

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO

THAÍS FERNANDES DE ASSUNÇÃO

**VARIABILIDADE ESPACIAL E TEMPORAL DOS ATRIBUTOS
FÍSICOS DO SOLO CULTIVADO COM CANA-DE-AÇÚCAR SOB
PRÁTICAS DE MECANIZAÇÃO**

RECIFE

2018

Thaís Fernandes de Assunção
Geógrafa

**VARIABILIDADE ESPACIAL E TEMPORAL DOS ATRIBUTOS FÍSICOS DO
SOLO CULTIVADO COM CANA-DE-AÇÚCAR SOB PRÁTICAS DE
MECANIZAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação Ciência do Solo, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo

Orientador: Prof. Dr. Brivaldo Gomes de Almeida

Coorientadores: Prof. Dr. José Coelho de Araújo Filho

Profª Drª Maria Betânia Galvão dos Santos Freire

RECIFE

2018

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Nome da Biblioteca, Recife-PE, Brasil

A851v Assunção, Thaís Fernandes de
Variabilidade espacial e temporal dos atributos físicos do solo cultivado com cana-de-açúcar sob práticas de mecanização / Thaís Fernandes de Assunção. – 2018. 92 f. : il.

Orientador: Brivaldo Gomes de Almeida.
Coorientadores: José Coelho de Araújo Filho e Maria Betânia Galvão dos Santos Freire.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Recife, BR-PE, 2018. Inclui referências.

1. Geoestatística 2. Subsolagem 3. Física do solo 4. Gradagem 5. Cana-de-açúcar 6. Sulcador I. Almeida, Brivaldo Gomes de, orient. II. Araújo Filho, José Coelho de, coorient. III. Freire, Maria Betânia Galvão dos Santos, coorient. IV. Título

CDD 631.4

THAÍS FERNANDES DE ASSUNÇÃO

Variabilidade espacial e temporal dos atributos físicos do solo cultivado com cana-de-açúcar sob práticas de mecanização

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo.

Aprovada em 27 de Fevereiro de 2018

Prof. Dr. Brivaldo Gomes de Almeida

Orientador

Universidade Federal Rural de Pernambuco

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Edivan Rodrigues de Souza

Universidade Federal Rural de Pernambuco

Prof. Dr. Ênio Farias de França e Silva

Universidade Federal Rural de Pernambuco

Dedico este trabalho aos meus pais, a minha irmã, ao meu companheiro e a todos que acreditaram em mim.

AGRADECIMENTOS

Quando finalizamos um ciclo, nós decidimos qual a melhor maneira de concluí-lo. Nesse momento, eu decido ser grata. Agradeço imensamente a Deus e a Nossa Senhora da Conceição, na qual solicitei diversas ajudas e fui até seu Santuário inúmeras vezes subindo o Morro com os pés descalços, mas com um sorriso largo de felicidade.

Sou profundamente grata por todo apoio, emocional e financeiro, promovidos por minha mãe e meu pai. A minha irmã, Thamires, eu possuo uma enorme gratidão por toda ajuda prestada ao longo de todo esse processo. Mesmo você não possuindo nenhum vínculo com a pesquisa, não hesitou em um só momento em me ajudar. Abdicando de seu tempo para ficar, em muitos momentos, até o final da noite em um laboratório comigo, independente do dia, incluindo finais de semana e feriados. Obrigada!!!

Agradeço imensamente ao meu namorado, Elder, por todo companheirismo ao longo desse processo. Mesmo estando distante, em quase todos os momentos, tua presença era sentida e fortalecida. Obrigada por me incentivar e nunca permitir que eu esmorecesse e, quando a tristeza chegava, tu prontamente achavas uma maneira de reverter à situação. Obrigada pelas piadas, conversas, conselhos, por ser tão paciente e sempre acreditar em mim e em nós.

Muito obrigada aos meus amigos conquistados na Geografia e que perduram até hoje, mesmo à distância, Sheila, Lucas, Rafael, Anthony e Jorge pelas conversas e gargalhadas das inúmeras situações que a vida nos proporciona. Obrigada por vocês permanecerem ao meu lado, mesmo à distância!!!

Agradeço também aos amigos que a vida me presenteou durante esse longo e difícil processo no mestrado, principalmente ao grupo “Amizade Capes 5” Eva, Leandro, Adriana, David e Rita que, durante esses dois anos, pudemos nos ajudar mutuamente seja pessoalmente ou pelos longos períodos que passamos no Skype estudando. Em especial, a Evinha que, nesse período, pudemos nos fortalecer e perceber o quanto somos fortes. Aos meus amigos não acadêmicos, Marcos, Paulo, Jacqueline, Yorhan, Romero, Amanda e João Vitor pelas conversas e cuidados.

Em especial, agradeço também por toda ajuda prestada por Bruno e Thiago ao longo desse processo de pesquisa, sem a ajuda de vocês nada disso teria sido realizado. Gratidão por toda ajuda!!

A Hernan, Cartiele, Fernanda, Talmo, Aglair, Mayanne, Hidelblandi, Cecília, Camila, Monalisa, Edvan Uchôa, Tiago, Vanessa, Pedro (Química), Paula, Steffanny, Jameson, Arthur,

Pedro, Simone e tantos outros que apareceram durante este momento e puderam cada um de sua maneira me ajudar.

Durante este processo tive uma ajuda fundamental realizada através da terapia pelo psicólogo Diogo Marroquim, agradeço imensamente todo apoio e aconselhamentos. Também ao longo do meio deste processo, encontrei na música uma válvula de escape, por meio do Grupo Paranambuca, onde pude retirar limites que eram impostos por mim e dos quais existia apenas na minha cabeça. Como foi prazeroso tocar ao longo de um ano e, principalmente, me apresentar no Carnaval. Meu muito obrigada aos Mestres Fernando, Aninha e Lua; a todo o grupo que são uma verdadeira família e as lindas pessoas do Agbê. Gratidão por todos os momentos em que eu achava que não conseguiria e segui forte, mesmo com dores, ao longo de todos os ensaios e no carnaval.

Agradeço a Pós-graduação em Ciência do Solo, em especial, a Socorro que me ajudava sempre. Sou grata a dois professores que, ao longo desses dois anos, tiveram empatia comigo e foram extremamente gentis, a Professora Caroline Biondi e o Professor Mario Lira. A docência não deve se restringir a sala de aula e eles exerceram grandiosamente bem seus papéis de professores comigo.

Agradeço também ao meu orientador que pôde me ajudar sempre que solicitado durante esse processo de aprendizado. Meu muito obrigado ao Professor Ênio e ao Daniel Dantas por permitirem o uso dos equipamentos e por me ajudarem na hora que mais precisei para finalizar esta pesquisa. Gratidão ao Professor Benedito por confiar a mim suas turmas para ministrar aulas e por me ajudar no trabalho apresentado no XXXVI Congresso Brasileiro de Ciência do Solo sobre suas turmas e o processo de ensino-aprendizagem.

À Fundação de Amparo a Ciência e Tecnologia de PE- FACEPE pela concessão da bolsa de estudos que me ajudou na continuidade do mesmo.

Agradeço imensamente a ajuda prestada na Estação Experimental de Cana-de-Açúcar do Carpina (EECAC – UFRPE) pelo Dr. Djalma Euzébio Simões Neto e, principalmente, pelo Evanilson Paulino que não mediu esforços para me ajudar. Durante minha última coleta, onde eu só tinha a minha irmã para me auxiliar, o mesmo se preocupou conosco e disponibilizou um dos trabalhadores da EECAC, em que tive a grande oportunidade de conhecer e trabalhar com Seu João que, desde os 13 anos de idade, trabalha cortando cana e hoje, aos 57 anos, continua neste mesmo ofício, mas em momento algum, me deixou desamparada durante a coleta e pudemos conversar sobre a vida. Obrigada também aos outros trabalhadores que viram o sofrimento meu e de minha irmã para carregar as amostras e paravam para nos ajudar. Gratidão!!!

Aos que por ventura acabei esquecendo, minha gratidão vai além de palavras, elas são expressas pelo carinho que possuo por todos. Gratidão por todos que apareceram durante todo este momento e que me ajudaram de sua forma.

Obrigada!!!

“Uma criança, um professor, um livro e uma caneta podem mudar o mundo. Educação é solução.”

(Malala Yousafzai)

Variabilidade espacial e temporal dos atributos físicos do solo cultivado com cana-de-açúcar sob práticas de mecanização

