Fig. 7) pode ser observado que o processo de preparo do solo foi efetivo na camada superficial, pois, após o plantio, o IQFS atingiu valores $\sim 0,90$; em comparação com a camada subsuperficial, a qualidade esteve $\sim 0,60$, e da mesma maneira, após o tráfego das máquinas na colheita, seja mecanizada ou semi-mecanizada, a qualidade do solo foi mais alta na camada subsuperficial do que a camada superficial e pode ser destacado que a maior redução no IQFS aconteceu após a colheita da cana com o sistema CSM.

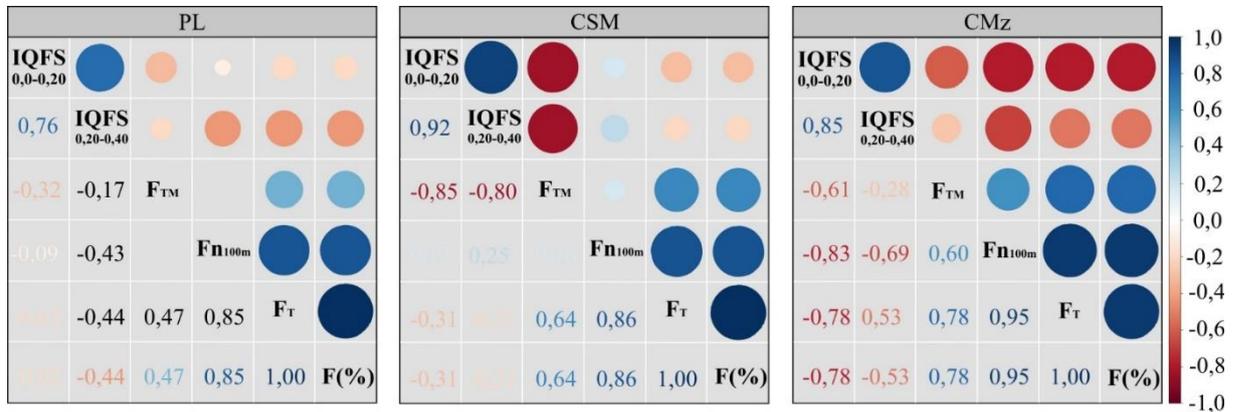
Contudo, o tráfego de máquinas no processo da colheita da cana-de-açúcar reduzem as rebrotas da cana, evidenciadas no aumento do número de falhas de cana, principalmente quando se utiliza o sistema de colheita semi-mecanizado, mas também, esse sistema prejudicou a qualidade do solo, podendo limitar, não só diretamente o crescimento da planta, pelo pisoteio direto, como também, indiretamente pela compactação e alterações física do solo, que possivelmente impediram o crescimento.

Assim, Stolf (2015) afirmou que a redução da produtividade em um plantio mecanizado estaria associada, por exemplo, uma parte, com as falhas ocasionadas pela compactação do solo causada pelo tráfego das máquinas, e a outra parte, ocasionadas por danos diretos pelo pisoteio da cana.

As correlações, Figura 8, entre o IQFS das duas camadas do solo, e os valores dos parâmetros de falha da cana-de-açúcar, foram negativas, significa que quanto mais alta qualidade do solo, menor ocorrência de falhas, ou seja, a qualidade física do solo e os parâmetros das falhas responderam de maneira inversa.

A cada fase da cultura, após plantio (PL) ou após as colheitas da cana, seja com o sistema de colheita semi-mecanizado ou mecanizado, as correlações

apresentaram respostas diferentes; após o plantio, a qualidade física do solo foi alta nas duas áreas e com baixa ocorrência das falhas, mostrando baixa correlação nessa fase, ou seja, as falhas de cana presente em PL não tiveram relação com as práticas de preparo do solo (Fig. 8).



PL: Pós Plantio; CSM: sistema de colheita mecanizada; CMz: Colheita mecanizada; IQFS: índice de qualidade física do solo (superficial e subsuperficial); F_{TM}: tamanho médio de falha; F_{n100m}: número de falhas em 100 m; F_T: falha total; F(%): porcentagem de falhas.

Figura 8. Correlação entre os índices de qualidade físicos (IQFS) das camadas de um Argisolo e os parâmetros de quantificações de falhas de cana-de-açúcar nas diferentes fases da cultura.

Após as colheitas, as correlações entre o IQFS e os parâmetros das falhas de cana-de-açúcar aumentaram as os valores de correlação, tanto na área com colheita semi-mecanizada (CSM) e mecanizada (CMz); na área com o sistema (CSM) apresentou correção negativa (<0,80) com os IQFS da camada superficial e subsuperficial, e com o tamanho médio de falha (F_{TM}) (Fig. 8) sugerindo que com a diminuição do IQFS, nas duas camadas do solo, após a colheita semi-mecanizada, o F_{TM} tende de aumentar, seja com os danos diretos sobre os colmos da cana e pela diminuição da qualidade física do solo.

Segundo Braunack *et al.* (2006) a compactação superficial do solo está relacionada com as alterações das propriedades físicas do solo, resultado do tráfego de máquinas agrícolas, que tornam a compactação como um dos principais fatores que limitam a germinação e surgimento dos brotos pequenos da cana-de-açúcar, mas também, é evidente que os danos ocasionados pelo pisoteio com as máquinas de colheita reduzem essas brotações da cana.

Para o caso da área colhida com o sistema CMz, os parâmetros de falhas apresentaram também correlação com os IQFS, embora o parâmetro de número de falhas (F_{n100m}) apresentou correlação negativa -0,83, significa que com o sistema de colheita e a diminuição do IQFS da camada superficial, o número de falhas tenderam aumentar

(Fig. 8). Segundo Stolf (2015) quando o número de falhas aumenta, o tamanho de falhas são relativamente pequenas, sugerindo que essas respostas envolvem danos pontuais e não generalizado nos colmos de cana.

No estudo de Blarir e Stirling (2007) consideraram que a perda de produtividade de um sistema de cana-de-açúcar, está relacionada com o envelhecimento do solo, que este por sua vez está relacionada com a perda de qualidade do solo, causada pelo uso contínuo das mesmas práticas e o inadequado uso das máquinas agrícolas

Segundo Luna e Lobo (2016) para evitar uma queda acentuada na produtividade, nas áreas de cana-de-açúcar é precioso corrigir as falhas, e portanto os estudos de identificação de falhas são fundamentais, não só para avaliar a qualidade do plantio, senão também, monitorar e avaliar os efeitos e eficiências das práticas agrícolas que envolvem o tráfego de máquinas, com os sistema de colheita..

As falhas de cana-de-açúcar não só têm sua origem nos danos físicos diretos causados pelo pisoteio com o tráfego de máquinas agrícolas durante as colheitas, senão também pelos danos indiretos, ocasionado, por exemplo, pela perda de qualidade física do solo e pela compactação gerada no solo após as colheitas, pois isto resulta em formação de camadas endurecidas e sem condições físicas do solo, favoráveis para o crescimento radicular das plantas

O monitoramento da ocorrência de falhas, utilizando novas tecnologias, como a captura de imagem da cana-de-açúcar via drone, e em conjunto com estudos de qualidade física do solo, não só permitiram avaliar o estado do canavial e analisar a ocorrência de falhas, senão também foi possível comparar a performance entre os sistemas semi-mecanizado e mecanizado, para a colheita da cana-de-açúcar, em relação aos efeitos na compactação e qualidade do solo.

4. Conclusões

A obtenção de imagens RGB, via drone, foi uma alternativa altamente viável para a avaliação de falhas de cana-de-açúcar, permitindo quantificar, medir e comparar suas respostas sub diferentes manejos agrícolas de cana.

A ocorrência de falhas de cana-de-açúcar aumentou tanto em número, tamanho e porcentagem, após as colheitas de cana-de-açúcar, sendo evidente que o sistema de colheita semi-mecanizado, que inclui o corte manual, favoreceu o maior aumento dessas ocorrências, e com o sistema mecanizado, não houveram diferenças significativas com a ocorrência de falhas observadas após plantio.

Com índice de qualidade física do solo foi evidente observar alterações causadas pelo tráfego do sistema de colheitas, sendo a maior redução dessa qualidade com o sistema de colheita semi-mecanizado, e com respostas mais favoráveis após a colheita com o sistema mecanizado de cana-de-açúcar.

A camada superficial do solo foi altamente susceptível à redução da qualidade física do solo após o tráfego de máquinas agrícolas para a colheita de cana-de-açúcar, evidenciando aumento da densidade do solo, resistência à penetração do solo, e redução da água disponível e porosidade do solo.

A diminuição da qualidade do solo pelo tráfego das máquinas colhedoras apresentou correlação negativa considerável com a ocorrência de falhas, pois, com a diminuição dessa qualidade, aumentou o número de falhas e a porcentagem de falhas de cana-de-açúcar.

Bibliografia

- ABNT, NBR. NBR 7182: solo—ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1986.
- Arruda, E. M.; Almeida, R. F.; Domingues, L. A.; *et al.* (2016). Soil porosity and density in sugarcane cultivation under different tillage systems. *African Journal of Agricultural Research*, v. 11, p. 2689–2696.
- Baquero, J. E.; Ralisch, R.; Medina, C.; Tavares Filho, J.; *et al.* (2012). Soil physical properties and sugarcane root growth in a Red Oxisol. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 36, p. 63–70.
- Bastos, K. J.; Landell, M. G.; Miranda, E. D. (2016) Influência da produtividade da cana-de-açúcar no custo do corte mecanizado. *Revista iPecege*, v. 2, p. 42-59.
- Benedini, M. S.; Silva, A. L. (2010). Perdas de cana na colheita mecanizada. *Canavieiros: a força que movimenta o setor*. Sertãozinho, v. 5, p. 28-31.
- Blarir, B. L.; Stirling, G. R. (2007). The role of plant-parasitic nematodes in reducing yield of sugarcane in fine-textured soils in Queensland, Australia. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, v. 47, p. 620–634.
- Brady, N. C.; Weil, R. R.; Weil, R. R. (2008). *The nature and properties of soils*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Braunack, M. V.; Arvidsson, J.; Håkansson, I. (2006). Effect of harvest traffic position on soil conditions and sugarcane (*Saccharum officinarum*) response to environmental conditions in Queensland, Australia. *Soil & Tillage Research*, v. 89, p. 103–121.
- Busscher, W. J.; Bauer, P. J.; Camp, C. R. *et al.* (1997). Correction of cone index for soil water content differences in a coastal plain soil. *Soil & Tillage Research*, v. 43, p. 205-217.
- Calonego, J. C.; Raphael, J. P.; Rigon, J. P.; *et al.* (2017). Soil compaction management and soybean yields with cover crops under no-till and occasional chiseling. *European Journal of Agronomy*, v. 85, p. 31–37.

- Capaz, R. S.; Carvalho, V. S.; Nogueira, L. A. (2013). Impact of mechanization and previous burning reduction on GHG emissions of sugarcane harvesting operations in Brazil. *Applied Energy*, v. 102, p. 220–228.
- Cavalcanti, R. Q.; Rolim, M. M.; De Lima, R. P.; *et al.* (2019). Soil physical and mechanical attributes in response to successive harvests under sugarcane cultivation in Northeastern Brazil. *Soil & Tillage Research*, v. 189, n. 140–147.
- de Lima, R. P.; da Silva, A. P.; Giarola, N. F.; da Silva, A. R. *et al.* (2017). Changes in soil compaction indicators in response to agricultural field traffic. *Biosystems Engineering*, v. 162, p. 1-10.
- de Sousa, A. C.; Farhate, C. V.; de Souza, Z. M.; *et al.* (2019). Soil load-bearing capacity and development of root system in area under sugarcane with traffic control in Brazil. *Sugar Tech*, v. 21, p. 153–161.
- Dexter, A R. (2004). Soil physical quality Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma*, v. 120, p. 201–214.
- do Prado, E. A.; Vitorino, A. C.; Garcia, R. A.; *et al.* (2019). Structural quality of an Oxisol under conventional soil tillage and predecessor crops in sugarcane rotation. *Sugar Tech*, v. 21, p. 93–103.
- Dörner, J.; Sandoval, P.; Dec, D. (2006). The role of soil structure on the pore. *J. Soil Sci. Plant Nutr*, v. 4, p. 495–508.
- dos Santos, H. G.; Jacomine, P. T.; dos Anjos, L. H.; de Oliveira, V. A.; *et al.* (2018). Brazilian soil classification system. *Embrapa Solos-Livro técnico (INFOTECA-E)*.
- Esteban, D. A.; de Souza, Z. M.; da Silva, R. B.; *et al.* (2020). Impact of permanent traffic lanes on the soil physical and mechanical properties in mechanized sugarcane fields with the use of automatic steering. *Geoderma*, v. 362, p. 114097.
- Esteban, D. A.; de Souza, Z. M.; Tormena, C. A.; *et al.* (2019). Soil compaction, root system and productivity of sugarcane under different row spacing and controlled traffic at harvest. *Soil & Tillage Research*, v. 187, p. 60–71.
- Georges, J. E. W. (1980). Effects of harvest traffic and soil water content on soil compaction and regrowth of sugarcane. *Agricultural Engineer*, v. 17, p. 1079–1088.
- Guimarães Júnnyor, W.; Diserens, E.; de Maria, I. C.; *et al.* (2019). Prediction of soil stresses and compaction due to agricultural machines in sugarcane cultivation systems with and without crop rotation. *Science of the Total Environment*, v. 681, p. 424–434.
- Hillel, D.; Hatfield, J. L. (2005). *Encyclopedia of Soils in the Environment* (v. 3). Amsterdam: Elsevier.
- Karlen, D. L.; Ditzler, C. A.; Andrews, S. S. (2003). Soil quality: Why and how? *Geoderma*, v. 114, p. 145–156.
- Leite, E. S.; Santos, J. S.; Gomes, B. M. *et al.* (2020). Compactação do solo causada pelo harvester e intensidade de tráfego do forwarder na colheita florestal. *Scientia Forestalis*, v. 48 p.126.
- Lozano, N.; Rolim, M.M.; Oliveira, V.S.; *et al.* (2013). Evaluation of soil compaction by modeling field vehicle traffic with SoilFlex during sugarcane harvest. *Soil & Tillage Research*, v.129, p. 61–68.