RESUMO

O Brasil destaca-se na atividade canavieira como o maior produtor mundial de cana-de-açúcar. O estado de Pernambuco ocupa a sétima colocação no ranking nacional e, no Nordeste, atua como o segundo maior produtor desta região. Porém, algumas práticas adotadas pelas usinas, principalmente às associadas ao uso e manejo mecanizado dos solos coesos, impedem um melhor destaque no setor sucrocooleiro. A continuidade de práticas inadequadas no manejo mecanizado do solo consorciado ao déficit hídrico influencia diretamente na modificação das características do solo, principalmente, nos seus atributos físicos. Neste sentido, técnicas da agricultura de precisão, como a geoestatística, são atualmente utilizadas para auxiliar na melhoria dos solos e, assim, promover elevados rendimentos aos produtores. Desta forma, o objetivo do presente trabalho é avaliar a variabilidade espacial e temporal dos atributos físicos do solo em relação às práticas de mecanização. O estudo foi conduzido na Estação Experimental de Cana-de-Açúcar do Carpina (EECAC- UFRPE), onde foi delineado um grid de 70 x 70 m, com intervalos de 10 m, entre cada ponto, nas profundidades de 0- 0,30 m e 0,30- 0,60 m. Foram realizadas três coletas ao longo de um ano, sendo a primeira realizada seis meses após o uso da subsolagem (T6), a segunda coleta após 12 da subsolagem, porém, com a realização da gradagem+ sulcador + plantio (T12) e, a última coleta realizada após 18 meses do primeiro manejo mecanizado, mas onde a cana-de-açúcar já estava próxima à colheita (T18). Foram avaliados a Resistência do solo à penetração de raízes em campo e a umidade do solo durante a realização do ensaio; densidade do solo; a rede de poros do solo e posterior construção da curva característica de retenção de água no solo (CCRAS); Índice S; a condutividade hidráulica saturada e a Resistência tênsil do solo. Todos os dados foram submetidos à estatística descritiva, teste de média e a geoestatística. Os resultados indicaram que o manejo realizado no T6 e T18 apresentaram os melhores resultados no que se refere à qualidade física do solo, não ocorrendo efeito acumulativo das técnicas de manejo para o T12. A técnica de geoestatística indicou que a maioria dos atributos apresentou grau de dependência espacial variando de forte a moderada, atributos como densidade do solo e umidade apresentaram efeito pepita puro, sendo necessário aumento da malha amostral. Neste sentido, evidencia-se que após seis meses do uso da subsolagem (T6) e o efeito do sistema radicular da cana-de-açúcar em T18, atuaram na melhoria da qualidade física do solo, sendo assim, diante dos efeitos negativos promovidos pelo manejo em T12, sugere-se que o mesmo não seja realizado, sendo praticada apenas a subsolagem e, em seguida, por meio do sulcador, seja realizado o plantio.

Palavras-chave: Geoestatística. Subsolagem. Gradagem + sulcador. Física do solo.

Spatial and temporal variability of the physical attributes of soil cultivated with sugarcane under mechanization practices

ABSTRACT

Brazil stands out in the cane industry as the world's largest producer of sugarcane. The state of Pernambuco occupies the seventh place in the national ranking and, in the Northeast, it acts as the second largest producer of this region. However, some practices adopted by the plants, especially those associated to the use and mechanized management of cohesive soils, prevent a better prominence in the sugarcane industry. The continuity of unsuitable practices in the mechanized management of the soil consortium to the water deficit directly influences the modification of the soil characteristics, mainly in its physical attributes. In this sense, precision farming techniques, such as geostatistics, are currently used to help improve soils and thus promote high yields to producers. In this way, the objective of the present work is to evaluate the spatial and temporal variability of the physical attributes of the soil in relation to the mechanization practices. The study was conducted at the Experimental Station of Sugar Cane of Carpina (EECAC-UFRPE), where a grid was delineated with intervals of 10 m, making a total of 49 georeferenced points, at the depths of 0-0.30 m and 0.30 -0.60 m. Three collections were carried out over a year, the first one being carried out six months after the use of the subsoiling (T6), the second collection after 12 of the subsoiling, but with the disc harrow + furrow opener+ planting (T12) and the last collection performed after 18 months of the first mechanized management, but where sugarcane was already close to harvest (T18). The soil resistance to field penetration and soil moisture during the test were evaluated; soil density; the pore network of the soil and subsequent construction of the soil water retention characteristic curve (SWRCC); Index S; the saturated hydraulic conductivity and the tensile strength of the soil. All data were submitted to descriptive statistics, mean test and geostatistics. The results indicated that the management performed in T6 and T18 presented the best results regarding the physical quality of the soil, and there was no cumulative effect of management techniques for T12. The geostatistical technique indicated that most of the attributes presented a degree of spatial dependence varying from strong to moderate, attributes such as soil density and humidity showed a pure nugget effect, and it is necessary to increase the sample mesh. In this sense, it is evident that after six months of the use of the subsoil (T6) and the effect of the root system of the sugarcane in T18, they worked in the improvement of the physical quality of the soil, being, therefore, the negative effects promoted by the management in T12, it is suggested that it should not be carried out, only subsoiling being practiced and then, through the furrower, the planting is carried out.

Keywords: Geostatistics. Subsoiling. Disc harrowing + furrow opener. Soil physics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-Localização da EECAC em relação ao município de Carpina - PE	38
Figura 2- Climograma da EECAC (2016-2017)	39
Figura 3-Distribuição dos pontos que foram utilizados na área de coleta.....	40
Figura 4-Subsolador utilizado na área experimental	40
Figura 5- Grade aradora utilizada em campo	41
Figura 6- Sulcador utilizado na área experimental.....	41
Figura 7- Plantio da cana-de-açúcar	42
Figura 8- Resistência do Solo à Penetração de Raízes in situ em função dos tempos de coleta e suas respectivas profundidades.....	59
Figura 9- Curva Característica de Retenção de Água no Solo (CCRAS) ajustada ao modelo van Genuchten na camada 0- 0,30 m	61
Figura 10- Curva Característica de Retenção de Água no Solo (CCRAS) ajustada ao modelo de van Genuchten na camada 0,30- 0,60 m.....	61
Figura 11-- Mapas de Krigagem das frações granulométricas do solo em área de cana-de-açúcar nas suas respectivas profundidades	70
Figura 12- Mapas de Krigagem para % Umidade em T6; T12 e T18 (0-0,30m).....	71
Figura 13- Mapas de Krigagem para Densidade do Solo em T12 e T18 (0-0,30m)	73
Figura 14- Mapas de Krigagem para Resistência do Solo à Penetração de Raízes em T6; T12 e T18 (0- 0,30m).....	74
Figura 15- Mapas de Krigagem para % Porosidade Total em T6; T12 e T18 (0- 0,30 m)	75
Figura 16- Mapas de Krigagem para % Umidade em T6; T12 e T18 (0,30- 0,60 m).....	76
Figura 17- Mapas de Krigagem para Resistência do solo à penetração de Raízes em T6; T12 e T18 (0,30- 0,60 m).....	77
Figura 18- Mapas de Krigagem para % Porosidade Total em T6; T12 e T18 (0,30- 0,60 m) .	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Classes de Resistência do Solo à Penetração de Raízes (RP)	46
Tabela 2- Granulometria do Argissolo Amarelo distrocoeso utilizado no experimento (valores médios)	49
Tabela 3- Caracterização química do Argissolo Amarelo distrocoeso utilizado no experimento	49
Tabela 4- Estatística descritiva e teste de médias dos poros do solo em área de cana-de-açúcar sob manejo na camada (0-0,30 m).....	52
Tabela 5- Estatística descritiva e teste de médias dos poros do solo em área de cana-de-açúcar sob manejo na camada (0,30- 0,60 m).....	53
Tabela 6- Estatística descritiva e teste de médias para os atributos físicos do solo em área de cana-de-açúcar sob manejo na camada (0- 0,30 m).....	56
Tabela 7- Variação em % nos valores de Ksat ao longo do tempo na camada 0- 0,30 m.....	56
Tabela 8- Estatística descritiva e teste de médias para os atributos físicos do solo em área de cana-de-açúcar sob manejo na camada (0,30- 0,60 m).....	57
Tabela 9- Variação em % nos valores de Ksat ao longo do tempo na camada 0,30- 0,60 m...	57
Tabela 10- Parâmetros de ajuste (coeficientes) da CCRAS e o módulo do Índice- S para os diferentes tratamentos nas camadas de 0- 0,30 m e 0,30- 0,60 m	63
Tabela 11- Parâmetros geoestatísticos da análise granulométrica do solo sob manejo.....	65
Tabela 12- Parâmetros geoestatísticos dos atributos físicos do solo em detrimento do manejo sob cultivo de cana-de-açúcar nas camadas 0- 0,30 m e 0,30- 0,60 m.....	66

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	24
1.1 Hipótese	25
1.2 Objetivo Geral.....	25
1.3 Objetivos Específicos	25
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	26
2.1 O CULTIVO DA CANA-DE-AÇÚCAR NO BRASIL E NO ESTADO DE PERNAMBUCO.....	26
2.2 O USO E MANEJO DO SOLO E SEUS EFEITOS SOBRE OS ATRIBUTOS FÍSICOS	28
2.3 VARIABILIDADE ESPACIAL E TEMPORAL DOS ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO.....	35
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	37
3.1 LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL	37
3.2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL	39
3.3 Cronologia do manejo convencional	40
3.4 Coleta dos solos da área experimental	42
3.4.1 PRIMEIRA COLETA (TEMPO 6 – T6).....	43
3.4.2 SEGUNDA COLETA (TEMPO 12 – T12).....	43
3.4.3 TERCEIRA COLETA (TEMPO 18 - T18).....	43
3.5 DETERMINAÇÃO DOS ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO	43
3.5.1 UMIDADE GRAVIMÉTRICA (U_{RP})	44
3.5.2 DENSIDADE DO SOLO (DS).....	44
3.5.3 CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DE SOLOS SATURADOS (K_{SAT})	45
3.5.4 RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO DE RAÍZES (RP) - EM CAMPO.....	45
3.5.5 CURVA CARACTERÍSTICA DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO (CCRAS).....	46
3.5.6 MODELO MATEMÁTICO DE VAN GENUCHTEN (1980).....	46
3.5.7 MODELO MATEMÁTICO PROPOSTO POR DEXTER (2004) - ÍNDICE S.....	47
3.5.8 RESISTÊNCIA TÊNIL DE AGREGADOS DO SOLO (RT)	47
3.5.9 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA.....	48
3.5.10 GRAU DE FLOCULAÇÃO (%)	48
3.6 ANÁLISE QUÍMICA DOS SOLOS	48
3.7 ANÁLISE ESTATÍSTICA E GEOESTATÍSTICA.....	50
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	51

4.1 INDICADORES ESTATÍSTICOS DOS ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO	51
4.2 CURVA CARACTERÍSTICA DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO (CCRAS) E ÍNDICE S.....	60
4.3 ANÁLISE GEOESTATÍSTICA E KRIGAGEM (MODELOS DE ELEVAÇÃO)	64
5 CONCLUSÕES	79
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	80
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81

1 INTRODUÇÃO

O Brasil configura-se no mercado agrícola mundial como o maior produtor de cana-de-açúcar. A atividade canavieira destaca-se no âmbito socioeconômico justamente pela variedade de seus subprodutos destacando-se, principalmente, na produção de açúcar e álcool (etanol) que são destinados a diversos mercados que auxiliam para acirrar sua competitividade no comércio internacional (CARVALHO et al., 2008; SILVA et al., 2015).

A área de cultivo destinada a agroindústria canavieira, no Brasil, corresponde a uma estimativa de cerca de 8.766,5 milhões de hectares, sendo produzidos na presente safra 2017/2018, cerca de 646.337,4 milhões de toneladas de cana-de-açúcar. O estado de São Paulo atua como o maior polo sucroalcooleiro do país, sendo responsável por 54% da cana-de-açúcar produzida. No Nordeste, o estado de Pernambuco contribui com cerca de 240,7 mil hectares de área plantada sendo considerado o segundo maior produtor da região, perdendo apenas para o estado de Alagoas com área estimada em 325,2 mil hectares. (Companhia Nacional de Abastecimento- CONAB, 2017).

Entretanto, apesar do estado de Pernambuco apresentar a segunda colocação na Região Nordeste, devido aos rendimentos apresentados no ramo sucroalcooleiro, decorrente de investimentos em novas variedades de cana e na aplicação adequada de suprimentos agrícolas, alguns problemas no que concerne à irregularidade na distribuição pluviométrica, a ocorrência de horizontes minerais subsuperficiais coesos, além do uso e manejo destes solos auxiliam para que tal expansão seja reduzida (CINTRA; LIBARDI, 1998; GIAROLA et al., 2001; GIAROLA; SILVA, 2002; DANTAS NETO et al., 2006; FARIAS et al., 2008; OLIVEIRA et al., 2011).

A continuidade de práticas inadequadas no manejo do solo consorciado ao déficit hídrico influencia diretamente na modificação das características do solo, principalmente, nos seus atributos físicos (SILVA; CABEDA, 2006). Deste modo, tais atributos são influenciados diretamente pelo sucessivo tráfego agrícola e animal, que contribuem diretamente para a redução da distribuição de rede de poros, tendo como consequência o aumento da densidade do solo que influencia diretamente o acréscimo da resistência do solo à penetração de raízes, reduzindo assim a drenagem da solução do solo e as trocas gasosas que afetam diretamente o desenvolvimento do sistema radicular (KLEIN, 2002a; VASCONCELOS et al., 2010; SOUZA et al., 2012).

Configurando-se como um sistema natural e amplamente modificado antropicamente, o solo apresenta intrinsecamente uma variabilidade espacial e temporal dos atributos que o constitui. Mesmo em áreas que apresentam nítidas uniformizações, os atributos físicos e químicos do solo apresentam heterogeneidade. A variabilidade espacial é atribuída aos fatores que contribuem para a formação do solo e auxiliadas por práticas de manejo oriundas de atividades antrópicas (CARVALHO et al., 2003).

Desta forma, a variabilidade espacial tem sido avaliada por ferramentas como a estatística espacial. A aplicabilidade da geoestatística como instrumento de visualização e identificação das modificações ocorridas no solo oriundas dos meios de cultivo empregados antropicamente são de extrema relevância quando se deseja averiguar as problemáticas que tal sistema é submetido ao longo do tempo e aplicar pontualmente nas localidades maneiras e práticas para mitigar tais danos (VIEIRA, 2000; CARVALHO, 2003; RABBI, 2014).

1.1 Hipótese

As práticas de manejo convencional empregadas em solos com horizontes subsuperficiais coesos atuam de forma negativa na qualidade física dos solos.

1.2 Objetivo Geral

Avaliar a sazonalidade dos atributos físicos do solo devido ao manejo convencional empregado na Zona da Mata Norte do estado de Pernambuco ao longo de um ano.

1.3 Objetivos Específicos

- i. Avaliar a variabilidade espacial e temporal dos atributos físicos do solo ao longo de três períodos de coleta;
- ii. Determinar a distribuição de tamanho de poros do solo ao longo de um ano, segundo classificação de Prevedello (1996);
- iii. Avaliar a qualidade física do solo pelo modelo proposto por Dexter et al. (2008), a partir dos dados da Curva Característica de Retenção de Água no Solo (CCRAS), ajustada ao modelo matemático de van Genutchen (1980).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O CULTIVO DA CANA-DE-AÇÚCAR NO BRASIL E NO ESTADO DE PERNAMBUCO

A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) é uma gramínea semiperene, pertencente à família *Poaceae*, originária da Nova Guiné (AUGSTBURGER et al., 2000). A propagação mundial desta espécie ocorreu durante o período das grandes navegações, tendo como Portugal um dos seus maiores disseminadores. Desde o Período Colonial (séc. XVI- XIX), a configuração socioeconômica estabelecida por Portugal ao Brasil foi de princípios monopolizadores e extrativistas (ANDRADE, 2001). Por intermédio de forças de ocupação, advindos de Portugal, o Nordeste açucareiro permeou os primórdios econômicos da colônia, auxiliando no amplo desenvolvimento local (ANDRADE, 2004).

A implantação do cultivo de cana-de-açúcar era estabelecida por mecanismos extrativistas em que se limitava a comercialização de produtos provenientes da própria colônia. A aquisição de cana-de-açúcar estabeleceu nova disposição da forma de ocupação e desenvolvimento econômico a Portugal (FERLINI, 1994; ANDRADE, 2004). Com isso, uma formação de grandes unidades territoriais, estas com fins de produção, utilizadas como subsídio para disseminação do monocultivo, eram essenciais para uma política econômica em exigência para maximização de lucros (ANDRADE, 2005; MAYBURYLEWIS; RANINCHESKI, 2011).

A inserção da referida cultura no país deve-se a adaptabilidade da mesma, possuindo eficácia em se desenvolver em diversificada faixa de habitats, sendo bastante difundida nas Regiões Tropicais e Subtropicais. Partindo desta perspectiva, com o passar do tempo, o Brasil tem se configurado como um país agrícola. Diante de sua extensão territorial, houve sempre uma necessidade para disseminação de práticas agrícolas a fim de garantir ao país uma significativa autonomia alimentícia e econômica.

No contexto atual, o Brasil atua como o maior produtor de cana-de-açúcar no mundo, seguido por países como Índia e China, possuindo máxima produtividade nos subprodutos como o açúcar e o etanol, sendo responsável por cerca de 40% do açúcar exportado no mundo (CONAB, 2017). Este crescimento é proporcionado pelo proveito da inovação tecnológica propiciado pelo alto investimento privado e das linhas de crédito fornecida pelo Governo Federal na aplicação de técnicas avançadas na mecanização ao longo do processo de plantio e colheita, além do constante melhoramento das novas cultivares (LIMA; SICSÚ, 2001; SANTORO; SOLER; CHERRI, 2017).

No Brasil, o estado de São Paulo exerce o papel de maior polo sucroalcooleiro do país, onde práticas de manejo mecanizado são facilitadas devido ao relevo do estado. No Nordeste, o estado de Pernambuco ocupa a segunda colocação na Região, perdendo apenas para Alagoas (CONAB, 2014).

Em Pernambuco, o plantio da cultura é estabelecido na chamada Mesorregião da Mata, sendo subdividida em duas grandes sub-regiões, sendo elas: a Zona da Mata Norte e a da Mata Sul (ANDRADE, 2011). Nestas regiões, há uma diversidade de solos, porém os que mais predominam nestas áreas são os Latossolos Amarelos e Argissolos Amarelos (CORRÊA et al., 2008).

Pacheco e Cantalice (2011b), afirmam que no “Nordeste, a cana-de-açúcar ocupa grande área do ecossistema dos Tabuleiros Costeiros, onde a topografia, a profundidade e a textura dos solos são favoráveis ao cultivo dessa importante cultura”. Entretanto, alguns trabalhos (CINTRA; LIBARDI, 1998; LIMA NETO et al., 2009; CORRÊA et al., 2008; PACHECO; CANTALICE, 2011a) indicam que os solos contidos nesta região possuem limitações agrícolas que seguem desde a baixa fertilidade até na limitação física devido a presença de horizontes subsuperficiais endurecidos que podem afetar, diretamente, o desenvolvimento do sistema radicular.

Estudos promovidos nestas áreas de ocorrência (CINTRA; LIBARDI, 1998; GIAROLA et al., 2001; GIAROLA; SILVA, 2002; MOREAU et al., 2006; LIMA NETO et al., 2010), propõem que nestas extensões há uma predominância de horizontes minerais subsuperficiais coesos que manifestam consistência dura à muito dura, quando secos, e friável, quando úmidos. Desta forma, os sistemas de preparo do solo contínuos nestas áreas, associados com grandes períodos de estiagem podem causar, gradativamente, alterações nos atributos físicos do solo.

A compactação promovida pelo intenso tráfego agrícola promove alterações como o aumento da densidade do solo, da resistência do solo à penetração de raízes, além da redução da rede de poros, que influencia diretamente o desenvolvimento radicular e, conseqüentemente, o crescimento da cultura (DEXTER, 2004a; SAFFIT-HDADI et al., 2009; CORTEZ et al., 2011). Chinn e Pillai (2008) validam esta teoria ao afirmarem que a compactação do solo, dependendo do teor de água, pode provocar alterações significativas na estrutura do solo e sua estabilidade em termos de redução da porosidade total, continuidade e distribuição dos tamanhos dos poros.