- Luna, I.; Lobo, A. (2016). Mapping crop planting quality in sugarcane from UAV imagery: A pilot study in Nicaragua. *Remote Sensing*, v. 8, p. 1–18.
- Ma, S.; Karkee, M.; Scharf, P. A.; *et al.* (2014). Sugarcane harvester technology: A critical overview. *Applied Engineering in Agriculture*, v. 30, p. 727–739.
- Manhães, C. M.; Francelino, F. M.; Araújo, R. A.; *et al.* (2018). Visible Losses to the Mechanical Harvesting of Ratoon Sugarcane Using the Harvester John Deere 3520. *American Journal of Analytical Chemistry*, v. 09, p. 580–590.
- Manhães, C. M.; Garcia, R. F.; Francelino, F. M. *et al.* (2015). Factors that affect sprouting and tillering of sugar cane. *Revista Vértices*, v. 17, p. 163–181.
- Martins, M. B.; Testa, J. V.; Drudi, F. S.; *et al.* (2017). Losses in the mechanized harvest of sugarcane as a function of working speed and rotation of the primary extractor. *Científica*, v. 45, p. 218-222
- Menta, C.; Conti, F. D.; Pinto, S.; *et al.* (2018). Soil Biological Quality index (QBS-ar): 15 years of application at global scale. *Ecological Indicators*, v. 85, p. 773–780.
- Molin, J. P.; Veiga, J. P (2016). Spatial variability of sugarcane row gaps: measurement and mapping. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 40, p. 347–355.
- Montibeller, B.; Silveira, H. L.; Sanches, I. D.; *et al.* (2017). Identification of gaps in sugarcane plantations using UAV images. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 18, 2017, Santos. Anais... São José dos Campos: Inpe, 2017. p. 1169-1176.
- Moraes, M.; Debiasi, H.; Carlesso, R.; *et al.* (2016). Soil physical quality on tillage and cropping systems after two decades in the subtropical region of Brazil. *Soil & Tillage Research*, v. 155, p. 351–362.
- Naderi-Boldaji, M.; Kazemzadeh, A.; Hemmat, A. *et al.* (2018). Changes in soil stress during repeated wheeling: A comparison of measured and simulated values. *Soil Research*, v. 56, n. 2, p. 204-214.
- Otto, R.; Silva, A. P.; Franco, H. C.; *et al.* (2011). High soil penetration resistance reduces sugarcane root system development. *Soil & Tillage Research*, v. 117, p. 201–210.
- Pires, L. F.; Borges, J. A.; Rosa, J. A.; *et al.* (2017). Soil structure changes induced by tillage systems. *Soil & Tillage Research*, v. 165, p. 66 – 79.
- Rodrigues, C. K.; Lopes, E. S.; Müller, M. M. *et al.* (2015). Variabilidade espacial da compactação de um solo submetido ao tráfego de harvester e forwarder. *Scientia Floretalis*, v.43, p. 387-394.
- Saha, R.; Paswan, A.; Majumdar, B.; *et al.* (2018). Soil quality under tillage and residue management in jute (*Corchorus spp.*) based cropping systems of indo-gangetic plains. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, v. 7, p. 133–140.
- Silva, A. J.; Cabeda, M. S.; Carvalho, F. G. (2006). Matéria orgânica e propriedades físicas de um Argissolo Amarelo Coeso sob sistemas de manejo com cana-de-açúcar. *Rev. bras. Eng. Agríc. Ambient*, p. 579-585.
- Silva, R. P.; Rolim, M. M.; Gomes, I. F.; *et al.* (2018). Numerical modeling of soil compaction in a sugarcane crop using the finite element method. *Soil & Tillage Research*, v. 181, p. 1–10.

- Soil Survey Staff (2014). Keys to soil taxonomy: Twelfth Edition. *Washington, DC, USA*. 372p.
- Soracco, C. G.; Lozano, L. A.; Villarreal, R.; *et al.* (2018). Temporal variation of soil physical quality under conventional and no-till systems. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 42, p. 1–12.
- Sousa Junior, J. G.; Cherubin, M. R.; Oliveira, B. G.; *et al.* (2018). Three-year soil carbon and nitrogen responses to sugarcane straw management. *Bioenergy Research*, v. 11, p. 249–261.
- Souza, C. H.; Lamparelli, R. A.; Rocha, J. V.; *et al.* (2017). Mapping skips in sugarcane fields using object-based analysis of unmanned aerial vehicle (UAV) images. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 143, 2016, p. 49–56.
- Stolf, R. (2015). Metodologia de avaliação de falhas nas linhas de cana-de-açúcar. *STAB*, v. 4, p. 44–53.
- Stolf, R.; Garcia, T. B.; Neris, L.; *et al.* (2016) Avaliação de falhas em cana-de-açúcar segundo o método de stolf utilizando imagens aéreas de alta precisão obtidas por Vant. *Tecnologia | Pesquisa*, v. 34, p. 32–39.
- Streck, C. A.; Reinert, D. J.; Reichert, J. M.; *et al.* (2004). Modificações em propriedades físicas com a compactação do solo causada pelo tráfego induzido de um trator em plantio direto. *Ciência Rural*, v. 34, p. 755-760.
- Teixeira, P. C.; Donagemma, G. K.; Fontana, A.; *et al.* (2017) Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro, v. 4.
- Vischi Filho, O. J.; de Souza, Z. M.; da Silva, R. B., *et al.* (2015). Capacidade de suporte de carga de Latossolo Vermelho cultivado com cana-de-açúcar e efeitos da mecanização no solo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 50, p. 322-332.
- Vischi Filho, O. J.; de Souza, Z. M.; de Souza, G. S.; *et al.* (2017). Physical attributes and limiting water range as soil quality indicators after mechanical harvesting of sugarcane. *Australian Journal of Crop Science*, v. 11, p. 169–176.
- Warrick, A. W.; Nielsen, D. R. (1980). Spatial variability of soil physical properties in the field. *Application of soil physics*. p. 319-344.
- Yeomans, J. C.; Bremner, J. M. (1988). A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. *Communications in soil science and plant analysis*, v. 19, p. 1467-1476.

- CAPÍTULO IV -

Multifractalidade da resistência à penetração e conteúdo de água de um Argissolo
sob um sistema de cana-de-açúcar semi-mecanizado

Multifractalidade da resistência à penetração e conteúdo de água de um Argissolo sob um sistema de cana-de-açúcar semi-mecanizado

RESUMO: A compactação do solo no plantio de cana-de-açúcar vem sendo um problema recorrentes no estudo de solo. Para sua avaliação, geralmente é realizada medição da resistência à penetração e com interação do conteúdo de água presente no solo. Embora pela própria natureza do solo e pela variabilidade da água, existe alta heterogeneidade nas respostas da compactação, que somados outros fatores de variação, como as mudanças espaciais e temporárias, causadas pelo preparo do solo e o uso de máquinas agrícolas, dificultam seu entendimento, mesmo utilizando ferramentas estatísticas ou geoestatísticas. Então como alternativa, surge a utilização de técnicas implícitas a essas heterogeneidades do solo, como as análises Multifractais que consideram as variações escalares. Diante disso, foi objetivado avaliar a Multifractalidade e variações estatísticas da resistência à penetração e o conteúdo de água em dois transectos (entrelinha e linha) de um Argissolo antes e após a colheita semi-mecanizada da cana-de-açúcar. O estudo foi feito no município de Igarassu, PE, Brasil. Em uma área de cana-de-açúcar semi-mecanizada foram estudados dois transectos de ~100 m, com 64 pontos amostrais, colocados, um na zona trafegável e, paralelamente, o outro na zona não trafegável. As avaliações estatísticas e multifractais da resistência à penetração e do conteúdo de água no solo foram realizadas considerando dois transectos, três profundidades do solo e duas fases, antes e após a colheita. Estatisticamente foram detectadas variações médias e altas, e as análises de variância da resistência à penetração evidenciaram diferenças com todos os fatores de variação, enquanto para o conteúdo de água somente diferenças entre transecto. A análise multifractal evidenciaram que a resistências à penetração e o conteúdo de água no solo apresentaram, antes da colheita, respostas com ambientes multifractais, tornando-se em alguns casos, após as colheitas, ambientes mais monofractais, sendo identificadas essas diferenças entre os transectos, nas diferentes profundidades do solo, e nas diferentes fases da cana-de-açúcar.

Palavras-chave: Compactação do solo, *Saccharum spp.*, dimensão fractal, soil moisture, scaling heterogeneity

Multifractality of penetration resistance and moisture of a Udisol under a semi-mechanized sugarcane system

ABSTRACT: Soil compaction in agricultural plantations such as sugarcane is one of the most recurrent problems in soil studies. For its evaluation, it is usually performed through the measurement of resistance to penetration and with interaction of the water content present in the soil. Although due to the very nature of the soil and the variability of water, there is high heterogeneity in the responses of compaction, which together with other factors of variation, such as spatial and temporary changes caused by soil preparation and the use of agricultural machinery, make it difficult to understand, even using statistical or geostatistical tools. Then, as an alternative, the use of techniques implicit to these soil heterogeneities arises, such as Multifract Analysis that considers the scalar variations. In view of this, the objective was to evaluate the Multifractality and statistical variations of the penetration resistance and the water content in two transects (between line and line) of an Argissolo before and after the semi-mechanized sugar cane harvest, located in the municipality of Igarassu, PE, Brazil. In an area of semi-mechanized sugarcane two transects of ~100 m were studied, with 64 sampling points, one in the traffic zone and in parallel, the other in the non-traffic zone. Statistical and multiracial evaluations of resistance to penetration and water content in the soil were carried out considering two transects, three soil depths and two phases, before and after harvesting. Statistically, medium and high variations were detected, and the analysis of variance of penetration resistance showed differences with all variation factors, and for water content only differences between transects. The multifract analysis showed that the penetration resistance and the water content in the soil presented, before the harvest, responses with multifract environments, becoming in some cases, after the harvest, more monofract environments, being identified these differences between the transects, in the different depths of the soil, and in the different phases of the sugar cane.

Key-words: Soil compaction, *Saccharum spp.*, fractal dimension, soil moisture, scaling heterogeneity.

1. Introdução

Desde a origem, o solo está em contínua formação e mudanças e em termos gerais, pode ser considerado como um corpo poroso, não homogêneo na sua estrutura, pelos distintos componentes mineralógicos e biológicos que o compõe, caracterizando essa complexidade e variação que um mesmo solo pode expressar (MARTÍNEZ *et al.*, 2010; SIQUEIRA *et al.*, 2018). Essas variações podem ser evidenciadas pelas diferenças físicas entre as próprias camadas e que por sua vez, com diferentes fatores, como o clima, água, vegetação e, atualmente, com seu uso para a agricultura (VIDAL-VÁZQUEZ *et al.*, 2013; Almquist *et al.*, 2018).

Nas diferentes atividades agrícolas, vários pesquisadores têm reportado essa heterogeneidade nos solos, encontradas nos estudos localizados ou espaciais, nas diferentes variáveis e profundidades do solo, somadas com as variações que acontecem, por exemplo, quando são utilizadas máquinas pesadas, que dificultam ainda mais seu entendimento (PÉREZ *et al.* 2010; SIQUEIRA *et al.* 2013; WANG *et al.*, 2019).

Nos solos agrícolas cultivados com cana-de-açúcar, a compactação por tráfego agrícola é um dos principais fatores limitantes, pelo qual em estudos relacionados é usual usuais realizar avaliações através da resistência à penetração e conteúdo de água do solo, sendo reportada heterogeneidade nas respostas do solo, seja de maneira temporal ou espacial, evidenciando a complexidade intrínseca do solo e da compactação gerada nas áreas agrícolas (LEIVA *et al.*, 2019; SIQUEIRA *et al.*, 2018; BARBOSA *et al.*, 2019).

Outros fatores que também incidem nessas variações e a heterogeneidade estão relacionados com a escala, fase temporais e a distribuição dos próprios dados, pois quanto maior a escala, maior a variação das respostas, e quanto maior essa variação, menos normal a distribuição desses dados (BISWAS *et al.*, 2012; HERRERA *et al.*, 2016; LIAO *et al.*, 2017).

Embora nem sempre os dados cumprem esses requisitos de normalidade, linearidade ou outra característica que facilitem o entendimento, nem mesmo utilizando técnicas geoestatísticas é possível quantificar essa variabilidade espacial no solo (WANG *et al.*, 2019) em função dessas variações e/ou heterogeneidades; os estudos multifractais têm se tornado uma alternativa de análises, pois através da segmentação em diferentes escalas procura-se encontrar auto similaridade entre os objetos estudados e poder representar a relação de *power-law* (ley de potências) entre o número e tamanho da

massa do dados (EVERTSZ & MANDELBROT, 1992; LIAO *et al.*, 2017; LEIVA *et al.*, 2019; MOHAMMADI *et al.*, 2019).

Então, para o entendimento e estudos da compactação de solos agrícolas, as heterogeneidades evidenciadas (e.g. resistência à penetração e conteúdo de água) podem ser analisadas pelas suas escalas e/ou dimensões, como uma alternativa para poder descrever sua complexidade (BANERJEE *et al.*, 2011; HERRERA *et al.*, 2016).

Diante disto, objetivou-se avaliar a Multifractalidade e variações estatísticas da resistência à penetração e do conteúdo de água em dois transectos (entrelinha e linha) de um Argissolo antes e após a colheita semi-mecanizada da cana-de-açúcar.

2. Material e métodos

2.1 Sítio experimental

O estudo foi realizado durante os meses de janeiro de 2018 até março de 2020, numa área cultivada com cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) localizada no Município de Igarassu, Estado de Pernambuco, Brasil (Fig. 1, ver mapas), altitude de 180 m e conforme classificação de Köppen, clima quente e úmido, megatérmico (As') com temperatura média de $\sim 25 \pm 0,31$ °C, com máximos e mínimos de 33,1 e 18,6 °C, umidade relativa média de $\sim 77 \pm 0,95\%$, com máximas e mínimas de 95 e 42%, e precipitação anual de $\sim 1487 \pm 63$ mm variando entre ~ 1304 e 1583 mm ano, para os períodos de 2016 - 2019.

O solo da área foi classificado como Argissolo/*Argissolo* (dos SANTOS, 2018; SOIL SURVEY STAFF, 2014) com boas características para o desenvolvimento da agricultura, porém, com fertilidade natural limitada, predominância de areia com baixos conteúdos de argila e considerado suscetível ao efeito de erosão hídrica (BRADY & WEIL, 2008; dos SANTOS, 2018).

Para a caracterização física do solo foram coletadas amostras deformadas, entre a camadas superficial (0–0,20 m) e subsuperficial (0,20–0,40 m) e as análises realizadas no Laboratório de Mecânicas dos Solo e Aproveitamento de Resíduos da UFRPE, conforme Teixeira *et al.* (2017) e NBR 7182 (ABNT, 1986).

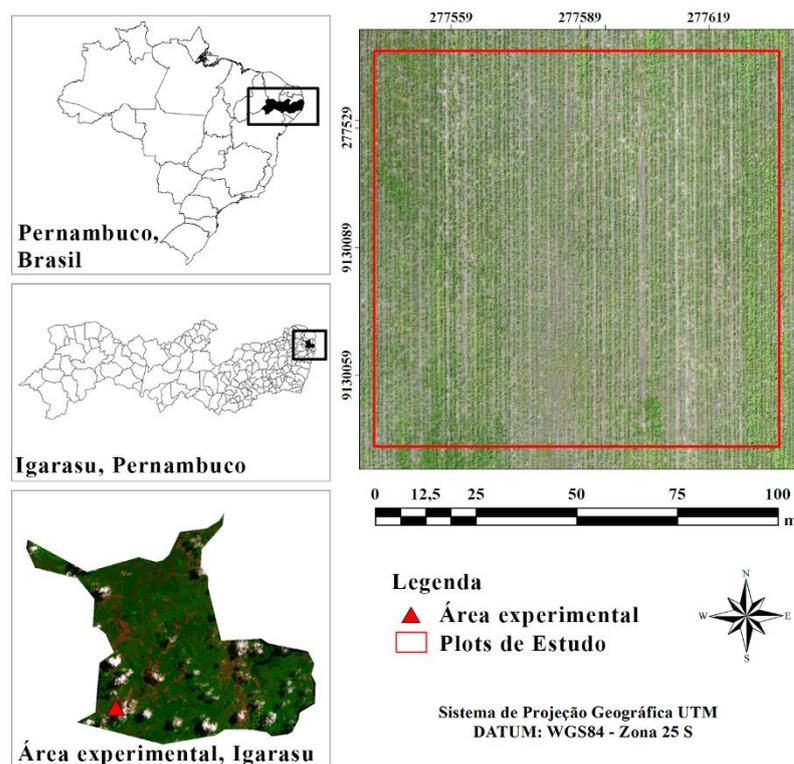


Figura 1. Localização experimental e área agrícola de cana-de-açúcar e fotos da marcação da área na fase de plantio em Igarassu, PE, Brasil.