Segundo Cherubin et al. (2016) a intensificação do uso do solo promovidos pela mecanização e aplicação de insumos agrícolas possuem implicações diretas nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo e, conseqüentemente, na sua qualidade. Com isso, o

monitoramento das suas alterações torna-se uma prática essencial para garantir condições necessárias para o desenvolvimento das cultivares e, assim, suprir as demandas estabelecidas pelo mercado consumidor.

2.2 O USO E MANEJO DO SOLO E SEUS EFEITOS SOBRE OS ATRIBUTOS FÍSICOS

O solo, definido como um sistema trifásico, proveniente da união de elementos sólidos, líquidos e gasosos possui um dinamismo altamente heterogêneo no qual tem por finalidade trazer benefícios ao sistema solo-água-planta-atmosfera (ZORNOZA et al., 2015). Os elementos sólidos possuem múltiplas composições, tamanhos e arranjos nos quais detêm a finalidade de constituir um sistema poroso que propicia uma estrutura física que define a dinâmica espacial e temporal do fluxo e retenção de solutos, partículas, trocas gasosas, proliferação e desenvolvimento de organismos, e regulação de temperatura (KLEIN, 2002b; RITZ; YOUNG, 2004; KIBBEWHITHE; RITZ; SWIFT, 2008).

As propriedades físicas que compete a determinado tipo de solo influenciam consideravelmente à forma como o mesmo pode atuar em relação a proporcionar benefícios ou tornar mais oneroso à possibilidade de cultivo, além de assegurar a manutenção da multiplicidade de organismos que habitam o mesmo (CARNEIRO et al., 2009). Zornoza et al. (2015) afirmam que as práticas de manejo empregadas na agricultura podem ter impactos negativos ou positivos na qualidade do solo e, assim, atuar no esgotamento de nutrientes, perda de matéria orgânica do solo, na redução da biodiversidade e no cultivo.

Letey (1985) ao considerar as propriedades de ordem física para os solos agrícolas destacou que estas devem ser separadas em fatores, sendo aquelas que atuam de forma direta, ou seja, aquele que afetará prontamente a cultivar, como por exemplo, a água, o oxigênio, a temperatura e a resistência do solo à penetração de raízes que atuam no crescimento radicular. Além disso, os fatores que contribuem de ordem indireta seriam a textura, densidade do solo e a distribuição do tamanho de poros.

Desta forma, a estrutura do solo possui como característica o dinamismo que, diante de seu manejo, pode estar sujeita a modificações que poderão influenciar posteriormente no ganho produtivo de determinada cultura ou em questões de ordem ambiental. Neste sentido, Topp et al. (1997), indicaram que o solo deve proporcionar uma base que seja suficientemente forte para fornecer suporte adequado à planta e estrutura estável do solo, mas não tão forte como para inibir a proliferação de raiz e a atividade faunística, como a escavação proveniente da atividade biológica.

Sendo assim, um solo deve dispor de características físicas que propiciem um amplo desenvolvimento radicular, além de condições favoráveis para movimentação e retenção dos recursos hídricos e de gases ao sistema solo e uma crescente atividade de organismos. Para que tais condições sejam geradas, o solo deve dispor de características estruturais, ou seja, de uma condição física caracterizada pela união das partículas minerais e orgânicas que o compõe e, assim, determinarão o espaço poroso ali presente no qual será responsável pela disponibilidade e/ou retenção da solução do solo, além da facilidade ou não da penetração e expansão do sistema radicular dos vegetais (KLEIN et al., 2002; BRADY; WEIL, 2012).

O Brasil, configurando-se como o maior produtor de cana-de-açúcar no mundo, destina suas áreas agricultáveis à prática de um manejo mecanizado que atua desde o processo de preparo do solo, plantio e, posteriormente, no período de colheita. Segundo Vischi Filho et al. (2017) os maquinários utilizados ao longo das áreas de cultivo pesam, em média, 25 toneladas. O processo repetitivo exercido pelo tráfego agrícola ao longo de todos esses processos exercidos ao longo dos ciclos das culturas acaba causando alterações nas propriedades físicas do solo.

Lipiec e Hatano (2003) enfatizam que a compactação dos solos agrícolas é uma problemática de cunho mundial tornando-se cada vez mais um desafio para a eficiência na produção agrícola; porém a compactação nestes solos é promovida justamente pelo tráfego dos implementos agrícolas ao longo do período de cultivo. Os autores esclarecem que as práticas agronômicas são realizadas com grande frequência e em um curto período de tempo e, principalmente, quando os solos estão com alta umidade e, assim, propícias aos processos de compactação.

Pagliai; Vignozzi; Pellegrini (2004) informam que uma das principais consequências exercidas pelo cultivo de forma intensiva é a degradação da estrutura do solo que pode influenciar diretamente nos processos erosivos e que, diretamente, auxilia no transporte de partículas sólidas do solo e dos fertilizantes químicos inseridos durante o período de plantio e, assim, restringir as condições de crescimento vegetal.

Neste sentido, Souza et al. (2012) indicam que uma alternativa atual para o problema de compactação do solo sob canaviais é o manejo com controle de tráfego agrícola, que preserva, nas regiões não trafegadas, as propriedades do solo e favorece o desenvolvimento do sistema radicular e das culturas.

Portanto, diante do sistema econômico vigente que pauta na possibilidade de inserção de meios de cultivo nos quais não se deve sobrecarregar ou trazer malefícios ao meio, além de se obter a máxima produtividade por área, a obtenção de sistemas de manejo que propiciem a

melhoria das qualidades oriundas do solo são de extrema relevância. Com isso, a análise e quantificação dos atributos físicos do solo obtêm como funcionalidade a identificação e correlação entre as variáveis que irão proporcionar a eficácia ou não de um sistema agrícola implementado (SORACCO et al., 2012).

Desta forma, para avaliar os impactos promovidos pelas práticas de manejo ao longo da área a ser largamente cultivada é necessário quantificar as modificações na estrutura do solo. Com isso, alguns estudos (LETEY, 1985; TORMENA et al., 1999; BEUTLER et al., 2001; KLEIN; LIBARDI, 2002b; SOUZA et al., 2014; SIVARAJAN et al., 2018) indicam que a carga promovida pelos maquinários utilizados atuam no aumento da densidade do solo e na resistência do solo à penetração de raízes, reduzindo assim, a porosidade total, a infiltração, agregação e a retenção de água. Sendo assim, a determinação desses atributos ao longo das atividades promovidas pelo manejo é de extrema relevância para identificação das alterações e de possíveis práticas para mitigar seus efeitos.

Bortoluzzi et al. (2008), informam que durante o processo de preparo do solo pelo meio convencional, por meio das técnicas de gradagem e aração, a camada superficial é revolvida e, isso ocasiona um incremento na porosidade nesta camada. Porém, nas camadas subjacentes, onde o incremento não alcança, há uma severa compactação a longo prazo.

No Brasil, que detém o título de maior produtor do mundo no ramo sucroalcooleiro, evidencia-se a procura de novas áreas para a expansão agrícola, porém diante das constantes variabilidades climáticas a indisponibilidade hídrica torna-se cada vez mais crescente. Mauri et al. (2017) informam que uma menor disponibilidade de água no solo afetará negativamente o crescimento das culturas agrícolas e é uma das as principais causas de produtividade reduzida, pois cerca de 71% do peso fresco da cultivar é derivada da água. Nesse sentido, a fase inicial de crescimento vegetal da cana-de-açúcar é o período mais sensível ao déficit hídrico.

Desse modo, dentre as variáveis comumente estudadas para analisar as propriedades físico-hídricas do solo, a quantificação dos poros assume maior relevância, pois esta é caracterizada por contemplar uma fração volumétrica do solo que pode ser preenchida com ar e/ou água (solução do solo).

A porosidade de um solo é constituída por espaços vazios com diâmetros (\emptyset) distintos, e estes possuem inúmeras classificações, sendo as mais referenciadas as propostas por Prevedello (1996), que distingue os poros como: macroporos ($\emptyset_{\mu\text{m}} > 300$); mesoporos ($300 > \emptyset_{\mu\text{m}} > 50$); microporos ($50 > \emptyset_{\mu\text{m}} > 0,2$); e a de Klein; Libardi (2002b) que classificaram de criptoporos aqueles com $\emptyset < 0,2 \mu\text{m}$.

Além disso, a distribuição da porosidade pode ser classificada por meio de sua distribuição bimodal, na qual se distingue os poros inter-agregados daqueles poros intra-agregados. Os poros inter-agregados inseridos nessa classificação são os macro e mesoporos, justamente por apresentarem alta capacidade de drenagem e aeração. Em relação aos poros intra-agregados, correspondem aos micro e crioporos que se caracterizam por apresentar uma condução hídrica e de gases muito lenta e, conseqüentemente, suas retenções por mais tempo (OTHMER et al., 1991; DEXTER, 2008).

Os poros citados anteriormente apresentam dentro de um mecanismo físico que compete ao solo, propriedades que auxiliarão ou dificultarão o fluxo de água e de gases, além de auxiliar no processo de facilidade ou não da ramificação do sistema radicular advindo da resistência do solo à penetração. Desse modo, a distribuição desta propriedade em uma área deve ser analisada com o intuito de identificar qual característica oriunda da porosidade o mesmo apresenta. Com isso, os macroporos são resultados da disposição de agregados existentes no solo, possuindo como funcionalidade a alta capacidade de fluxo de água e de trocas gasosas ao meio. Os microporos e mesoporos detêm como atribuição a retenção e disponibilidade hídrica à vegetação. Já os crioporos, por possuírem diâmetro muito reduzido, a água que se encontra aderida aos mesmos possui uma energia tão elevada, que acaba não a disponibilizando para as plantas (KLEIN, 1998; KLEIN; LIBARDI; 2002b).

Diante das classificações atribuídas aos poros, os mesmos atuam com a funcionalidade de distribuir a solução oriunda do solo às plantas, sendo tal atribuição evidenciada por meio das propriedades inerentes à água, tais como: adesão, coesão e tensão superficial. Tais propriedades são responsáveis pela retenção e condução da solução do solo através dos poros. A atração existente entre as moléculas de água é realizada por meio da força de coesão e a retenção de água à superfície sólida do solo, sendo promovida por meio do fenômeno de adesão. Em relação à tensão superficial, esta propriedade consiste na enorme energia de atração existente entre as moléculas de água (coesão), onde esta força faz com que as mesmas criem uma superfície com aspecto de uma membrana elástica passando a ter uma elevada tensão superficial. Com relação a tais propriedades, as mesmas atuarão na retenção, movimentação e controle de água através dos poros e, conseqüentemente, na atuação do movimento de capilaridade ou ascensão da água sobre os poros que compõem a rede do solo (LIBARDI, 2005; BRADY; WEIL, 2013).

Com isso, a água contida no sistema solo exerce uma energia sobre o mesmo passando diariamente de um estado de alta energia para um que apresente baixa energia, devido à adição de água ao solo. Estes diferentes níveis de energia que a água perpassa cotidianamente influenciam na condução da mesma pelos poros do solo. Neste sentido, algumas forças estão

envolvidas no que se refere ao Potencial Total de Água no Solo (Ψ), que é resultante do somatório das forças compostas por cada um de seus componentes, sendo os principais: o gravitacional (ϕ_g), o osmótico (ϕ_o), o de pressão (ϕ_p) e o matricial (ϕ_m) (LIBARDI, 2005).

Segundo Libardi (2005) para remover a solução retida no solo por estas forças e torná-la livre da influência da matriz, é necessário dispendir energia e, tanto maior será a energia despendida - no caso da planta - quanto menor for o conteúdo de água no solo, ou seja: ϕ_m é função do conteúdo de água no solo. Desta forma, é necessário o conhecimento das energias envolvidas no processo para o entendimento da dinâmica da água no sistema solo-planta, compreendendo assim a retirada do conteúdo de água retida na matriz do solo pelas plantas.

Com isso, diante da classificação de poros sugerida por Prevedello (1996) e Klein e Libardi (2002b), os poros possuem funcionalidades nas quais irão contribuir na condução e armazenagem da solução do solo, sendo estes processos dependentes da relação entre o tamanho do poro (raio) e a energia (ϕ_m) com que a água está retida no seu interior. Esta relação é ilustrada pela equação universal de capilaridade, onde variáveis, tais como: tensão superficial da água (σ); ângulo de contato entre o menisco de água e a parede do poro (α); densidade da água ($D_{\text{água}}$); aceleração da gravidade (g); e raio do poro (r_{poro}), explicam tais processos, como mostra a equação (1).

$$\phi_m = \frac{2\sigma \cos\alpha}{D_{\text{água}} g r_{\text{poro}}} \quad (1)$$

Deste modo, os poros classificados como macroporos [$r_{\text{poro (m)}} > 1,5 \times 10^{-4}$] possuem como energia de retenção um valor $\leq 0,1 \text{ m} = 10 \text{ cca} = 1 \text{ kPa}$; já os mesoporos [$1,5 \times 10^{-4} > r_{\text{poro (m)}} > 2,5 \times 10^{-5}$], a energia atribuída aos mesmos varia de 1 a 6 kPa; os microporos [$2,5 \times 10^{-5} > r_{\text{poro (m)}} > 1,0 \times 10^{-7}$] atuam com energia de retenção na faixa de 6 a 1.500 kPa; e os criptoporos [$r_{\text{poro (m)}} < 1,0 \times 10^{-7}$] possuem energia de retenção $> 1.500 \text{ kPa}$.

Desta forma, a maior ou menor presença de uma determinada classe de poros numa área irá contribuir com a maior ou menor disponibilidade dos recursos hídricos ali aplicados. Com isso, a quantificação destes poros e sua distribuição ao longo do solo são de suma importância para aplicabilidade e inserção de meios de cultivo numa área.

A quantificação da energia de retenção da água nos poros do solo pode ser realizada diretamente *in situ*, por intermédio de tensiômetros ou por meio de ensaios em laboratório, via equipamentos que atuarão na aplicação de sucção/pressão preestabelecendo as energias (ϕ_m) conferidas aos poros citados anteriormente e, com auxílio de modelos matemáticos, estimar o

conteúdo de água retida em determinada classe de poro do solo (LIBARDI, 2005; CARDUCCI et al., 2015; PEREIRA et al., 2016).

A estimativa de água adsorvida à matriz do solo é estabelecida por meio da Curva Característica de Retenção de Água no Solo (CCRAS), que é construída a partir do diâmetro e da distribuição da rede de poros que compõe o solo (DEXTER et al., 2008; DEXTER et al., 2009; TOO et al., 2014). A CRRAS configura-se como um indicador da qualidade física do solo, pois está diretamente relacionada com o desenvolvimento da cultura, além de fornecer informações de alguns atributos físicos do solo, tais como: a porosidade; a capacidade de campo (CC); o ponto de murcha permanente (PMP) e a água disponível (AD) (TORMENA, 1999).

Outra importância atribuída a CCRAS é que a mesma pode fornecer informações ao produtor para o manejo da irrigação, sendo possível estimar a água disponível para as plantas, que tem como limite superior a umidade equilibrada na capacidade de campo e como limite inferior, o ponto de murcha permanente.

Inúmeros são os modelos que são aplicados a partir dos dados da CCRAS dentre eles, o mais utilizado é o proposto por van Genuchten (1980), conforme equação (2), onde a umidade volumétrica (θ) é função do componente mátrico (ϕ_m). A mesma possui como fundamento uma equação que consiste em quatro parâmetros independentes que são estimados de acordo com a CCRAS, como mostra a equação (2) (TOO et al., 2014).

$$\theta_{(\phi_m)} = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (\alpha|\phi_m|)^n]^m} \quad (2)$$

Em que: θ é o conteúdo volumétrico de água; θ_s e θ_r representam os teores de água na saturação (porosidade total) e residual (ponto de murcha permanente), respectivamente; ϕ_m é o potencial mátrico da água no solo; α , n e m são parâmetros empíricos da equação.

Em contrapartida, Dexter (2004a) utilizou como fundamento o valor da inclinação da CCRAS em seu ponto de inflexão, ou seja, onde o ponto da curvatura é zero, definindo-se tal valor como Índice S. Este índice representa a distribuição do tamanho de poros que possuem maior frequência, possibilitando assim a comparação direta de diferentes solos e dos efeitos de diferentes práticas de manejo na qualidade física do solo. Segundo o mesmo autor, o limite entre solos com boa e pobre qualidade estrutural ocorre no valor aproximado de $S = 0,035$; os valores de $S < 0,020$ estão claramente associados com condições físicas do solo adversas, classificadas por Dexter (2004a) como muito pobre.

Diante dos modelos matemáticos apresentados anteriormente, que visam proporcionar a quantificação e distribuição dos poros em áreas sob manejo, os mesmos são essenciais para gerar estimativas sobre a proporcionalidade de determinada classe de poro dentro de uma

localidade de cultivo e assim evidenciar qual manejo e quantidade de água via irrigação, a área poderá suportar (DEXTER, 2008).

Portanto, a distribuição da porosidade na matriz do solo emprega importância às fases que o compõe, sendo elas a sólida, líquida e gasosa, sendo determinadas a partir de um processo evolutivo e espacial. Com isso, a distribuição da rede de poros ideal ao manejo empregado deve ser estabelecida a partir de sua quantificação e posterior correção, a fim de proporcionar à área uma melhor eficácia condizente ao que é requerido pelo cultivo implementado (DEXTER, 2008).

A eficácia de uma distribuição de poros que possa contribuir com o fluxo hídrico e de gases pode ser interferida por componentes externos, estes que têm por finalidade a redistribuição/rearranjo destes poros, como por exemplo: forças oriundas de maquinários, implementos agrícolas e animais sobre o solo, que alteram a rede porosa constituída no solo e auxiliam na ineficácia de um sistema que comporte o manejo adotado (DEXTER, 2004a; DEXTER, 2008).

Bortoluzzi et al. (2008) ao quantificarem as mudanças no espaço poroso de um Argissolo sob os sistemas de plantio convencional (SPC) e de plantio direto (SPD), submetidos a compressões unidimensionais, constataram que o solo sob preparo convencional é mais sensível à compressão unidimensional aplicada que sob SPD, indicado pela maior magnitude na diminuição do espaço poroso e da proporção de ar do solo.

Schaefer et al. (2001) avaliando características morfométricas da porosidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo, cultivado por dez anos, a partir de blocos de solos preparados para ensaios micromorfológicos, detectaram que as análises dos blocos mostraram descontinuidade e diminuição da porosidade nos sistemas de preparo do solo que envolveram o uso da grade pesada. O sistema de semeadura direta mostrou boa conexão entre os macroporos, sem revelar descontinuidade entre a superfície e as camadas inferiores.

A alteração dos arranjos dos poros contidos no solo pode ocasionar interferências em outros atributos, dentre eles pode-se destacar a Densidade do Solo (Ds) que, ao se promover meios que auxiliem na compactação do solo, acarretará na redução significativamente do espaço poroso, principalmente nos poros maiores que são mais passíveis de modificação e com isso, auxiliarão na ineficiência atribuída anteriormente para as funcionalidades desses poros (KLEIN; LIBARDI, 2002b).