Nas características do solo da área cultivada com cana-de-açúcar, Tabela 1, destaca-se a mudança na textura, de areia franca na camada superficial, para franco arenosa nas camadas mais profundas, como também maior conteúdo de matéria orgânica na camada superficial pela prévia adubação com resíduos, torta-de-filtro (20 t ha⁻¹).

Tabela 1. Caracterização do solo e da área de cana-de-açúcar.

Características	Áreas de cana-de-açúcar	
Classe	<i>Argissolo / Argissolo*</i>	
Densidade de partícula (g cm ⁻³)	2,63	
Anos de cultivo	50 anos (Registro. 1969)	
Ciclo produtivo	1	
Fase cultura	Renovação de plantio	
Camada (m)	0 – 0,20	0,20 – 0,40
Textura	Areia Franca	Franco arenoso
Areia (%)	83,36	78,65
Silte (%)	9,07	9,28
Argila (%)	7,57	12,07
Matéria orgânica (g kg ⁻¹)	4,00	2,44
Densidade máxima (g cm ⁻³)	1,90	1,85
Umidade crítica (%)	8,16	8,64

*Sistema brasileiro de classificação de solos (dos Santos, 2018)

2.2 Áreas de Estudo

Num talhão de 9 ha (Fig. 1) cultivado com cana-de-açúcar, renovado com preparo convencional do solo em toda a área e em condições de relevo relativamente homogêneas

(inclinação $\leq 10\%$) foi delimitada uma área de 100×100 m, a ser colhida com o sistema com o sistema Semi-mecanizado.

Em toda área foi realizado preparo convencional do solo (02/2016), constando de subsolagem, gradagem, nivelamento e sulcagens, fazendo uso de tratores e implementos agrícolas. Para a execução do plantio foram utilizados tratores, que carregaram e distribuíram a cana (variedade RB92579) pela área entre os sulcos.

O plantio de cana-de-açúcar foi organizado em linhas duplas, ou seja, um par de fileiras cana-de-açúcar com distância de 0,9 m para formar uma linha de plantio, deixando um espaçamento de 1,4 m entre as linhas de cana (entrelinha) para o trânsito das máquinas agrícolas (Fig. 2).

A colheita semi-mecanizada foi realizada em cana crua e corte manual, e o carregamento foi realizado com máquinas carregadeiras convencionais (trator com garra hidráulica); e para o transporte, trator e reboque convencionais com capacidade de carregamento de 12 t, destacando a ausência de controle de tráfego em toda a operação.

Em termos gerais, o processo de colheita da cana foi realizado em 3 partes, I corte da cana, II carregamento, III transporte; o corte foi realizado totalmente manual, o carregamento foi utilizada a carregadeira (trator com braço hidráulico) e para o transporte foram utilizados reboques convencionais.

2.3 Resistência à penetração (R_p) e conteúdo de água no solo (U)

Foram locados 2 transectos paralelos de 100,8 m, centralizado e longitudinal na área de cana-de-açúcar, o transecto I sobre o espaço das entrelinhas (E) e o II foi realizado sobre uma das linhas (L) do plantio da cana-de-açúcar, conforme apresenta a Figura 2.

Em cada um dos transectos (transecto I e II) foram avaliadas duas variáveis, a resistência à penetração (R_p) e o conteúdo de água no solo (U), em três camadas: 0 – 0,20; 0,20 – 0,40 e 0,40 – 0,60 m, totalizando 64 pontos consecutivos, com distanciamento entre pontos de 1,60 m, ao longo do transecto. Vale ressaltar que as avaliações foram realizadas durante a fase de brotação da cana-de-açúcar, ou seja, após realizado o processo de plantio e colheita (90 dias após cada fase).

Para a determinação da resistência à penetração (R_p) foi utilizado um penetrômetro de impacto (Fig. 2), composto por uma haste metálico de 1,60 m, graduado em 5 cm, peso de 1,46 kg, e com uma ponta de área de cone de $0,013 \text{ m}^2$ e ângulo de 30° ; e o embolo, para realiza os impactos, tinha uma massa de peso 1,60 kg.

A mediação da R_p do solo foi realizada contando o número de impactos do embolo, solto em queda livre (altura de 0,40 m), necessário para penetrar 5 cm da haste; esse

processo foi realizado até atingir a profundidade de 0,60 m no solo. Para expressar esse impacto em força de resistência (MPa) foi aplicada a equação de ajuste proposta por Stolf (1991) que considera as características do penetrômetro e número de impactos.

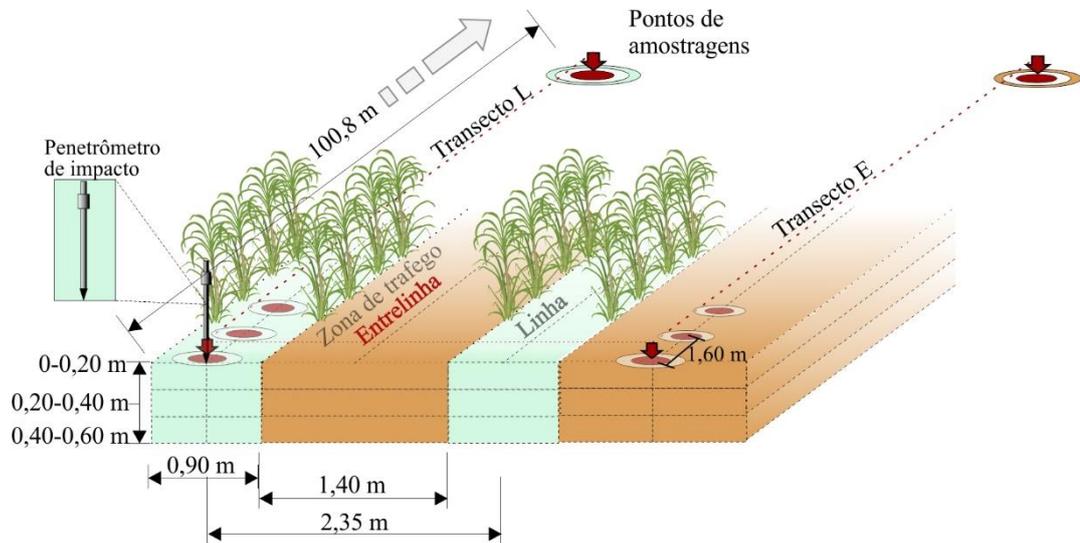


Figura 2. Desenho dos transecto na entrelinha (E) e linha (L) do plantio de cana-de-açúcar e respectivos pontos de avaliação.

Para realizar as análises do conteúdo gravimétrico da água no solo ($U - g\ kg^{-1}$) foram necessárias realizar 3 amostragens de solo indeformadas (100 g aprox.) em cada uma das camadas (0 – 0,20, 0,20 – 0,40, 0,40 – 0,60 m) e pontos nos transectos a serem estudados, e para deduzir os valores da U aplicou-se a metodologia de secagem proposto por Teixeira *et al.* (2017).

2.4 Análises estatísticas

As análises estatísticas foram realizadas para as respostas de R_p e U , sendo aplicada a estatística descritiva, calculando a média, desvio padrão, valores mínimos e máximos, mediana, como também, foram realizadas análises de dispersão, através do desvio padrão e coeficiente de variação.

Também foram realizadas análises de variâncias (ANOVA) tanto para os transectos, quanto para as profundidades e fase cultura e sua respectiva interação (transecto \times profundidade \times fase) para as respostas das propriedades físicas do solo, R_p e U , como também para os diferentes parâmetros multifractais da R_p e U , descritos no item da análise multifractal, e para as respectivas comparações de médias foi realizado o teste de Tukey a 0,05 de probabilidade.

2.5 Análises multifractal

Para realizar a execução da análise multifractal aplicou-se o método das fases. As análises fractal dos transectos foram divididas sucessivamente em segmentos menores,

conforme a redução de escalas *diadica*, pelo método do *box-counting* (BC) (e.g. HALSEY *et al.*, 1986; VIDAL-VÁZQUEZ *et al.*, 2013).

A segmentação sucessiva do suporte geométrico foi baseada nos estágios de k ($k= 1, 2, 3\dots$) gerando um número de segmentos para cada uma das escalas (δ), $N(\delta)= 2^k$, portanto, aumentam em número, embora com comprimentos que vão diminuindo na extensão toda de L como, $\delta= L \times 2^{-k}$ (e.g. EVERTSZ & MANDELBROT, 1992; CANIEGO *et al.*, 2005; VIDAL-VÁZQUEZ *et al.*, 2013).

As variáveis medidas em cada um dos transectos foram transformadas nas distribuições de probabilidade de massa, baseadas nas contribuições de cada um dos segmentos ou subintervalos de tamanho δ_i para a massa total, ao longo do suporte geométrico. Esta função de probabilidade massa normalizada, $pi(\delta) = \mu_i(\delta)$ descreve a contribuição de um segmento ou intervalo de tamanho δ para a massa total, sendo assumida como a proporção:

$$\mu_i(\delta) = \frac{\varphi_i(\delta)}{\sum_{i=1}^{N(\delta)} \varphi_i(\delta)} \quad \text{Eq. (1);}$$

onde: φ_i é a medida no i -ésimo segmento na escala δ ; $N(\delta)$ é quantidade de segmentos com medida δ , e $\sum_{i=1}^{N(\delta)} \varphi_i(\delta)$ representa a massa toda no transecto.

A função de partição $\chi(q, \delta)$ foi estabelecida, conforme a Equação 2, aplicando o método dos Fases (HALSEY *et al.*, 1986), resultado da soma ponderada de todos os segmentos.

$$\chi(q, \delta) = \sum_{i=1}^{N(\delta)} [\mu_i(\delta)]^q \quad \text{Eq. (2);}$$

onde, os Fases estatísticos, q , limitam-se para $-\infty < q < \infty$.

A plotagem da função de partição é realizada em relação ao tamanho de segmentos, e apresenta as seguintes características de escala:

$$\chi(q, \delta) \propto \delta^{-\tau(q)} \quad \text{Eq. (3);}$$

onde, $\tau(q)$ é uma função não-lineal de q , conhecida como função expoente de massas.

A função de expoente de massa, $\tau(q)$, é obtida para cada valor de q na plotagem log-log das quantidades de $\chi(q, \delta)$ contra os diferentes δ .

Por tanto $\tau(q)$ está evidenciado na seguinte equação:

$$\tau(q) = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\log \chi(q, \delta)}{\log \delta} \quad \text{Eq. 4}$$

Quando a plotagem $\tau(q)$ vs., q , é lineal, então a medida é monofractal, caso contrário, a não linearidade indicaria a multifractalidade.

A função expoente de massa $\tau(q)$, está relacionado com o espectro de dimensão generalizada D_q ou dimensão de Rényi (HENTSCHEL & PROCACCIA, 1983), definida conforme a seguinte expressão:

$$D_q = \frac{1}{q-1} \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\log [\chi(q,\delta)]}{\log \delta} = \frac{\tau(q)}{q-1}, \text{ para } q \neq 1 \quad \text{Eq. (5a);}$$

No caso, D_1 torna-se indeterminado no Fase $q = 1$, sendo necessário utilizar a Equação 5b.

$$D_1 = \lim_{\delta \rightarrow 0} \sum_{i=1}^{N(\delta)} \mu_i(\delta) \log[\mu_i(\delta)] / \log \delta, \text{ para } q = 1 \quad \text{Eq. (5b);}$$

Para uma distribuição monofractal, D_q é uma constante, de modo que a avaliação para Fases sucessivos não fornece informações adicionais. No entanto, para medidas multifractais, a relação entre D_q e q não é constante e tipicamente apresenta um aspecto semelhante ao de um sigmoide duplo com um ponto de inflexão para $q = 0$.

As dimensões generalizadas (D_q), em $q = 0$, $q = 1$ e $q = 2$, são conhecidas como dimensão de capacidade (D_0), informação ou entropia de Shannon (D_1) e correlação (D_2), respectivamente. Para o caso de monofractalidade $D_0 \approx D_1 \approx D_2$; para o caso de multifractalidade aceita-se que $D_0 > D_1 > D_2$.

As medidas que apresentam uma distribuição multifractal também podem ser caracterizadas por mais outras duas funções de escalamento, que são definidas como funções implícitas de q . Assim, em primeiro lugar, para uma medida multifractal, em cada intervalo i^{th} de tamanho δ , a função de probabilidade de massa tem a seguinte propriedade de escalamento:

$$\mu_i(\delta) \propto \delta^{\alpha_i} \quad \text{Eq. (6),}$$

onde α_i , é o expoente de Hölder ou expoente de Lipschitz-Hölder ou ainda expoente de singularidade “grosseiro”, que quantifica a importância das singularidades da medida de uma variável em cada um dos segmentos i ; por tanto, pode ser considerado como um índice de aglomeração ou concentração da medida.

Em segundo lugar, para medidas com distribuição multifractal, o número N_α de segmentos, de tamanho δ e com um mesmo valor de expoente de Hölder, α , aumenta à medida que diminui δ , de acordo com a seguinte relação de potência:

$$N_\alpha(\delta) \sim \delta^{-f(\alpha)} \quad \text{Eq. (7);}$$

onde, o expoente $f(\alpha)$ é uma função contínua de escalonamento para todos os pontos que apresentam um mesmo valor de α . Por tanto, o expoente $f(\alpha)$ é também conhecido como a dimensão fractal local.

A função expoente de massa, $\tau(q)$, pode ser obtida com a diferença entre α expoente de Hölder α_q e o expoente de $f(\alpha)$ conforme a seguinte equação:

$$\tau(q) = \alpha_q - f(\alpha_q) \quad \text{Eq. (8).}$$

Mediante a transformação de Legendre (e.g. EVERSTZ & MANDELBROT, 1992; Halsey *et al.*, 1986) podem ser calculadas as funções de escala $f(\alpha)$ e α , da seguinte maneira:

$$f(\alpha_q) = \alpha_q - \tau_q \quad \text{Eq. (9a),}$$

$$\alpha_q = d \tau_q / d q \quad \text{Eq. (9b).}$$

Embora, a transformação pode estar sujeita a erros significativos nos cálculos de $f(\alpha)$ e α , quando os fases são negativos ($-q$). Então, como alternativa utiliza-se o método direto de Chhabra e Jensen (1989) para a estimativa de $f(\alpha)$ e α , o qual também dependera do dimensionamento da função de partição modificada $\chi(q, \delta)$, sustentada nas contribuições individuais dos segmentos.

A nova função de partição $\mu_i(q, \delta)$, determina-se como: $\mu_i(q, \delta) = \mu_i^q(\delta) / \sum_1^{N(\varepsilon)} \mu_i(q, \delta)$, por tanto, a partir um conjunto de números reais $-\infty < q < \infty$, foram calculadas α e $f(\alpha)$, aplicando as seguintes duas equações:

$$\alpha(q) \propto \frac{\sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} \mu_i(q, \delta) \log[\mu_i(\delta)]}{\log(\delta)} \quad \text{Eq. (10a),}$$

$$f(\alpha(q)) \propto \frac{\sum_{i=1}^{N(\delta)} \mu_i(q, \delta) \log[\mu_i(q, \delta)]}{\log(\delta)} \quad \text{Eq. (11b).}$$

O gráfico de $f(\alpha)$ versus α é o espectro multifractal ou espectro de singularidade, este gráfico tem a forma característica de uma parábola invertida (descendente e côncava) e com aumento nos intervalos da valores, evidenciaria a heterogeneidade da medida. Este gráfico é reduzido para um ponto de escala tipo monofractal. A mínima escala exponencial (α_{\min}) corresponde à região mais concentrada da medida, e o máximo expoente (α_{\max}) à região da medida.

Para os tamanhos segmentos sucessivos foram calculadas as funções de partição em etapas 2^k , $0 \leq k \leq 6$ e em intervalos entre $-5 < q < 5$. Por tanto, o espectro da dimensão

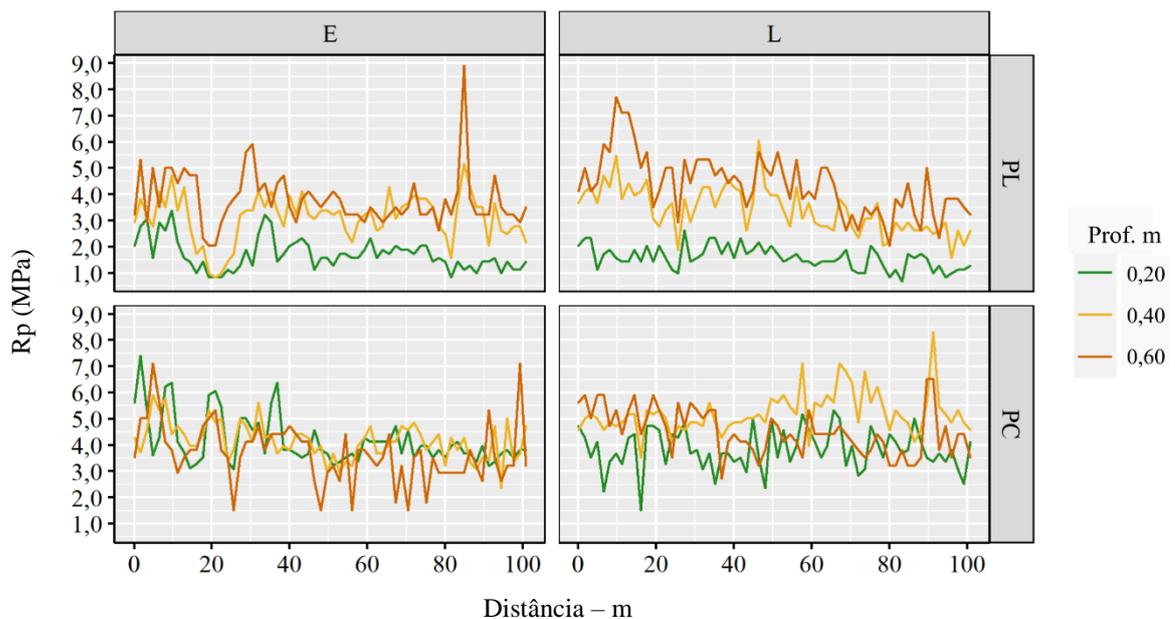
generalizada, Dq , foi calculada em intervalos de Fases estatísticos $-10 \leq q \leq 10$ at 5.0 com incrementos de lag.

Esse intervalo foi restrito para o limite de número de valores α e $f(\alpha)$, aceitados unicamente no espectro singular, variando os valores linearmente com o logaritmo da escala de medida.

3. Resultados e discussão

3.1 Análises da resistência a penetração (Rp) e conteúdo de água (U) do solo.

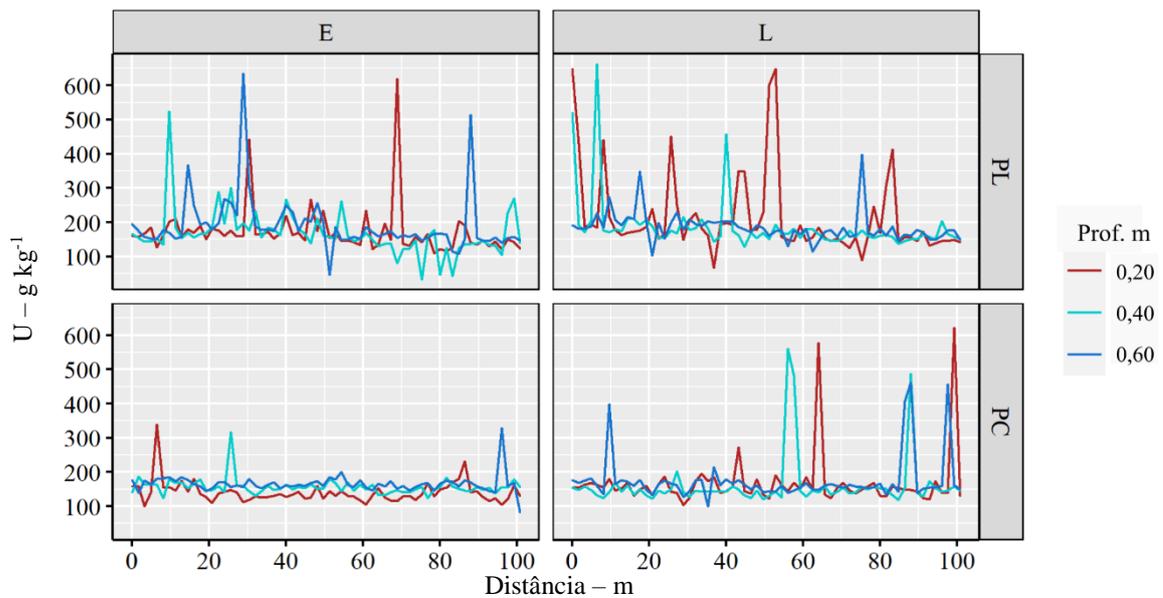
As variáveis da Rp e U do solo apresentaram variações em suas respostas, considerando os valores apresentados ao longo de cada um dos transectos, como também, as variações entre profundidades e as fases da cultura; na Figura 3 e 4 podem ser observadas essas variações da Rp e U, respectivamente, organizadas por fases, pós-plantio e pós-colheita (PL e PC) nas três diferentes profundidades do solo e também por transecto, entrelinha ou linha da cana (E e L).



E: entrelinha; L: linha; PL: plantio; PC; Pós-colheita.

Figura 3. Resistência à penetração (Rp) de um Argissolo em três profundidades ao longo do transecto da entrelinha (E) e Linha (L), antes e após a colheita semi-mecanizada de cana-de-açúcar.

Nas Figuras 4 estão apresentados os resultados da U no solo, destacando a escala de variação dos valores, ou seja, essa escala variou entre 33,175 e 634,615 g kg^{-1} , e para o caso da Rp (Fig. 3) essa escala de valores foi menor do que a U, com valor entre 0,68 e 8,91 MPa, significa que quanto maior a escala do valor, maior a variação e maior a complexidade resposta no solo.



E: entrelinha; L:linha; PL: plantio; PC; Pós-colheita.

Figura 4. Conteúdo de água (U) em um Argissolo em três profundidades ao longo do transecto da entrelinha (E) e Linha (L), antes e após a colheita semi-mecanizada da cana-de-açúcar.

A longo dos transectos foi observada essas variações, indicando a complexidade de respostas da R_p e U, mesmo antes de realizar as colheitas da cana-de-açúcar, ou também considerando as três diferentes profundidades do solo. Na Tabela 2 podem ser observadas as estatísticas descritivas e as dispersões das respostas da R_p e da U no transecto da entrelinha e linha de cana, em três profundidades e nas duas fases de avaliação.

Na Tabela 2 pode ser destacado que nas diferentes profundidades do solo, a R_p apresentou valores médios diferentes em PL, apresentando a menor R_p ($\sim 1,50$ MPa) na superfície do solo e independentemente do transecto, mas esses valores aumentaram com a profundidade do solo com valores médios de $R_p > 3,0$ MPa.

O CV (Tab.2) também revelaram a maior variação na camada superficial e diminuição com a profundidade do transecto E, e para o caso do L, essa variação da R_p foi mais regular $\sim 25\%$, mesmo entre as diferentes profundidades.

Antes da colheita (PL), para o casado da U os valores também mostraram alta variação, com respostas diferentes em cada profundidade, na E na maior profundidade (0,60 m) observou-se o maior conteúdo de água médio ($191,42 \text{ g kg}^{-1}$), seguidamente a camada superficial e subsuperficial conforme Tabela 2, e com CV que expressaram alta variação nos dados $\sim 41\%$. Na L, as respostas da U apresentaram uma resposta diferente do que na E, ou seja, a pesar dos CV ainda estiver elevado ($>45\%$) a respostas mostraram maior conteúdo de água na superfície do solo, e os mais baixos, na camada mais profunda, destacando que com os baixos conteúdos de água o CV também diminui $\sim 23\%$.

Tabela 2. Estatística descritiva da Resistência à penetração (Rp) e Conteúdo de água (U) um Argissolo em três profundidades ao longo do transecto da entrelinha (E) e Linha (L), antes e após a colheita semi-mecanizada de cana-de-açúcar.

Variável	Fase	Transecto	Prof. (m)	n.	Média	D.P.*	CV*	Mín.	Máx.	Mediana
Rp (MPa)	AC	E	0,20	64	1,71	0,60	35,42	0,83	3,37	1,58
			0,40	64	3,11	0,89	28,69	0,83	5,17	3,22
			0,60	64	3,80	1,04	27,29	2,03	8,91	3,52
		L	0,20	64	1,58	0,43	27,38	0,68	2,63	1,58
			0,40	64	3,41	0,87	25,55	1,58	6,07	3,44
			0,60	64	4,37	1,15	26,41	2,03	7,71	4,42
	PC	E	0,20	64	4,18	0,94	22,54	3,07	7,41	3,82
			0,40	64	4,17	0,71	16,94	2,37	5,92	4,20
			0,60	64	3,69	1,14	30,81	1,52	7,11	3,52
		L	0,20	64	3,83	0,77	20,17	1,52	5,32	3,75
			0,40	64	5,22	0,79	15,19	3,52	8,31	5,02
			0,60	64	4,53	0,88	19,48	2,71	6,52	4,42
U (g kg-1)	AC	E	0,20	64	172,72	73,28	42,43	109,95	620,11	159,71
			0,40	64	167,12	67,34	40,29	33,18	523,18	155,48
			0,60	64	191,42	84,15	43,96	45,87	634,62	168,33
		L	0,20	64	214,48	122,23	56,99	66,87	648,48	172,60
			0,40	64	187,07	84,62	45,24	127,80	661,38	167,37
			0,60	64	185,24	43,35	23,40	102,56	398,52	180,17
	PC	E	0,20	64	141,04	33,08	23,46	100,44	339,52	133,26
			0,40	64	156,82	24,39	15,55	124,17	316,75	153,15
			0,60	64	165,66	26,00	15,69	83,33	328,08	162,84
		L	0,20	64	167,64	81,91	48,86	103,07	621,02	152,52
			0,40	64	161,42	79,55	49,28	118,30	560,75	144,16
			0,60	64	175,37	68,87	39,27	100,22	462,21	160,92

*AC: Antes da colheita; PC; Pós colheita, D.P: Desvio padrão; CV: coeficiente de variação.

Após a colheita da cana, as Rp do solo apresentaram aumento nos valores, por exemplo, na E, nas profundidades de 0,20 e 0,40 m, a Rp apresentou em média ~4,17MPa, e com coeficientes de variação mais baixo do que Rp antes da colheita (Tab. 2), e para o caso da camada mais profunda (0,60 m) as respostas se mantiveram semelhantes às encontrada antes da colheita.

Segundo Esteban *et al.* (2019) e Barbosa *et al.* (2019) as máximas Rp encontradas nas linhas ou entrelinhas de cana são resultado do sucessivo e frequente tráfico das máquinas agrícolas, sendo esses valores encontrados principalmente nas camadas mais profundas, e particularmente nas camadas superficiais, após o trafego das máquinas.

Na linha (L) de cana, após a colheita, a Rp apresentou aumento dos valores, nas três profundidades do solo, porém, a diferença da E, evidenciou aumento sequencial, ou seja, a menor média da Rp foi observada na superfície (0,20 m) e seguidamente, com valores mais elevados, as outras duas profundidades (0,40 e 0,60 m), além de apresentar CV ~40 %, como pode ser observado na Tabela 2.

No estudo de Satiro *et al.* (2017) em Argissolo com cana-de-açúcar também encontraram aumento da R_p (~6 MPa) de maneira sequencial entre as camadas do solo, ou seja, a maior R_p , na camada profunda, seguidamente a intermediária e a superficial, destacando que isto aconteceu após a remoção da palha e o trefego agrícola.

Após a colheita, a escala da U do solo foi mais estreita (Fig. 4), ou seja, os valores ao longo do transecto, e nas diferentes profundidades estiveram mais próximos, variando entre 83,33 e 339,52 g kg⁻¹, com os menores valores médio de U na camada superficial e consecutivamente as seguintes camadas, 0,40 e 0,60 m, (Tab. 2).

Vale destacar que após o uso das máquinas para a colheita da cana, a resposta da U apresentou menos variações, evidenciado pelos reduzidos coeficientes de variação nas três camadas do transecto E, quando comparados com as variações da U antes da colheita. Para o caso do transecto L, a U teve valores semelhantes, variando entre 103,07 e 621,02 g kg⁻¹, encontrando a menor média de 161,41 g kg⁻¹, na camada intermédia (0,40 m) seguidamente pela superficial, e com a maior U média na camada mais profunda de 175,36 g kg⁻¹ (Tab. 2); neste transecto a variação sempre foi elevada, mesmo antes das colheitas.

Em termos de variação da R_p e U , os CV podem ser considerados como de variação média, segundo os critérios de Warrick e Nielsen (1980), embora as maiores variações sempre foram observadas na U (Tab. 2) destacando que após as colheitas de cana-de-açúcar, os CV mostram diminuição, ou seja, as respostas da R_p e U indicaram menor heterogeneidade entre os valores registrados (Tab. 2).

Este tipo de variações são comumente encontradas, independentes do tipo do solo, *e.g.* Sağlam e Dengiz (2017) estudando a variabilidade espacial do conteúdo de água no solo, registraram CV > 35% tanto nas camadas 0,20 e 0,40, encontrando valores mínimos nas duas camadas entre 3,5 e 3,9% e máximos entre 44,8 e 45,9%.

Segundo Sussha Lekshmi *et al.* (2014), Liao *et al.* (2017) e Jemberu *et al.* (2017) entre os fatores que podem aumentar a variabilidade da água no solo, está o tipo de sistema radicular da cultura implementada e características própria do relevo do terreno, como a inclinação na qual o solo pode estar disposto.

As análises de variância da R_p e U (Tab. 3) evidenciaram diferenças significativas nos três fatores de variação, Fases, Transecto e Profundidades, e incluindo as interações, por exemplo, a R_p não mostrou diferenças em todos os fatores de variação, mas para o caso da U , a análises de variância esteve limitada na detecção de diferenças, ou seja, não foram

encontradas diferenças entre os conteúdos de água nas diferentes profundidades, nem nas interações Fase × Transecto × Prof.

Tabela 3. ANOVA da resistência à penetração (Rp) e conteúdo de água (U), nos transectos do solo e nos diferentes Fases da cana-de-açúcar sub colheita semi-mecanizada.