Neste sentido, Souza et al. (2014) ao avaliarem a qualidade física de um Latossolo Vermelho com três tipos de manejos para identificar os efeitos resultantes sobre o desenvolvimento radicular e produtividade da cana constataram que o manejo promovido pelo

tratamento que possuiu controle de tráfego e piloto automático apresentou a menor densidade e grau de compactação e maior porosidade total e macroporosidade na linha de plantio. Além disso, os autores ressaltam que os manejos promovidos pelos tratamentos com tráfego controlado apresentaram maior superfície e volume radicular, com maior produtividade e rendimento de açúcar em relação ao manejo testemunha sem controle de tráfego.

Outra possibilidade de avaliar as modificações promovidas por meio de maquinários agrícolas e, assim, analisar a qualidade física de um solo é por meio da Resistência do Solo à Penetração (RP), pois expressa o grau de compactação do solo e, assim, descreve a força física que o solo oferece para a penetração radicular das cultivares (CERQUEIRA SILVEIRA et al., 2010). Segundo Pedrotti et al. (2001) essa resistência do solo à penetração de raízes geralmente aumenta com a compactação e com a redução da umidade do solo, sendo indesejável em certos limites para o crescimento das plantas, o que pode ocasionar uma redução no desenvolvimento do sistema radicular.

Conforme destacam Streck et al. (2004) ao avaliarem as modificações nas propriedades físicas com a compactação do solo causada pelo tráfego induzido de um trator sob o sistema de plantio direto constataram que, conforme os níveis de tráfego foram aplicados ao longo dos tratamentos, observou-se uma redução na porosidade total e na macroporosidade. Sendo a Ds e a RP os atributos que mais se elevaram ao longo dos tratamentos em que o tráfego foi aplicado. Os autores ainda enfatizam que a RP foi o parâmetro físico que melhor evidenciou o efeito de passadas do rodado da máquina sobre o solo.

Em suma, as modificações dos atributos físicos do solo são resultado do uso intensivo e sucessivo de equipamentos agrícolas que, ao longo do tempo, acabam promovendo a compactação do solo que geram efeitos onerosos e ambientais. Desta forma, a continuidade de tais técnicas acarretam consequências futuras para o desenvolvimento do cultivo empregado na localidade, pois as atuações destas forças exercidas sobre o solo auxiliam no desenvolvimento de problemáticas relacionadas ao aumento da Ds, RP com diminuição significativa dos poros compostos, propiciando a redução de recursos hídricos à planta. Práticas agrícolas que promovam a melhoria desses atributos tornam-se essenciais para a ampliação de áreas de cultivo ao longo do país (VASCONCELOS et al., 2010; SOUZA et al., 2012).

2.3 VARIABILIDADE ESPACIAL E TEMPORAL DOS ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO

Estudos relativos às variações dos atributos dos solos sempre foram pertinentes entre os pesquisadores. Na área agrícola, Vieira (2000) elucida que, trabalhos desta magnitude datam

desde o século passado, onde Smith (1910) iniciou estudando o rendimento de variedades de milho dispondo tais cultivares em parcelas experimentais para eliminar os efeitos promovidos pelas variações do solo. Porém, este e outros estudos que tinham como propósito identificar variabilidades de atributos dos solos em relação a culturas não prosseguiram e não fizeram correlação com as coordenadas geográficas, pois assumiam a independência entre as amostras.

Em meados da década de 50, na África do Sul, Daniel G. Krige ao trabalhar com dados de concentração de ouro concluiu que, apenas pelos dados fornecidos pela variância não seriam suficientes para explicar a variável a ser estudada caso não levasse em consideração as distâncias estabelecidas entre as amostras coletadas. Georges Matheron, baseando-se nas observações propostas por Krige, estabeleceu a Teoria das Variáveis Regionalizadas, iniciando assim os fundamentos da Geoestatística (VIEIRA, 2000; YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

Segundo Vieira (2000) “A Teoria das Variáveis Regionalizadas é definida como uma função espacial numérica, que varia de um local para outro, com uma continuidade aparente e cuja variação não pode ser representada por uma função matemática simples”. Neste sentido, a Geoestatística utiliza-se de um método de interpolação intitulado como Krigagem, em homenagem a D. G. Krige, que usa a dependência espacial entre as amostras a serem estudadas, expressa no semivariograma, para estimar valores em qualquer posição da área amostral com uma variância mínima.

Landim (2006) afirma que “o valor de cada ponto está relacionado de algum modo com valores obtidos a partir de pontos situados a certa distância, sendo razoável pensar que a influência é tanto maior quanto menor for a distância entre os pontos”. Desta forma, o Semivariograma mostra o grau de dependências entre as amostras ao longo da distância.

Deste modo, o solo configurando-se como um sistema natural e amplamente modificado antropicamente, apresenta intrinsecamente uma variabilidade espacial e temporal dos atributos que o constitui. Mesmo em áreas que apresentam nítidas uniformizações, as propriedades físicas empregadas a uma área possuem certa heterogeneidade. A variabilidade espacial é atribuída justamente pelos fatores que contribuem para a formação do solo e auxiliadas por práticas de manejo que são oriundas de atividades antrópicas (CARVALHO et al., 2003).

Diante das intensificações promovidas pelo setor agrícola para atingir ganhos produtivos ao longo do ano, o uso contínuo de maquinários auxilia para que as propriedades físicas do solo sejam alteradas constantemente (SOUZA; MARQUES JÚNIOR; PEREIRA, 2004; GOMES et al., 2007). Desta forma, salienta-se que os processos promovidos ao longo das atividades de plantio regulam o desempenho das culturas no campo de forma direta ou indireta e que estas variam no espaço e no tempo. Com isso, a aplicabilidade da Geoestatística

como ferramenta de visualização e identificação das modificações ocorridas no sistema solo, oriundas dos meios de cultivo empregados antropicamente, são de extrema relevância quando se deseja averiguar as problemáticas que tal sistema é submetido ao longo do tempo. Desse modo, pode-se aplicá-la diretamente nas localidades observadas a partir dos mapas construídos e assim mitigar tais danos e, conseqüentemente, aumentar a produtividade das áreas e a qualidade física dos solos (VIEIRA, 2000; CARVALHO; TAKEDA; FREDDI, 2003; RABBI et al., 2014).

Com isso, diante das atuais condições climáticas em que a disponibilidade pluviométrica torna-se cada vez mais desregular e onde as práticas de manejo mecanizado são constantes, o estabelecimento de técnicas promovidas pela agricultura de precisão, como no caso, o monitoramento por meio da Geoestatística tornam-se cada vez mais relevante. Pois, o uso dessa ferramenta auxilia de forma precisa na atuação de práticas que atuem diretamente na promoção da melhoria da qualidade física do solo.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL

O presente estudo ocorreu, *in situ*, entre agosto de 2016 e agosto de 2017, sendo conduzido na Estação Experimental de Cana-de-Açúcar do Carpina - EECAC (07° 50' 59.5" S; 035° 14' 19.9" W; Elevação 134 m), pertencente à Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE, conforme indicado na Figura 1. Localizada no município de Carpina, a EECAC está situada na Zona da Mata Setentrional do estado de Pernambuco.

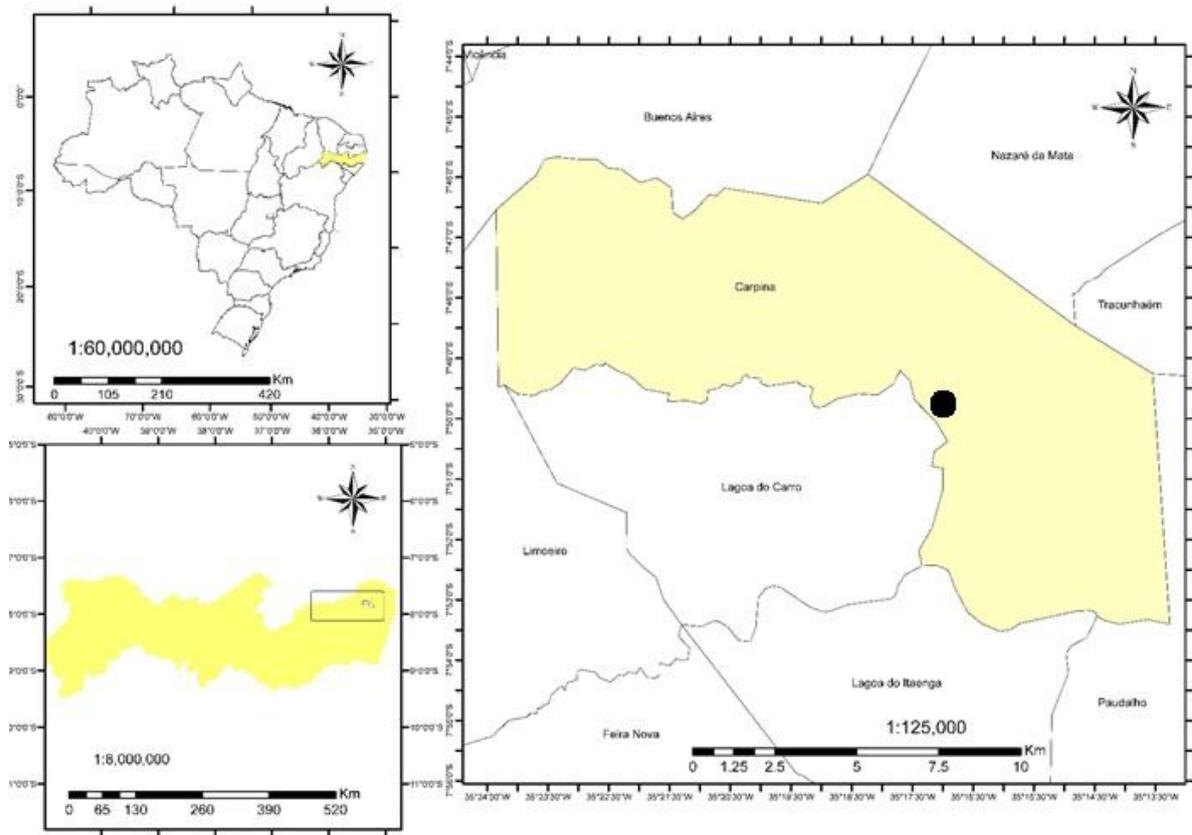


Figura 1 – Localização da EECAC em relação ao município de Carpina – PE.