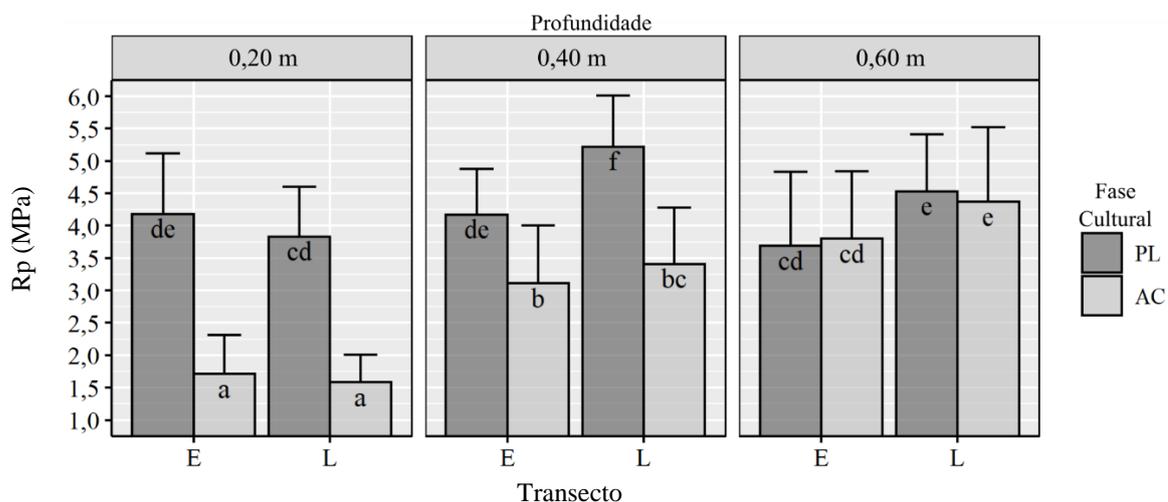
		ANOVA					
Variável	F.V.	SQ	gl	QM	F	p-valor	
Rp	Modelo	818,42	11	74,4	97,03	<0,0001	
	Fase	311,29	1	311,29	405,97	<0,0001	
	Transecto	28,07	1	28,07	36,61	<0,0001	
	Prof.	253,38	2	126,69	165,22	<0,0001	
	Fase × Transecto	3,45	1	3,45	4,5	0,03000	
	Fase × Prof.	177,91	2	88,96	116,01	<0,0001	
	Transecto × Prof.	36,72	2	18,36	23,94	<0,0001	
	Fase × Transecto × Prof.	7,6	2	3,8	4,96	0,01000	
	Erro	579,69	756	0,77			
	Total	1398,11	767				
U	Modelo	252132,32	11	22921,12	4,50	<0,0001	
	Fase	120189,45	1	120189,45	23,60	<0,0001	
	Transecto	49584,28	1	49584,28	9,74	0,0019	
	Prof.	16397,16	2	8198,58	1,61	0,2000	
	Fase × Transecto	1139,16	1	1139,16	0,22	0,6364	
	Fase × Prof.	19473,09	2	9736,55	1,91	0,1485	
	Transecto × Prof.	35007,48	2	17503,74	3,44	0,0327	
	Fase × Transecto × Prof.	10341,70	2	5170,85	1,02	0,3628	
	Erro	3849982,42	756	5092,57			
	Total	4102114,75	767				

*Diferenças mínima significativa.

Na Figura 5 estão apresentadas as comparações de médias, pelo teste de Tukey da Rp, reafirmando que antes das colheitas de cana-de-açúcar, a camada de 0,20 m apresentou a menor Rp entre 1,58 e 1,71 MPa, tanto na linha como na entrelinha, seguidamente a segunda Rp mais baixa esteve na camada 0,40 m. Para o caso da camada de 0,60 m antes da colheita apresentou respostas semelhantes com as encontradas após as colheitas da cana com as Rp mais elevadas, entre 4,37 e 4,53 MPa.

Na Figura 5 também pode ser observado que após o uso das máquinas na colheita da cana, as camadas mais susceptíveis foram das profundidades de 0,20 e 0,40 m, pois os aumentos nos valores da Rp foram evidentes, tanto na linha quanto a entrelinha da cana; para o caso da camada na profundida de 0,60 m não apresentou mudanças entre as fases e mesmo quando comparados os resultados da E e L.

Segundo Silva *et al.* (2018) na linha de plantio de cana-de-açúcar também existem regiões de estresse no solo, como na entrelinha, principalmente causado pela passagem de veículos agrícolas; e segundo Sá *et al.* (2016) esses valores de elevado de Rp ($\geq 3,8$) podem ser atingidos quando o solo é trafegado em condições de umidade que favorecem a compactação (acima do ponto de murcha).



E: entrelinha; L: linha; PL: plantio; PC; Pós-colheita.

Letras diferentes têm diferenças significativas ($p < 0,05$)

Figura 5. Comparação de médias das interações das fases, transectos e profundidades da resistência à penetração (Rp) do solo sub colheita semi-mecanizada de cana-de-açúcar.

De forma geral, a Rp do solo apresentou inicialmente os valores mais elevados na camada de maior profundidade e os menores na superfície, porém também pode ser destacado que após o uso das máquinas de colheita da cana, a Rp termina aumentando seus valores, tanto na linha quanto na entrelinha da cana, mostrando propagação e acumulações dessa resistência superficial, para a profundidade do solo.

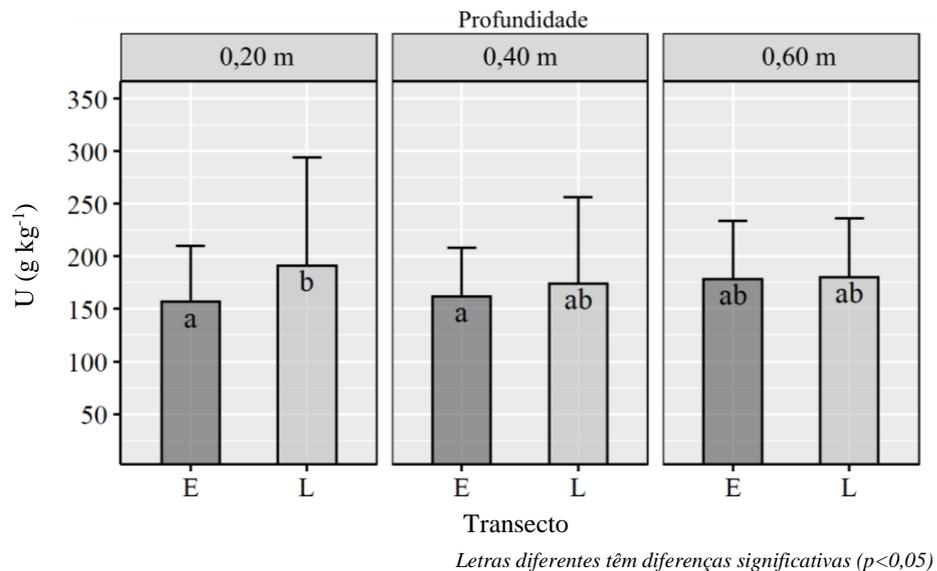
Os efeitos das máquinas começaram atingindo as camadas mais superficiais, propagando e acumulando suas tensões, através dos pneus, nas camadas mais profundas do solo, e mesmo com os preparos do solo, realizados com as máquinas, para diminuir as Rp do solo, pode ser observado que essas atividades só atingem as camadas superficiais, deixando acumulados os efeitos da compactação nas camadas profunda do solo (GARCÍA-TOMILLO *et al.*, 2018; de LIMA *et al.*, 2017; SILVA *et al.*, 2018).

Na Tabela 3 fica evidente que o conteúdo de água apresentou diferenças estatísticas entre as fases e os transectos, mas nas interações só foi observada diferenças para Transecto \times Profundidades, ou seja, com a colheita semi-mecanizada a U mudou no solo com respeito a PL, pois o valor médio diminuiu de 186,34 para 161,32 g kg^{-1} , redução de $\sim 13\%$; de igual maneira observou-se constantes diferenças entre os transectos, mostrando 9% mais capacidade de armazenamento de água na L (181,86 g kg^{-1}).

Muitos autores reportam que o conteúdo de água no solo e suas variações estão em função de diferentes fatores edáficos, climáticos, etc., porém, também reportam a forte influência do sistema radicular das plantas, que tem como função principal a absorção de água do solo, e no caso da cana-de-açúcar, a maior quantidade de raízes está presente

entre os 0,30 e 0,40 m do solo, podendo ocasionar essas variações no conteúdo de água (AQUINO *et al.*, 2015; OLIVEIRA FILHO *et al.*, 2015; SCARPARE *et al.*, 2019; SILVA-OLAYA *et al.*, 2017).

Na Figura 6 foi apresentada a diferenças de médias da interação Transecto × Profundidade, observa-se que a superfície da entrelinha (L) apresentou os maiores conteúdos de água, e para as outras profundidades observa-se semelhanças estatísticas.



E: entrelinha; L: linha; PL: plantio; PC: Pós-colheita.

Figura 6. Comparação de médias das interações dos transectos e profundidade do conteúdo de água no solo (U) do solo sub colheita semi-mecanizada de cana-de-açúcar.

Segundo Tim Chamen *et al.* (2015) e Busari *et al.* (2015) nos modelos para o estudo da compactação, a R_p e U são das variáveis que permitem determinar o estado do solo e seus efeitos na produtividade, além disso, a R_p e U também são variáveis consideradas nos estudos que relacionam as práticas agrícolas com as mudanças das propriedades físicas do solo, principalmente quando são causadas pelo tráfego de máquinas agrícolas.

Entre os modelos que relacionam a compactação do solo com a R_p , pode ser destacado o modelo de Busscher (BUSSCHER, 1997), que considera além da densidade do solo, a umidade como fatores de variação para a R_p ; alguns autores, aplicando esse modelo, consideram que a redução do conteúdo de água no solo aumenta a R_p (SOUZA *et al.*, 2015; ADALBERTO *et al.*, 2018; da SILVA *et al.*, 2016).

Essas ligação entre a R_p e U do solo, são as possíveis causas da variação da R_p , como muitos autores já mencionaram que a alta variação na R_p , encontrada nas diferentes camadas do solo, é causada pela alta variação das resposta do conteúdo de água no solo e o manejo do mesmo (SOUZA *et al.*, 2015; TORMENA *et al.*, 2017;

BURGOS HERNÁNDEZ *et al.*, 2019) e segundo Imhoff *et al.* (2016) acrescenta que a deformação do solo, por um estresse aplicado sobre este, é controlado pelo conteúdo de água, que por sua vez também controla o movimento das partículas do solo.

Para Tormena *et al.* (2017) este tipo de interações, entre as propriedades físicas do solo, dificultam claramente a quantificação dos impactos dos manejos agrícolas e suas interpretações; e nas respostas encontradas da R_p , na L e E nas diferentes fase permitiu observar a amplitude das escalas e sus variações, e como também as variações por fatores de manejo da cana-de-açúcar

3.2 Multifractalidade da resistência à penetração (R_p) e conteúdo de água (U) no solo

Para a análises da multifractalidade, foram consideradas as respostas da R_p e U, tanto na linha como na entrelinha do plantio de cana-de-açúcar, como também foram considerados diferentes parâmetros, como a linearidade da função de partição, as dimensões e partições generalizadas, como também, as análises das singularidades espectrais e seus respectivos espectros fractais.

Na Figura 7 foi apresentada as funções de partição $\chi(q, \delta)$, para as fases estatísticas q , de -10 em 10, com incremento de 2, entre os logaritmos de versus δ , da R_p do transecto E, nas diferentes profundidades do solo, antes e após a da colheita (PL e PC) semi-mecanizada da cana de açúcar.

Essas funções de partição foram cruciais nas análises das propriedades escalares em ordem de q , e determinar se o tipo de escala é simples (monofractal) ou múltipla (multifractal), por tanto, foram realizadas para as variáveis de U e R_p , tanto na entrelinha como na linha, considerando as profundidades e a fase cultura. Para todos os casos de função de partição da U e R_p do solo foram encontradas partições com linearidades e com $R^2 > 0,99$.

Segundo Siqueira *et al.* (2013) avaliando a R_p em transectos em solos (Orthic Podzol) agrícolas com cana-de-açúcar também encontrou respostas semelhantes na função de partição ($\chi(q, \delta)$) e.g. valores de $R^2 > 0,97$ e Herrera *et al.* (2016) em solos tipo Ochrept e plantação de oliveiras encontrou valores de $R^2 > 0,98$ na função de partição, sugerindo a respostas escalares na variáveis do solo como a R_p .

Segundo Evertsz e Mandelbrot (1992) e Lee (2002) quando os fases obedecem a lei de potencias ou auto-similaridade nas diferentes escalas de mediação, como foram

observadas na plotagem de $\chi(q, \delta)$ versus δ , nas funções de partições da Rp e U, podem ser consideradas respostas fractais.

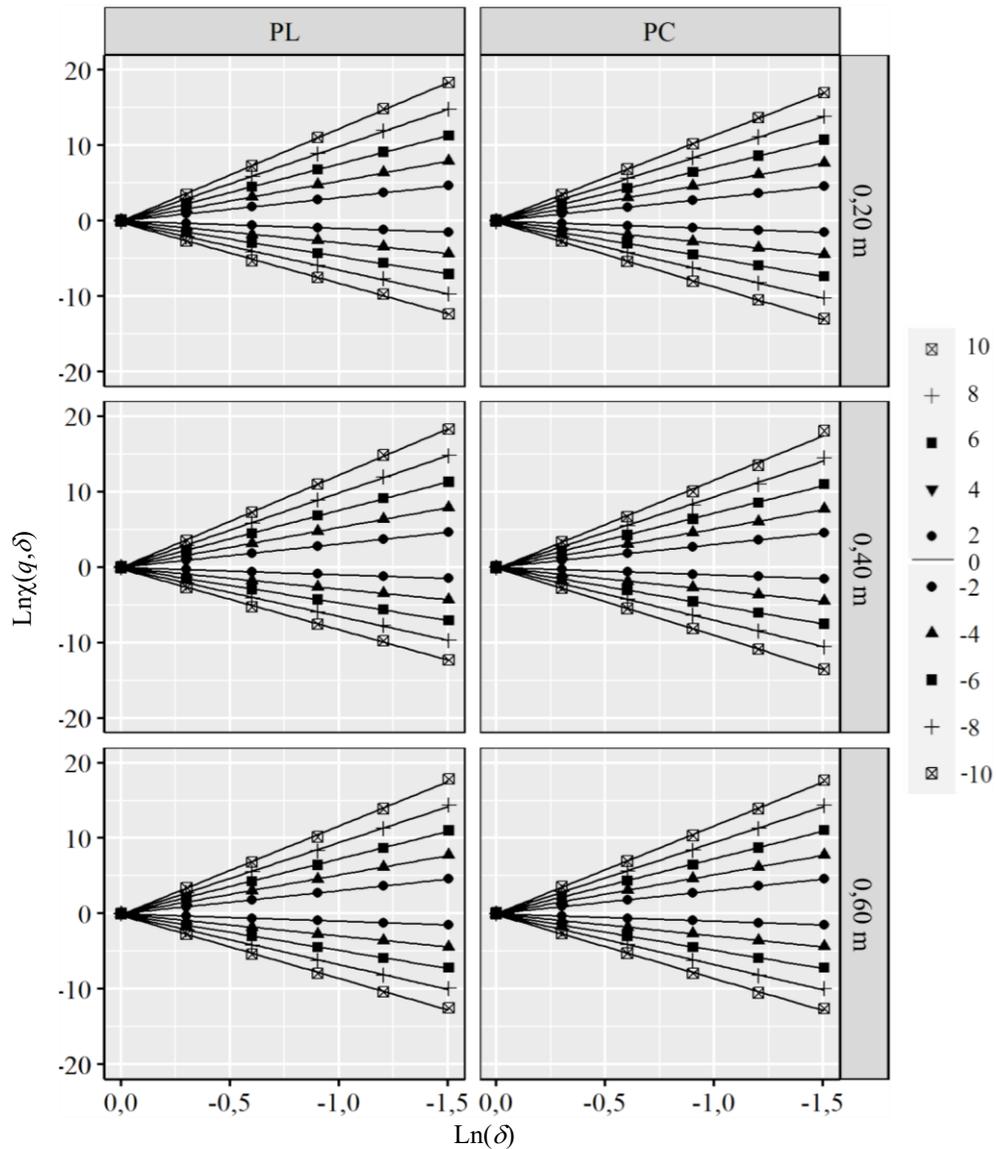


Figura 7. Função de partição $\chi(q, \delta)$ para tamanhos de segmentos sucessivos em Fases diferentes, q $[-10, 10]$, com incrementos de 2, para resistência à penetração (Rp) do solo em três profundidade do transecto na entrelinha (E) antes e após a colheita cana-de-açúcar.

Os parâmetros multifractais da dimensão generalizada (D) da Rp e da U na entrelinha (E) e na linha (L) de cana-de-açúcar e nas diferentes profundidades, estão apresentados na Tabela 4 e 5, respectivamente. Para o caso da D0, a Rp e U apresentaram valores iguais (1,000) nos dois transectos, nas duas fases e as três profundades (Tab. 4 e 5).

Tabela 4. Parâmetros multifractais da dimensão generalizada (D_{\min} , D_0 , D_1 , D_2 e D_{\max}) para a resistência à penetração (Rp) e conteúdo de água do solo (U) em três profundidades do transecto na entrelinha (E) antes e após a colheita de cana-de-açúcar.

Prof. (m)	D_{\min}	D_0	D_1	D_2	D_{\max}	D_0-D_{\min}	$D_{\max}-D_0$	$D_{\max}-D_{\min}$	
Antes da Colheita									
Rp	0,20	0,894	1,000	0,986	0,971	1,113	0,106	0,113	0,219
	0,40	0,946	1,000	0,988	0,979	1,260	0,054	0,260	0,314
	0,60	0,928	1,000	0,993	0,986	1,069	0,072	0,069	0,141
U	0,20	0,859	1,000	0,989	0,975	1,097	0,141	0,097	0,238
	0,40	0,885	1,000	0,987	0,974	1,115	0,115	0,115	0,230
	0,60	0,825	1,000	0,984	0,965	1,103	0,175	0,103	0,278
Após Colheita									
Rp	0,20	0,955	1,000	0,996	0,992	1,020	0,045	0,020	0,065
	0,40	0,973	1,000	0,996	0,993	1,091	0,027	0,091	0,117
	0,60	0,941	1,000	0,993	0,985	1,057	0,059	0,057	0,117
U	0,20	0,923	1,000	0,995	0,989	1,057	0,077	0,057	0,133
	0,40	0,965	1,000	0,998	0,995	1,038	0,035	0,038	0,073
	0,60	0,972	1,000	0,997	0,994	1,104	0,028	0,104	0,132

Na Tabela 4, as variáveis Rp e U do transecto E, mostraram diferenças entre D_0 , D_1 e D_2 , mostrando em alguns casos diminuição sequencial ($D_0 > D_1 > D_2$), podendo indicar tendências multifractais, e.g. a Rp, antes e após a colheita apresentaram essa tendência multifractais em todas as profundidades, da mesma maneira que a variável da U, essas respostas, com tendências multifractais, também foram observadas no transecto L (Tab. 5).

Tabela 5. Parâmetros multifractais da dimensão generalizada (D_{\min} , D_0 , D_1 , D_2 e D_{\max}) para a resistência à penetração (Rp) e conteúdo de água do solo (U) no transecto da linha (L) antes e após a colheita de cana-de-açúcar.

Prof. (m)	D_{\min}	D_0	D_1	D_2	D_{\max}	D_0-D_{\min}	$D_{\max}-D_0$	$D_{\max}-D_{\min}$	
Antes da Colheita									
Rp	0,20	0,965	1,000	0,995	0,990	1,051	0,035	0,051	0,086
	0,40	0,951	1,000	0,993	0,987	1,058	0,049	0,058	0,107
	0,60	0,925	1,000	0,992	0,983	1,063	0,075	0,063	0,138
U	0,20	0,769	1,000	0,978	0,949	1,096	0,231	0,096	0,328
	0,40	0,854	1,000	0,991	0,978	1,062	0,146	0,062	0,208
	0,60	0,947	1,000	0,995	0,990	1,077	0,053	0,077	0,130
Após Colheita									
Rp	0,20	0,974	1,000	0,997	0,993	1,055	0,026	0,054	0,080
	0,40	0,974	1,000	0,997	0,994	1,078	0,026	0,078	0,104
	0,60	0,963	1,000	0,996	0,992	1,039	0,037	0,039	0,077
U	0,20	0,850	1,000	0,988	0,972	1,092	0,150	0,092	0,241
	0,40	0,862	1,000	0,987	0,971	1,088	0,138	0,088	0,227
	0,60	0,830	1,000	0,987	0,970	1,082	0,170	0,082	0,252

Segundo Biswas *et al.* (2012) em escalas multifractais e com natureza não homogênea, a ordem da dimensão geralmente pode ser expressado como $D_0 > D_1 > D_2$. Segundo Siqueira *et al.* (2018) e a comparação entre as dimensões têm sido

frequentemente usadas para observar correspondências para as escalas monofractal ou multifractal, *e.g.* se $D_0 \approx D_1 \approx D_2$ então, a distribuição tem tendência multifractal, e a igualdade entre as dimensões indicaria monofractalidade.

Segundo Banerjee *et al.* (2011), Vidal-Vázquez *et al.* (2013) e Siqueira *et al.* (2018) a alta aproximação entre as dimensões fractais, (*e.g.* $D_0 \approx D_1 \approx D_2$) têm altas tendências de escalas tipo quase monofractal e com distribuição homogênea da medida; para o caso da variáveis estudadas, as mediadas das dimensões ficaram mais próximas, após a colheita de cana-de-açúcar (Tab. 5 e 6) tanto no transecto L e E, indicando possível homogeneidade e escala quase monofractal da respostas da Rp e U.

A Dq da Rp e U em três profundidades do solo e nos transectos da entrelinha e linha (E e L) da cana-de-açúcar estão apresentadas na Figura 8 das dimensões generalizadas.

Segundo Medina e Mejía (2014) as curvas da dimensão generalizada que apresentem um ponto de inflexão entre as pendente da curva em $q=0$, ou seja, a curva apresenta duas pendentes diferentes, podem ser atribuídas da existência de heterogeneidade no sistema e consideradas multifractais, para esse caso, as curva das dimensões generalizadas da Rp e U (Fig. 8 e 9) apresentam possível resposta multifractal, pois nos $q=0$ das curvas foram observadas duas pendentes diferentes.

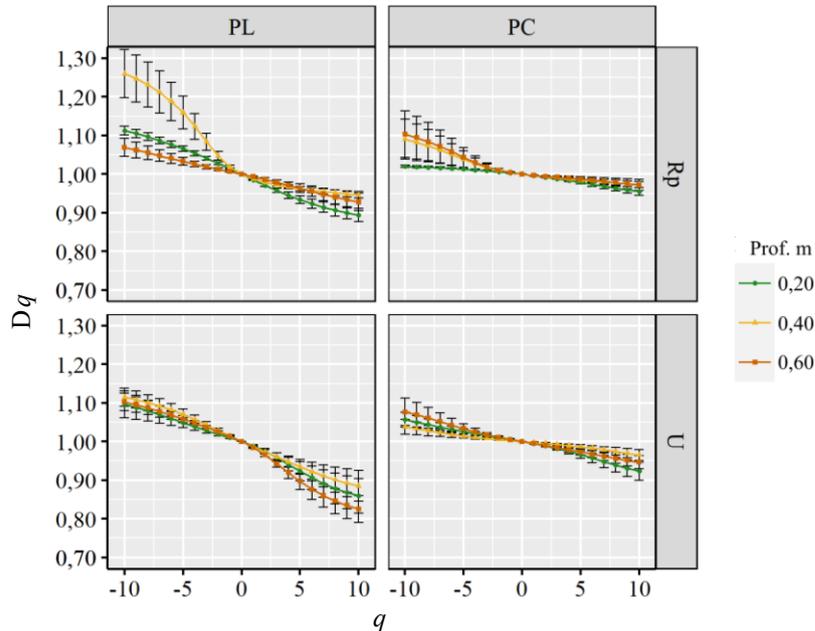


Figura 8. Dimensão generalizada da resistência à penetração (R_p) e conteúdo de água (U) do solo em três profundidades do transecto na entrelinha (E) antes e após a colheita de cana-de-açúcar (PL e PC).

Nas Figuras 8 e 9 apresentam-se as dimensões generalizadas, em função de q contra, embora, vale frisar, que após a colheita, em alguns casos, as curvas da dimensão

generalizada não apresentaram clara divisão entre as pendentes, podendo ser consideradas com características monofractais, como nos casos da pós-colheita da Rp e U da entrelinha e a Rp da linha (e.g. Fig. 8 e Fig. 9) e, além disso, também pode ser observado que as curvas, para as três profundidades do solo, foram muito semelhantes uma com a outra, mostrando que após $q=0$ a pente é mais linear.

Na Figura 8 também foi possível observar diferenças nas curvas das dimensões generalizadas da Rp e U, antes e após a colheita semi-mecanizada da cana, por exemplo, os alcances em Dq foram reduzidos após a colheita, tornando as curvas mais lineares, e perdendo a diferenciação dos pendentes da curva em $q=0$.

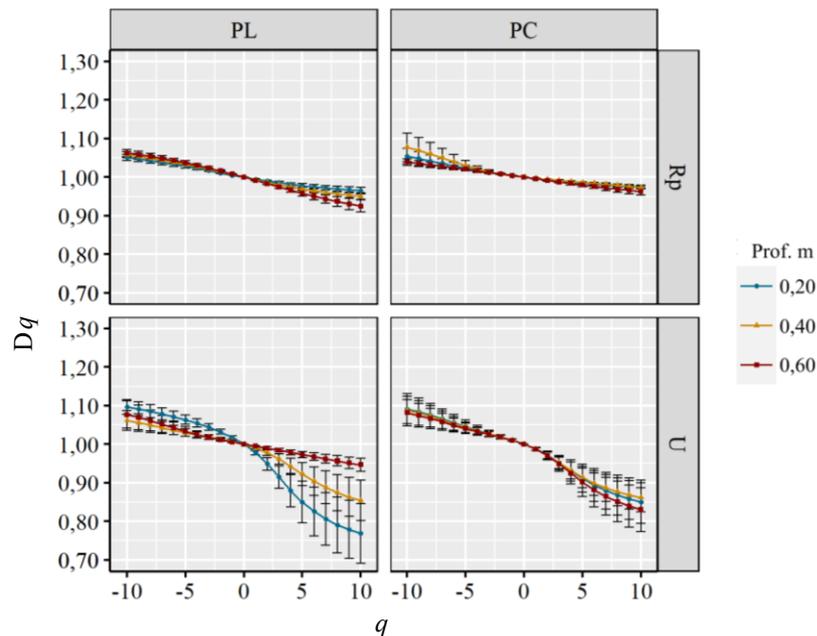


Figura 9. Dimensão generalizada da resistência à penetração (Rp) e conteúdo de água (U) do solo em três profundidade do transecto na linha (L) antes e após a colheita de cana-de-açúcar (PL e PC).

Para o caso do transecto L (Fig. 9) não foram observadas diferenças entre as curvas da dimensão generalizada, tanto entre as profundidades, como entre as fases, ou seja, foi mantida uma resposta monofractal da Rp nas três profundidades e mesmo após a colheita semi-mecanizada.

Para o caso da U, as curvas da dimensão generalizada apresentaram diferenças entre as curvas, considerando a fase antes da colheita e pós-colheita, como entre as profundidades, ou seja, antes da colheita as curvas tiveram características multifractais nas três profundidades tanto no transecto E como no L, logo, após a colheita, o transecto E tomou características monofractais e o transecto L, apesar de apresentar mudanças, manteve a multifractalidade (Fig. 8 e 9).

Conforme Medina e Mejía (2014) quando em $q=0$ a curva divide-se em duas pendentes diferentes, a dimensão generalizada apresenta característica multifractal, e segundo Banerjee *et al.* (2011) quando o Dq muda com os fases q , então o parâmetro é multifractal, caso contrário, quando permanece constante para uma medida unidimensional $Dq=1$, o parâmetro é monofractal, como foi observado nas curvas da dimensão generalizada da Rp e U do solo, após o uso das máquinas para a colheita da cana-de-açúcar (Fig. 8 e 9) principalmente na entrelinha.

Nas Tabelas 4 e 5 também foi possível observar as diferenças de $D_{\max} - D_{\min}$ que caracterizou a heterogeneidade da escala das variáveis, assim, na entrelinha da cana e antes da colheita predominaram valores elevados, quando comparados com os valores após a colheita, indicando que esses valores aprestaram repostas multifractais, Tabelas 5.

Para o caso da entrelinha os valores de $D_{\max} - D_{\min}$ evidenciaram que a Rp perdeu multifractalidade após a colheita da cana, de igual maneira para a U (Tab. 5) sugerindo que o tráfego das máquinas interfere na escala dos valores da Rp e da U ganhando homogeneidade nos valores. Para o caso da linha, onde existiu presença de raízes, a Rp foi mais estável com poucas variações em $D_{\max} - D_{\min}$, e para o caso da U da linha apresentou valor mais elevado do que a Rp e os expressados na entrelinha de cana, evidenciando que U na linha apresentou maior multifractalidade.

Tabela 6. Análises de variância para dimensão generalizada (D_{\min}) da resistência à penetração (Rp) e conteúdo de água do solo (U) nos transectos da linha e entrelinha, antes e após a colheita de cana-de-açúcar.

Variável	N	R ²	R ² Aj.	CV		Variável	N	R ²	R ² Aj.*	CV
Rp - D _{min}	12	0,88	0,35	2,05		U - D _{min}	12	0,99	0,97	5,01
F.V.	SQ	gl	QM	F	p-valor	SQ	gl	QM	F	p-valor
Modelo	0,006	9	0,001	1,668	0,430	0,646	9	0,072	48,894	0,020
Fase	0,002	1	0,002	6,445	0,126	0,222	1	0,222	151,082	0,007
Transecto	0,001	1	0,001	2,915	0,230	0,092	1	0,092	62,777	0,016
Prof.	0,001	2	0,000	1,286	0,438	0,046	2	0,023	15,747	0,060
Fase× Transecto	0,000	1	0,000	0,212	0,691	0,237	1	0,237	161,628	0,006
Fase×Prof.	0,000	2	0,000	0,084	0,923	0,038	2	0,019	12,930	0,072
Transecto×Prof.	0,001	2	0,001	1,352	0,425	0,011	2	0,005	3,603	0,217
Erro	0,001	2	0,000			0,003	2	0,001		
Total	0,006	11				0,649	11			

*R² Aj., coeficiente de determinação ajustado.

Nas análises de variância realizadas, para cada um dos diferentes parâmetros multifractais das dimensões generalizadas, estatisticamente foram encontradas diferenças significativa, especificamente para o parâmetro D_{\min} da U do solo (Tab. 6), na variação

da profundidade e na interação de Fase \times Transecto, e para os outros parâmetros não foram observadas diferenças.

A comparação de médias para o parâmetro D_{\min} da U não apresentou diferenças estatísticas quando comparadas as três profundidades do solo, embora na Tabela 7 podem ser observadas as diferenças significativas na interação do transecto \times fase, ou seja, no transecto E, antes da colheita, o parâmetro fractal D_{\min} apresentou diferenças significativas com a menor média, 0,40.

Na Tabela 7 está apresentada a comparação de médias para as diferenças significativa do parâmetro D_{\min} da U, podendo ser afirmado que estatisticamente nas três diferentes profundidades do solo, as médias não tiveram diferenças, embora na interseção o transecto E e antes da colheita, o parâmetro fractal D_{\min} apresentou a menor média, 0,40.