Fonte: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – CPRM, adaptado por Assunção, 2016.

A região encontra-se inserida, predominantemente, na unidade geoambiental do Planalto da Borborema. O município possui relevo suavemente ondulado com vales profundos e com clima seguindo a classificação de Köppen As' possuindo incidência de altas temperaturas no verão e com chuvas ocorrendo entre o início do ano e perdurando até o final do primeiro semestre, conforme Figura 2 (CPRM/PRODEEM, 2005).

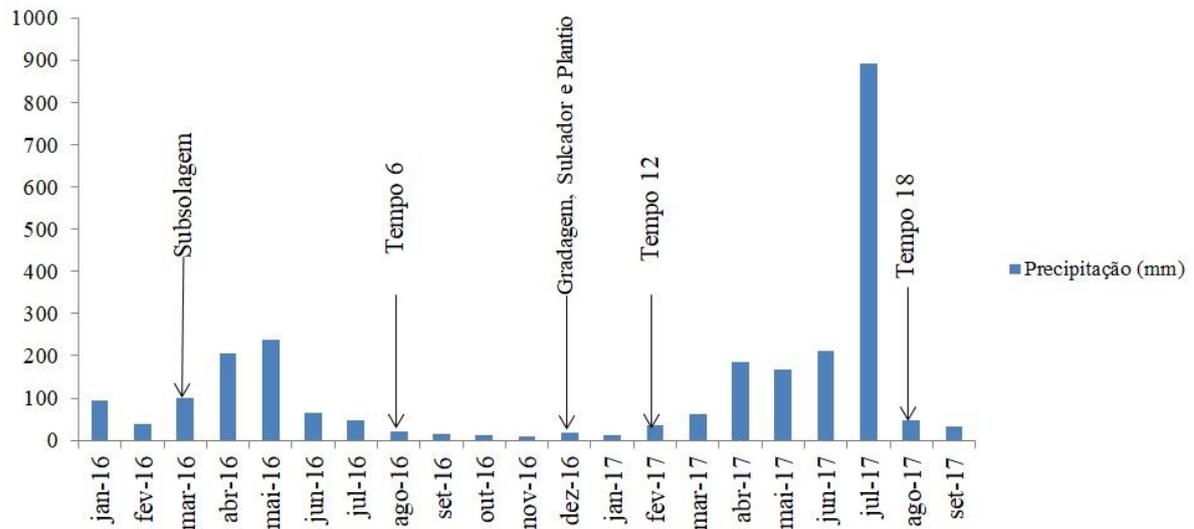


Figura 2 - Climograma da EECAC (2016-2017)

Na área experimental o solo foi classificado, conforme recomendações do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos-SiBCS, como Argissolo Amarelo Distrocoeso de textura franco-arenoso (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA, 2013).

3.2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

Para realização do presente estudo, foi utilizada uma área com cerca de 2 hectares, onde foi traçado um grid com a dimensão de 70 x 70 m, com intervalos de 10 m para cada ponto de coleta (Figura 3). Para demarcação da área foi utilizado um GPS portátil modelo Garmin eTrex® 30, com o intuito de georreferenciá-la (UTM), além de obter a altitude da mesma para construção do mapa de elevação (m), conforme ilustra Figura 3. Com isso, foram coletadas amostras em superfície (0-0,30 m) e em subsuperfície (0,30-0,60 m), para cada tempo pré-fixado, isto é: 6; 12 e 18 meses, detalhado no item 3.4.

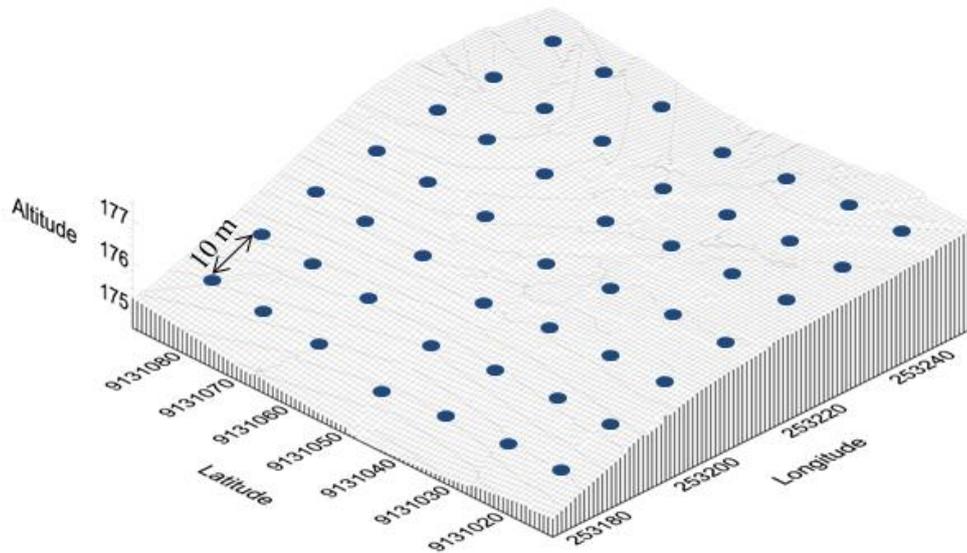


Figura 3-Distribuição dos pontos que foram utilizados na área de coleta.

Fonte: Gs⁺, adaptado por Assunção, 2016

3.3 Cronologia do manejo convencional

Durante o início do mês de março de 2016 foi estabelecido na área experimental, localizada no talhão 5, o uso de subsolagem. Salienta-se que tal prática acontece rotineiramente nos períodos de estiagem ocorrentes na localidade. Desse modo, o procedimento adotado visou promover o revolvimento e descompactação em superfície e subsuperfície do solo com o auxílio de hastes penetrando na profundidade de 0,55 m, conforme Figura 4. Na área, tal procedimento foi realizado apenas uma vez ao longo de toda sua extensão.



Figura 4-Subsolador utilizado na área experimental

Após o manejo do subsolador, a área ficou em pousio, porém no mês de dezembro de 2016 foram iniciados os primeiros procedimentos promovidos pela EECAC para o plantio da cana-de-açúcar. Desta forma, após o período da realização da subsolagem, ocorrida há nove meses, empregou-se o uso da gradagem. Este tipo de prática de revolvimento no solo acontece rotineiramente nos períodos com altos índices pluviométricos. A grade aradora contendo 16 discos, conforme mostra a Figura 5, fez o local de plantio com o auxílio de um trator, por duas vezes, atingindo assim, as camadas superficiais ao longo dos 0,25 m de profundidade.



Figura 5- Grade aradora utilizada em campo

Após o uso da grade aradora ao longo de toda a camada superficial, ocorreu ainda, com o auxílio de um trator, o uso do sulcador para auxiliar no plantio (Figura 6).



Figura 6- Sulcador utilizado na área experimental

A variedade de cana utilizada na área foi a RB 92579, em cana planta (Figura 7), que possui como características um ciclo precoce em torno de 12 a 14 meses, além de possuir boa recuperação após períodos de seca; altamente responsiva à irrigação e muito eficiente no uso da água (REDE INTERUNIVERSITÁRIA PARA O DESENVOLVIMENTO DO SETOR SUCROALCOOLEIRO, 2010).



Figura 7- Plantio da cana-de-açúcar

Para a irrigação, foi utilizado o sistema de aspersão convencional do tipo canhão móvel, com bocal de quatro polegadas de diâmetro e vazão de $54 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, sob pressão de 40 m de coluna de água.

3.4 Coleta dos solos da área experimental

Com o intuito de analisar a variabilidade dos atributos físicos do solo em decorrência do manejo aplicado na localidade, optou-se pela realização de três coletas distando-se, em média, no período de seis meses cada. Desta forma, pôde-se completar o ciclo de observação da área ao longo de um ano. Sendo assim, segue a descrição dos tempos de coleta realizados na EECAC.

3.4.1 PRIMEIRA COLETA (TEMPO 6 – T6)

No começo de agosto de 2016 foram iniciados os primeiros procedimentos para traçar na área um grid e determinar os pontos que, posteriormente, foram georreferenciados e demarcados com estacas para, assim, realizar a coleta. Vale salientar que a demarcação foi realizada tomando como ponto de referência uma antiga construção que se encontrava demolida na área e, após 10 m da sua extremidade à esquerda, foi demarcado o primeiro ponto.

Desse modo, assume-se aqui que o T6 refere-se à coleta de solos após, aproximadamente, seis meses da ação da subsolagem. Salienta-se que, durante o período de amostragem, a área apresentava reestabelecimento de vegetação do tipo gramínea que recobria a mesma ao longo de toda sua extensão.

3.4.2 SEGUNDA COLETA (TEMPO 12 – T12)

Em Fevereiro de 2017 foi realizada a segunda coleta em campo (TEMPO 12). Neste período, verifica-se o primeiro estágio de desenvolvimento da cultura implementada na área, onde o efeito da mesma no solo ainda é muito reduzido. Desta forma, a segunda coleta foi realizada após 12 meses da realização da subsolagem em campo, sendo também somado o efeito promovido pela sulcagem+ gradagem+plantio.

3.4.3 TERCEIRA COLETA (TEMPO 18 - T18)

Em Agosto de 2017 foi realizada a última etapa de coleta dos solos na EECAC, onde a cana recobria toda a localidade. Neste cenário, após 18 meses da subsolagem, foi realizada a última coleta das amostras de solo, podendo-se assim avaliar os efeitos promovidos pela cultura e manejos aos atributos físicos do solo.