Tabela 7. Comparação de médias (Teste de Tukey) da dimensão generalizada (D_{\min}) do conteúdo de água no solo (U) nos transectos da linha e entrelinha, antes e após a colheita cana-de-açúcar.

		U - D_{\min}	
α	0,05	DMS	0,21
Fase	Transecto	Média	
AC	E	0,40	A
PC	L	0,85	B
AC	L	0,86	B
PC	E	0,95	B

Letras diferentes têm diferenças significativas ($p < 0,05$)

E: entrelinha; L: linha; PL: plantio; PC; Pós-colheita.

Na Tabela 8 estão apresentados os parâmetros dos espectros de singularidade da R_p e U do solo, no transecto da E, em três diferentes profundidades e em dois Fases, antes e após a colheita da cana-de-açúcar, onde quantifica as diferenças dos $\Delta\alpha$ e respetivamente as diferenças de Δf e o range. Esses valores evidenciaram a complexidade estrutural transectos,

segundo

Krzyszczak *et al.* (2018) as diferenças entre α_{\max} e α_{\min} ($\Delta\alpha$) podem ser considerados como uma medida direta do grau multifractalidade, *e.g.* valores de $\Delta\alpha$ elevados indicam complexidade estrutural, como o caso da R_p , transecto E e camada 0,20 m apresentou o $\Delta\alpha = 0,322$, mais elevado do que nas outras profundidades, evidenciando uma a estrutura mais complexa (Tab. 8).

Em termos gerais, as estruturas mais complexas foram encontradas antes da colheita, e as estruturas mais simples nas camadas mais profundas e principalmente, após a colheita da cana (Tab. 8), podendo sugerir que as respostas da R_p e U, no transecto E, tendem ser mais homogêneas após a colheita e com o uso das máquinas.

Tabela 8. Espectro de singularidade da resistência à penetração (Rp) e conteúdo de água (U) do solo no transecto da entrelinha (E) antes e após a colheita cana-de-açúcar.

	Prof. (m)	q	α_{\min}	q	α_{\max}	α_{\min}	α_0	α_{\max}	$\Delta\alpha$	$\alpha_0 - \alpha_{\min}$	$\alpha_{\max} - \alpha_0$	$f(\alpha_{\min})$	$f(\alpha_{\max})$	Δf	range
Antes da Colheita															
Rp	0,20	5	-5	0,856	1,014	1,178	0,322	0,158	0,164	0,448	0,501	0,053	0,552		
	0,40	5	-5	0,923	1,015	1,242	0,319	0,092	0,227	0,611	0,717	0,106	0,389		
	0,60	5	-5	0,903	1,007	1,093	0,189	0,104	0,086	0,728	0,635	-0,093	0,365		
U	0,20	5	-5	0,886	1,010	1,113	0,227	0,124	0,103	0,728	0,721	-0,007	0,279		
	0,40	5	-5	0,884	1,014	1,173	0,289	0,130	0,159	0,523	0,682	0,159	0,477		
	0,60	5	-5	0,849	1,014	1,139	0,290	0,165	0,125	0,644	0,637	-0,007	0,363		
Após colheita															
Rp	0,20	5	-5	0,919	1,003	1,033	0,114	0,084	0,030	0,893	0,593	-0,300	0,407		
	0,40	5	-5	0,954	1,004	1,080	0,126	0,050	0,076	0,816	0,778	-0,038	0,222		
	0,60	5	-5	0,916	1,007	1,098	0,182	0,091	0,091	0,647	0,686	0,039	0,353		
U	0,20	5	-5	0,912	1,005	1,088	0,176	0,093	0,083	0,684	0,687	0,002	0,316		
	0,40	5	-5	0,943	1,002	1,061	0,119	0,059	0,059	0,755	0,722	-0,033	0,278		
	0,60	5	-5	0,948	1,004	1,094	0,146	0,056	0,090	0,772	0,734	-0,038	0,266		

A complexidade estrutural do espectro multifractal da U apresentou o maior valor de $\Delta\alpha$ na camada 0,20 m do transecto L e antes das colheitas (Tab. 9), embora, após as colheitas a complexidade estrutura do conteúdo de água tendeu a diminuir, tanto para o transecto E como para o L, apresentando o menor valor de $\Delta\alpha$ na camada 0,40 m do transecto E (Tab. 8).

Em termos das camadas do solo, foi evidente que a complexidade estrutura da Rp foi maior nas camadas superficiais, principalmente no transecto E e antes das colheitas (Tab. 8), após a colheita a complexidade diminui, mudando a sequência de complexidade entre as camadas, ou seja, a complexidade da Rp, no transecto E foi crescente com a profundidade.

Tabela 9. Espectro de singularidade da resistência à penetração (Rp) e conteúdo de água do solo (U) em três profundidades do transecto na linha (L) antes e após a colheita cana-de-açúcar.

	Prof. (m)	q	α_{\min}	q	α_{\max}	α_{\min}	α_0	α_{\max}	$\Delta\alpha$	$\alpha_0 - \alpha_{\min}$	$\alpha_{\max} - \alpha_0$	$f(\alpha_{\min})$	$f(\alpha_{\max})$	Δf	range
Antes da Colheita															
Rp	0,20	5	-5	0,946	1,005	1,091	0,145	0,059	0,086	0,648	0,775	0,127	0,352		
	0,40	5	-5	0,926	1,007	1,104	0,178	0,081	0,097	0,602	0,703	0,100	0,398		
	0,60	5	-5	0,892	1,008	1,106	0,214	0,116	0,098	0,629	0,575	-0,055	0,425		
U	0,20	5	-5	0,844	1,020	1,152	0,308	0,176	0,132	0,541	0,703	0,162	0,552		
	0,40	5	-5	0,882	1,008	1,081	0,198	0,126	0,073	0,771	0,702	-0,068	0,389		
	0,60	5	-5	0,920	1,005	1,086	0,167	0,085	0,081	0,767	0,664	-0,104	0,365		
Após colheita															
Rp	0,20	5	-5	0,958	1,004	1,073	0,115	0,046	0,069	0,766	0,811	0,045	0,234		
	0,40	5	-5	0,952	1,003	1,089	0,137	0,051	0,086	0,739	0,753	0,014	0,261		
	0,60	5	-5	0,936	1,004	1,076	0,141	0,068	0,072	0,669	0,690	0,022	0,331		
U	0,20	5	-5	0,868	1,011	1,105	0,236	0,143	0,094	0,751	0,680	-0,071	0,32		
	0,40	5	-5	0,874	1,011	1,099	0,225	0,137	0,088	0,766	0,701	-0,065	0,299		
	0,60	5	-5	0,902	1,011	1,090	0,188	0,109	0,079	0,793	0,809	0,016	0,207		

No transecto L, os valores de $\Delta\alpha$ foram, em geral, menores do que no transecto E, indicando que estruturas multifractais foram menos complexas (Tab. 9); especificamente

com a diferença de $\Delta\alpha$ no próprio transecto L, mas após a colheita existiram pequenas diferenças tanto para Rp e U; apesar de serem mínimas as diferenças, os $\Delta\alpha$ da Rp aumentaram seu valor com a profundidades, contrario com o que aconteceu com U (Tab. 9).

Na Figura 10 estão apresentados os diferentes espectros multifractal em função das $f(\alpha)$ da Rp e U do *Argissolo* nos transectos da entrelinha (E) de cana-de-açúcar em três profundidades diferentes, mais especificamente as respostas espectrais da Rp e U do solo, considerando também as fases culturas PL e PC.

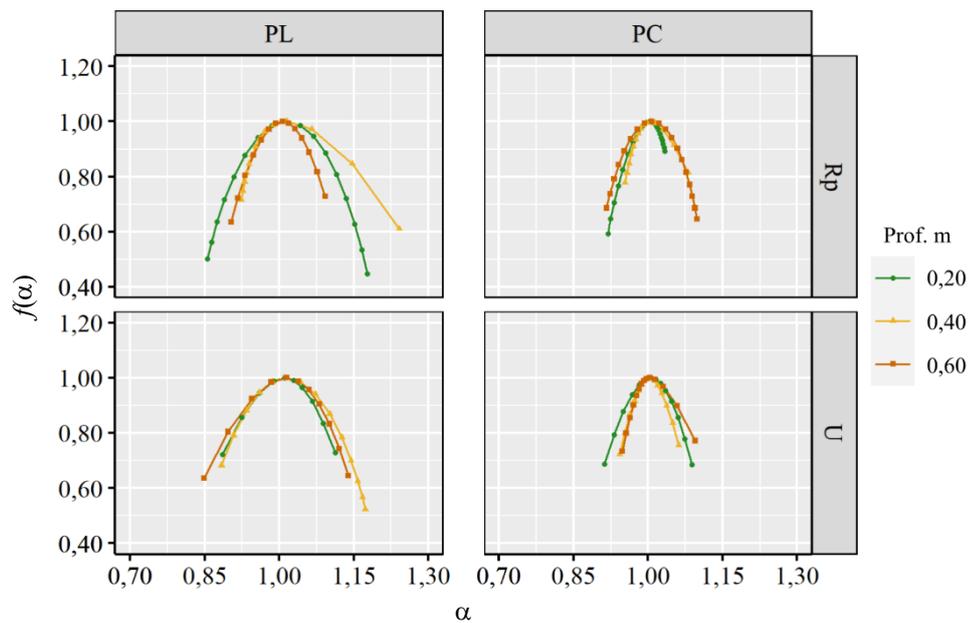


Figura 10. Espectro multifractal da resistência à penetração (Rp) e conteúdo de água (U) do solo em três profundidades do transecto na entrelinha (E) antes e após a colheita de cana-de-açúcar (PL e PC) calculados nas fases estatísticas de ordem q_+ , 1, q_- , 2.

Os espectros multifractais da Rp, na entrelinha (E) de cana-de-açúcar e antes da colheita (PL) apresentam uma forma parabólica, côncava e a abertura para abaixo, mas com diferentes medidas (Fig. 10) e.g. a camada 0,20 m destacou-se por apresentar a maior abertura de α ($\Delta\alpha = 0,322$) e seguidamente a camada de 0,40 m ($\Delta\alpha = 0,319$).

Segundo Makowiec e Fulinski (2010), Krzyszczak *et al.* (2018) e Wu *et al.* (2018) se $\Delta\alpha$ no espectro foi igual a 0 pode ser assumido com monofractal puro, e se for menor do que 0,05 então o espectro também encontra-se em um ambiente monofractal, significa que, os espectros gerados da Rp e U podem ser classificados como multifractais, pois as aberturas do espectro sempre foi $\Delta\alpha > 0,05$ (ver Tab. 8 e 9) e o mínimo valor foi $\Delta\alpha = 0,114$ na Rp do transecto E e após a colheita da cana-de-açúcar.

A simetria do espectro também pode evidenciar a complexidade multifractal, *e.g.* a assimetria de Δf , sendo a inclinação do espectro multifractal, para a direita ou esquerda, indicaria a dominação de valores de pequenos e grandes valores, respetivamente (Herrera *et al.*, 2016), ou seja, quanto mais próximo estejam o $\Delta f \approx 0$, mais simétrico o espectro, embora, si $\Delta f < 0$ inclinado para a esquerda e $\Delta f > 0$ para a direita (HERRERA *et al.*, 2016; KRZYSZCZAK *et al.*, 2018, WANG *et al.*, 2018).

Nesse sentido, os espectros da Rp e U (Fig. 10 e 11) apresentam características assimétricas, embora alguns desses espectros também apresentaram simetria, com $\Delta f \approx 0$, *e.g.* os espectros da U no transecto E, antes e após da colheita, com os menores valores, $\Delta f = 0,002$ e $\Delta f = -0,007$ nas camadas superficial (Tab. 8); na forma espectral também apresentaram formas mais simétricas, como pode ser observado na Figura 10 da U nas duas fases da cana-de-açúcar (PL e PC) destacando leve inclinação para a mano direita e esquerda, respectivamente para as fases.

Em contraste as maiores assimetrias foram na maioria das vezes, observadas na Rp, *e.g.* a maior assimetria foi $\Delta f = -0,300$ na camada de 0,20 m, pós colheita, no transecto E, e na forma espectral também foi evidente a assimetria para mano esquerda (Fig. 10).

No estudo de Herrera *et al.* (2016) avaliando a Rp do solo, em um transecto de 64 pontos, também ratificou as respostas assimétricas nos espectros multifractais e com inclinação para a esquerda, sugerindo a existência de valores elevados na escala de Rp.

Em termos gerais, no transecto E, os espectros multifractais da Rp e da U, após a colheita, reduziram suas medidas, tanto em $\Delta \alpha$ e Δf , e em alguns casos mudaram sua inclinação, por exemplo, o espectro da Rp da camada 0,20 m perdeu a simetria e ficou inclinada totalmente para ao lado da rama esquerda (Fig. 10), sugerindo que após a colheita, a dominância dos valores da Rp foram elevados.

Para o caso da Rp no transecto L, os espectros multifractais apresentaram menores medidas e curvas mais simétricas, tanto antes como após da colheita de cana, sugerindo ambientes multifractais; embora nas camadas de 0,20 e 0,40 m, os espectros apresentam leve inclinação para direita, sugerindo dominância de valores baixos da Rp, da mesma maneira que nos espectros após a colheita (Fig. 11).

Para o caso da U do transecto E, o espectro multifractal, antes da colheita (PL), apresentou medidas mais amplas e relativamente simétricos, podendo ser assumido um ambiente levemente multifractal; o espectro multifractal da camada de 0,40 m esteve

destacado pela sua inclinação para o lado direito, pois sugere que a dominância dos valores de U nessa camada, foram baixos (Fig. 10).

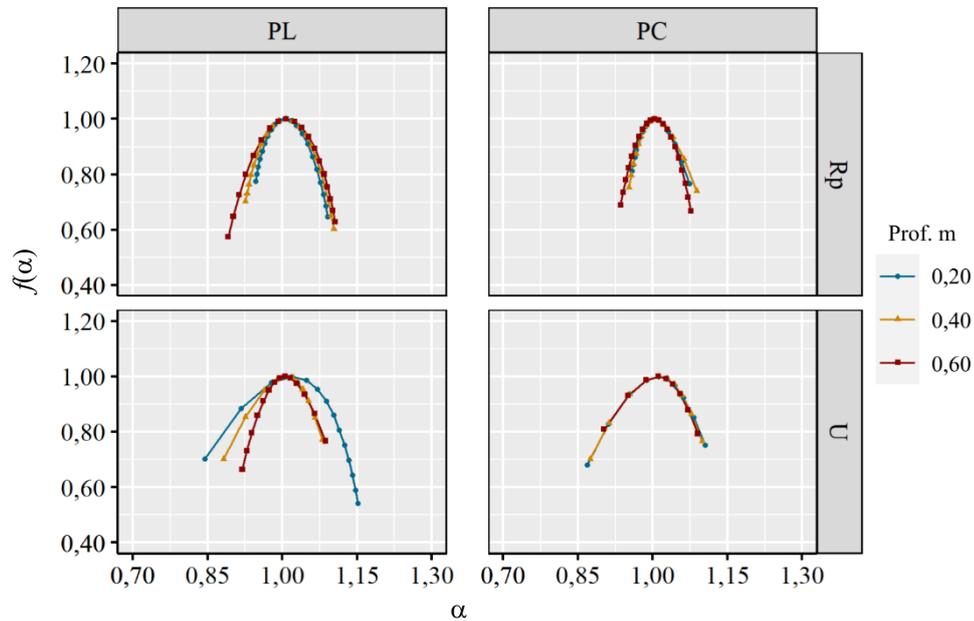


Figura 11. Espectro multifractal da resistência à penetração (Rp) e conteúdo de água (U) do solo no transecto da linha (L) antes e após a colheita de cana-de-açúcar (PL e PC) calculados nas Fases estatísticas de ordem q_+ , 1, q_+ , 2.

Após a colheita, os espectros da U, no transecto E, apresentaram medidas mais reduzidas, embora com curvas mais simétricas, indicando ambiente multifractal, e com leves inclinações para o lado esquerdo, nas camadas de 0,40 e 0,60 m, indicando dominância de valores elevados da U, a diferença da camada superficial que apresentou a inclinação para o lado direito, ou seja, dominância de valores baixos da U (Fig. 10).

Para o caso do espectro da L, a U apresentou antes da colheita, pouca simetria e de amplas medidas, indicando um possível ambiente monofractal, também mostrou que na camada de 0,40 e 0,60, as ramas do espectro tiveram a inclinação para esquerda, sugerindo valor elevado de U no solo, a diferença com a U da superfície antes da colheita (PL) que apresentou inclinação para a direita (Fig. 11).

Após a colheita da cana, os espectros multifractais da U, no transecto L, reduziram suas medidas e ganharam simetria, evidenciando espectro muito semelhantes nas três profundidades dos solos e indicando um ambiente menos monofractal, além disso, esses espectros tomaram leve inclinação para o lado esquerdo, indicando dominância dos valores elevados de U no solo após a colheita da cana-de-açúcar (Fig. 11).

Em termos gerais, os espectros multifractais mudaram, tanto na simetria, quanto sua inclinação, conforme as fases de plantio e colheita (PL e PC) inclusive suas medidas foram reduzidas e a inclinação inverteu sua direção, por exemplo, na superfície do solo,

no transecto E, a inclinação do espectro da R_p antes da colheita foi inicialmente para direita e após colheita da cana-de-açúcar, mudou para esquerda, sugerido que as dominâncias de valores da R_p no solo passaram de pequenos para maiores valores ou de baixa para alta R_p (Fig. 10, Tab. 8).

Na U também foram essas mudanças, após a colheita da cana, os espectros reduziram suas medidas, tanto em Δf como em $\Delta\alpha$ (Tab. 8 e 9), e em alguns casos, as curvas inverteram suas inclinações (Fig. 10 e 11), significa que os ambientes fractais tornaram-se mais multifractais, e quando as inclinações dos espectros mudaram para esquerda, a dominância dos valores da U do solo foram maiores, de outra maneira, o conteúdo de água no solo aumentou, como pode ser visto, mais especificamente na Figuras 11 considerando as fases e as camadas 0,40 e 0,60 m.

4. Conclusões

Após o tráfego das máquinas a resistência à penetração e o conteúdo de água no solo diminuíram, principalmente nas camadas mais profundas do transecto trafegado pelas máquinas de colheita semi-mecanizada de cana-de-açúcar.

A análise multifractal da resistência à penetração e conteúdo de água no solo, evidenciaram respostas multifractais, com maior ou menor expressão nas diferentes fases da cana-de-açúcar, destacando que após o uso das máquinas para a colheita da cana-de-açúcar, as escalas dos valores da resistência à penetração e conteúdo de água no solo homogeneizaram-se, diminuíram sua multifractalidade e tornando ambientes monofractais.

A análises multifractal mostrou-se uma ferramenta potente na avaliação e caracterização das respostas da resistência à penetração e conteúdo de água no solo, permitindo observar diferenças nas diferentes fases da cana-de-açúcar, tanto nos lugares trafegáveis e não trafegáveis e nas diferentes profundidades do solo, e além disso, foi possível observar mudanças nas escalas de valores respostas, após o uso das máquinas utilizadas para a colheita da cana-de-açúcar.

Bibliografia

- Adalberto, G.; Roberto, M.; Maine, L.; *et al.* (2018). Soil physical quality response to sugarcane straw removal in Brazil : A multi- approach assessment, *Soil & Tillage Res*, v. 184, p. 301–309.
- Almquist, V.; Brueck, C.; Clarke, S.; *et al.* (2018). Bioavailable water in coarse soils: A fractal approach. *Geoderma*, v. 323, p. 146–155.

- Aquino, G. S.; De Conti Medina, C.; Junior, A. L.; *et al.* (2015). Sistema radicular e produtividade de soqueiras de cana-de-açúcar sob diferentes quantidades de palhada. *Pesqui. Agropecua. Bras.*, v. 50, p. 1150–1159.
- Banerjee, S.; He, Y.; Xulin, Si, B. C. (2011). Spatial relationships between leaf area index and topographic factors in a semiarid grassland: Joint multifractal analysis. *Aust. J. Crop Sci.*, v. 5, p. 756–763.
- Barbosa, L. C.; Sérgio, P.; Magalhães, G.; *et al.* (2019). Soil physical quality associated with tillage practices during sugarcane planting in south-central Brazil. *Soil & Tillage Res.*, v. 195, p. 1–11.
- Biswas, A.; Cresswell, H. P.; Bing, C. S. (2012). Application of multifractal and joint multifractal analysis in examining soil spatial variation: A review, in: Ouadfeul, S,-A, (Ed). *Fractal Analysis and Chaos in Geosciences*, Croatia, v. p. 109–130.
- Bordonal, R.; Carvalho, J. L.; Lal, R.; *et al.* (2018). Sustainability of sugarcane production in Brazil, A review, *Agron, Sustain. Dev.*, v. 38, p. 12–23.
- Burgos Hernández, T. D.; Slater, B. K.; Tirado Corbalá, R. (2019). Assessment of long-term tillage practices on physical properties of two Ohio soils. *Soil & Tillage Res.*, v. 186, p. 270–279.
- Busari, M. A.; Singh Kukal, S.; Kaur, A.; *et al.* (2015). Conservation tillage impacts on soil, crop and the environment, *Int, Soil Water Conserv. Res.*, v. 3, p. 119–129.
- Busscher, W. J.; Bauer, P. J.; Camp, C. R. (1997). Correction of cone index for soil water content differences in a coastal plain soil. *Soil & Tillage Res.*, v. 43, p. 205–217.
- Caniego, F. J.; Espejo, R.; Martín, M. A.; *et al.* (2005). Multifractal scaling of soil spatial variability, *Ecological Modelling*, v. 182, p. 291–303.
- da Silva, W. M.; Bianchini, A.; da Cunha, C. A. (2016). Modeling and correction of soil penetration resistance for variations in soil moisture and soil bulk density. *Eng, Agric.*, v. 36, p. 449–459.
- de Lima, R. P.; da Silva, A. P.; Giarola, N. F.; *et al.* (2017). Changes in soil compaction indicators in response to agricultural field traffic, *Biosyst. Eng.*, v. 162, p. 1–10.
- dos Santos, H. G.; Jacomine, P. T.; dos Anjos, L. H.; de Oliveira, V. A.; *et al.* (2018). Brazilian soil classification system. *Embrapa Solos-Livro técnico (INFOTECA-E)*.
- Esteban, D. A.; de Souza, Z. M.; Tormena, C, A.; *et al.* (2019). Soil compaction, root system and productivity of sugarcane under different row spacing and controlled traffic at harvest. *Soil & Tillage Res.*, v. 187, p. 60–71.
- Evertsz, C. J. ; Mandelbrot, B. (1992) *Multifractal measures. Chaos and Fractals: New Frontiers in Science*, Springer-Verlag, New York, v. 1092.
- García-Tomillo, A.; Figueiredo, T. D.; Dafonte, J. D. (2018). Effects of machinery trafficking in an agricultural soil assessed by Electrical Resistivity Tomography (ERT). *Open Agric.*, v. 3, p. 378–385.
- Halsey, T, C.; Jensen, M, H.; Kanadoff, L, P.; Procaccia, I.; Shariman, B, I, (1986). Fractal measures and their singularities: the characterization of strange sets. *Physical Review A*, v. 33, p. 1141-1151.
- Hentschel, H. G.; Procaccia, I, (1983). The infinite number of generalized dimensions of fractals and strange attractors. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, v. 8, p. 435-444.

- Herrera, J. L.; de Tejedor, T. H.; Saa-Requejo, A.; *et al.* (2016). Effects of tillage on variability in soil penetration resistance in an olive orchard. *Soil Res.*, v. 54, p. 134–143.
- Imhoff, S.; da Silva, A. P.; Ghiberto, P. J.; *et al.* (2016). Physical quality indicators and mechanical behavior of agricultural soils of Argentina. *PLoS One*, v. 11, p. 1–21.
- Jemberu, W.; Baartman, J. E.; Fleskens, L.; Selassie, Y. G.; *et al.* (2017). Assessing the variation in bund structure dimensions and its impact on soil physical properties and hydrology in Koga catchment, Highlands of Ethiopia. *Catena*, v. 157, p. 195–204.
- Krzyszczak, J.; Baranowski, P.; Zubik, M.; *et al.* (2018). Multifractal characterization and comparison of meteorological time series from two climatic zones. *Theor. Appl. Climatol.*, v. 137.3-4, p. 1–14.
- Lee, C. K. (2002). Multifractal characteristics in air pollutant concentration times series, *Water Air Soil Pollut.* v. 135, p. 389-409.
- Leiva, J. O.; Silva, R. A.; Buss, R. N.; *et al.* (2019). Multifractal analysis of soil penetration resistance under sugarcane cultivation. *Rev. Bras., Eng., Agrícola e Ambient.*, v. 23, p. 538–544.
- Liao, K.; Lai, X.; Zhou, Z.; *et al.* (2017). Applying fractal analysis to detect spatio-temporal variability of soil moisture content on two contrasting land use hillslopes. *Catena*, v. 157, p. 163–172.
- Lima, R. P.; Rolim, M. M.; Oliveira, V. S.; *et al.* (2015). Load-bearing capacity and its relationships with the physical and mechanical attributes. *J. Terramechanics*, v. 58, p. 51–58.
- Makowiec, D.; Fulinski, A. (2010). Multifractal detrended fluctuation analysis as the estimator of Long-range dependence. *Acta Phys. Pol., B.*, v. 41, p. 1025–1050.
- Martínez, F. S.; Martín, M. A.; Caniego, F. J.; *et al.* (2010). Multifractal analysis of discretized X-ray CT images for the characterization of soil macropore structures. *Geoderma*, v. 156, p. 32–42.
- Medina, G.; Mejía, A. (2014). Análisis multitemporal y multifractal de la deglaciación de la Cordillera Parón en los Andes de Perú. *Ecol. Apl.*, v. 13, p. 35–42.
- Mohammadi, M.; Shabanpour, M.; Mohammadi, M. H.; *et al.* (2019). Characterizing spatial variability of soil textural fractions and fractal parameters derived from particle size distributions. *Pedosphere*, v. 29, p. 224–234.
- Oliveira Filho, F. X, Miranda, N. O.; Medeiros, J. F.; *et al.* (2015). Zona de manejo para preparo do solo na cultura da cana-de-açúcar. *Rev. Bras, Eng, Agrícola e Ambient.*, v. 19, p. 186–193.
- Ortiz, P. F.; Rolim, M. M.; de Lima, J. L.; *et al.* (2017). Physical qualities of an Argissolo under sugarcane and Atlantic forest in Brazil. *Geoderma Reg.*, v. 11, p. 62–70.
- Pérez, L. D.; Millán, H.; González-Posada, M. (2010). Spatial complexity of soil plow layer penetrometer resistance as influenced by sugarcane harvesting: A prefractal approach. *Soil & Tillage Res.*, v. 110, p. 77–86.
- Sá, M. A.; Junior, J. D.; Franz, C. A.; *et al.* (2016). Qualidade física do solo e produtividade da cana-de-açúcar com uso da escarificação entre linhas de plantio. *Pesqui. Agropecu. Bras.*, v. 51, p. 1610–1622.
- Sağlam, M.; Dengiz, O. (2017). Spatial variability of soil penetration resistance in an alluvial delta plain under different land uses in middle Black Sea Region of Turkey, *Arch, Agron. Soil Sci.*, v. 63, p. 60–73.

- Satiro, L. S.; Cherubin, M. R.; Safanelli, J. L.; *et al.* (2017). Sugarcane straw removal effects on Argissolos and Oxisols in south-central Brazil. *Geoderma Reg*, v. 11, p. 86–95.
- Scarpare, F. V.; de Jong van Lier, Q.; de Camargo, L.; (2019). Tillage effects on soil physical condition and root growth associated with sugarcane water availability. *Soil & Tillage Res.*, v. 187, p. 110–118.
- Silva, R. P.; Rolim, M. M.; Gomes, I. F.; *et al.* (2018). Numerical modeling of soil compaction in a sugarcane crop using the finite element method. *Soil & Tillage Res.*, v. 181, p. 1–10.
- Silva-Olaya, A. M.; Eduardo, C.; Cerri, P.; *et al.* (2017). Comparison of sampling methods to evaluate sugarcane root system. *Revista de Ciências Agrícolas*, v. 34, p. 7–16.
- Siqueira, G. M.; Silva, E. F.; Montenegro, A. A.; *et al.* (2013). Multifractal analysis of vertical profiles of soil penetration resistance at the field scale, *Nonlinear Process. Geophys*, v. 20, p. 529–541.
- Siqueira, G. M.; Silva, Ê. F.; Vidal-Vázquez, E.; *et al.* (2018). Multifractal and joint multifractal analysis of general soil properties and altitude along a transect. *Biosyst. Eng.*, v. 168, p. 105–120.
- Soil Survey Staff (2014). *Keys to soil taxonomy: Twelfth Edition*. Washington, DC, USA. 372p.
- Souza, G. S.; de Souza, Z. M.; Cooper, M.; *et al.* (2015). Controlled traffic and soil physical quality of an Oxisol under sugarcane cultivation. *Sci. Agric.*, v. 72, p. 270–277.
- Stolf, R. (1991). Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência de solo. *Revista brasileira de ciência do solo*, v. 15, p. 229-235.
- Susha Lekshmi, S. U.; Singh, D. N.; Shojaei Baghini, M. (2014). A critical review of soil moisture measurement. *Measurement*, v. 54, p. 92–105.
- Teixeira, P. C.; Donagemma, G. K.; Fontana, A.; *et al.* (2017). *Manual de métodos de análise de solo*, Brasília: Embrapa Solos.
- Tim Chamen, W. C.; Moxey, A. P.; Towers, W.; *et al.* (2015). Mitigating arable soil compaction: A review and analysis of available cost and benefit data. *Soil & Tillage Res.*, v. 146, p. 10–25.
- Tormena, C. A.; Karlen, D. L.; Logsdon, S.; *et al.* (2017). Corn stover harvest and tillage impacts on near-surface soil physical quality. *Soil & Tillage Res.*, v. 166, p. 122–130.
- Vidal-Vázquez, E.; Camargo, O. A.; Vieira, S. R. (2013). Multifractal Analysis of Soil Properties along Two Perpendicular Transects. *Vadose Zo. J.*, v. 12, p. 1-13.
- Wang, F.; Wang, J.; Wang, Y. (2019). Using multi-fractal and joint multi-fractal methods to characterize spatial variability of reconstructed soil properties in an opencast coal-mine dump in the Loess area of China. *Catena*, v. 182, p. 104111.
- Warrick, A. W.; Nielsen, D. R.; Hillel, D. (1980). Spatial variability of soil physical properties in the field, In: *Applications of Soil Physics*, Cap,2, Academic, New York.
- Wu, Y.; He, Y.; Wu, M.; *et al.* (2018). Multifractality and cross-correlation analysis of streamflow and sediment fluctuation at the apex of the Pearl River Delta. *Sci. Rep.*, v. 8, p. 16553.