3.5 DETERMINAÇÃO DOS ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO

Ao longo de todos os tempos de coletada foram realizadas amostragens dos solos com estrutura não deformada com auxílio de anéis volumétricos, em aço inoxidável, para os ensaios físico-hídricos. As profundidades de coleta, já mencionadas anteriormente, foram obtidas pela inserção dos anéis com auxílio de amostrador tipo Uhland. Vale salientar que, diante das

profundidades escolhidas para a amostragem, o anel volumétrico foi inserido na camada superficial aos 0,15 m e na camada subsuperficial aos 0,45 m.

Após a coleta, as amostras foram devidamente identificadas e envoltas com plástico filme e bolha com o intuito de conservar e preservar ao máximo sua estrutura, para não ocasionar interferências nas análises realizadas.

Conduzidas ao Laboratório de Física do Solo - UFRPE, as amostras foram submetidas a procedimentos prévios de limpeza conhecidos como toalete, a fim de proporcionar, igualmente, a distribuição do solo pelo anel volumétrico.

3.5.1 UMIDADE GRAVIMÉTRICA (U_{RP})

A umidade à base de massa foi obtida por meio das coletas dos solos em campo após a realização da Resistência do solo à penetração de raízes, sendo extraídas via trado do tipo holandês, e mantidas em embalagens hermeticamente vedadas, onde em laboratório uma alíquota contendo cerca de 20 g de solo sendo transferida para uma lata, pesada e, em seguida levada à estufa (105° C) por 24 h. Após esse tempo, a amostra resfriará em dessecador, e na sequência pesada novamente. Os dados obtidos foram aplicados na equação (3):

$$U_{RP} (\%) = \frac{\text{Massa da amostra úmida} - \text{Massa da amostra seca}}{\text{Massa da amostra seca}} \times 100 \quad (3)$$

Vale salientar que, o solo utilizado para obter tal atributo foi coletado após a determinação da Resistência do solo à penetração de raízes (RP) em campo, pois assim possibilitaria identificar a qual teor de água a RP estava vinculada.

3.5.2 DENSIDADE DO SOLO (DS)

Segundo Libardi (2005), o termo densidade refere-se à massa que o volume de um determinado corpo possui. Sendo assim, a determinação da DS consistiu na razão definida entre massa de sólidos do solo e o volume do solo, utilizando-se o método do anel volumétrico conforme EMBRAPA (2011), sendo adotada para os cálculos a equação (4).

$$DS (\text{g cm}^{-3}) = \frac{\text{Massa de Sólidos}}{\text{Volume do Solo}} \quad (4)$$

3.5.3 CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DE SOLOS SATURADOS (K_{SAT})

Os ensaios de Condutividade Hidráulica Saturada foram realizados pelo método do permeâmetro de carga constante descrita por Reynolds; Elrick (2002). Sendo este método utilizado para quantificar o fluxo de água que permeia o solo com base na Lei de Darcy. Assim, os anéis volumétricos foram saturados por meio da força de capilaridade e, após saturação total das amostras, as mesmas foram submetidas à aplicação de uma carga hidráulica constante até obtenção de fluxo contínuo. Em seguida, os dados foram utilizados na equação de Darcy, conforme equação 5:

$$K_{\text{sat}} (\text{cm. h}^{-1}) = \frac{V_a \cdot L}{A \cdot T (\Psi_c - \Psi_b)} \quad (5)$$

Sendo V_a : o volume de água coletado (cm^3); L : a altura do corpo de prova (cm); A : a área da seção transversal do anel (cm^2); T : o tempo de fluxo da água pelo corpo de prova (h); Ψ_c : o potencial total na parte de cima do corpo de prova, representando $L + h$ e Ψ_b : o potencial total na parte de baixo do corpo de prova, cujo o valor é zero.

3.5.4 RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO DE RAÍZES (RP) - EM CAMPO

Em campo, a coleta de dados referente à RP foi realizada com o auxílio do equipamento Solo Track (Falker®- Modelo PLG 5300; Cone tipo 2 (6.800 kPa); Velocidade de 24 mm.s^{-1}). O mesmo, além de ser totalmente eletrônico, possibilitou, por meio da extensão da sua haste metálica (60 cm), analisar nas profundidades de 0 - 0,30 m e 0,30 - 0,60 m. Com isso, foram verificados, *in situ*, os níveis de RP obtida em cada ponto de coleta, sendo estes associados à umidade (U_{RP}) no momento do ensaio.

No Tabela 1 são apresentadas as classes de RP indicadas pelo Soil Survey Staff (2017) que serviram como base para analisar os dados obtidos em campo.

Tabela 1- Classes de Resistência do Solo à Penetração de Raízes (RP)

Classe	RP (MPa)
Baixa	<0.1
Extremamente Baixa	<0.01
Muito Baixa	0.01 < 0.1
Intermediária	0.1 < 2
Pequena	0.1 < 1
Moderada	1 < 2
Grande	>2
Alta	2 < 4
Muito Alta	4 < 8
Extremamente Alta	> 8

Fonte: Adaptada de Soil Survey Staff (2017)

3.5.5 CURVA CARACTERÍSTICA DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO (CCRAS)

Com o intuito de determinar o conteúdo de água retida no solo e sua respectiva energia de retenção (Ψ) foi realizada a construção da CCRAS nas amostras coletadas ao longo dos três intervalos de coleta (TORMENA et al., 1999; LIBARDI, 2005; CARDUCCI et al., 2015; PEREIRA, 2016).

Desta forma, para efetivação das respectivas determinações foram utilizados a mesa de tensão para os potenciais de 1, 6 e 10 kPa (Oliveira, 1968); e a câmara de Richards para os potenciais de 33, 80, 300, 500, 1.000 e 1.500 kPa conforme metodologia sugerida em Dane; Hopmans (2002).

3.5.6 MODELO MATEMÁTICO DE VAN GENUCHTEN (1980)

Para aplicação do referido modelo matemático, foi utilizado o software “Retention Curve” – RETEC, que utiliza os dados da CCRAS fornecendo os parâmetros usados na equação (6).

$$\theta(\Psi_m) = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (\alpha|\Psi_m|)^n]^m} \quad (6)$$

Em que: θ é a umidade volumétrica determinada no potencial Ψ ; θ_s e θ_r representam a umidade volumétrica na saturação (porosidade total) e residual (ponto de murcha permanente), respectivamente; Ψ_m é o potencial total de água no solo (kPa); α , n e m são parâmetros empíricos da equação.

3.5.7 MODELO MATEMÁTICO PROPOSTO POR DEXTER (2004) - ÍNDICE S

Dexter (2004a) baseou-se no modelo proposto por van Genuchten (1980) e sugeriu o Índice S (S de “slope” = declividade) que se fundamenta no ponto de inflexão existente na CCRAS. Neste caso, maiores valores de S indicarão melhor distribuição do tamanho dos poros, aplicando-se a equação (7).

$$S = -n(\theta_s - \theta_r) \left(1 + \frac{1}{m}\right)^{-(1+m)} \quad (7)$$

3.5.8 RESISTÊNCIA TÊNซิล DE AGREGADOS DO SOLO (RT)

Os agregados coletados em campo nas mesmas profundidades citadas anteriormente foram separados manualmente por meio da sua superfície de fraqueza e, em seguida, foram passados em uma peneira de malha de 25 mm e em seguida retidos na peneira de 20 mm, sendo obtida uma dimensão média entre as duas peneiras de 22,5 mm. Foram utilizados, em cada ponto, três agregados por profundidade, que foram acondicionados em estufa de circulação forçada de ar com temperatura constante de 45°C, até homogeneizar a umidade dos mesmos. Em seguida, os agregados seguiram para sala de ensaios com temperatura controlada (23°C) até novo equilíbrio, quando foram realizados os ensaios de ruptura dos agregados, utilizando-se de um penetrômetro de bancada.

Neste ensaio busca-se determinar a força máxima de ruptura exercida por unidade de área. A RT foi calculada, conforme sugerem Dexter; Kroesbergen (1985), a partir da equação (8).

$$RT = 0,576 \left(\frac{P_{m\acute{a}x}}{D_{ef}^2}\right) \quad (8)$$

Em que: 0,576 é o coeficiente de proporcionalidade; $P_{m\acute{a}x}$ é a força máxima aplicada para ruptura do agregado (expressa em N), e D_{ef} é o diâmetro efetivo (m), calculado conforme sugerem Watts; Dexter (1998), segundo equação (9).

$$D_{ef} = D_m \left(\frac{M_i}{M_o}\right)^{0,3333} \quad (9)$$

Sendo: D_m o diâmetro médio do agregado (m); M_i é a massa do agregado individual (g); e M_o é a massa média dos agregados na população (g). O diâmetro médio dos agregados foi considerado igual à média dos tamanhos das peneiras utilizadas para selecionar os agregados.

3.5.9 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

O procedimento de análise baseia-se na sedimentação das partículas minerais que constituem o solo pela teoria proposta por Stocks. Para determinação da argila dispersa quimicamente foi realizado o método do densímetro (modelo ASTM n° 152 H) proposto por Gee e Or (2002), modificado por Almeida (2008). Nesta metodologia, utiliza-se uma subamostra de 50 g de solo em um recipiente específico, que é submetida ao processo de dispersão química via Calgon (Hexametáfosfato de Sódio e Carbonato de Sódio), completando-se com água. A amostra segue para a dispersão física por meio de um agitador do Tipo Wagner por 16 h a 50 rpm. Para determinação da argila dispersa naturalmente (água) o procedimento segue a metodologia citada anteriormente, sendo retirado apenas o dispersante químico.

Após os procedimentos de determinação, a suspensão (solo + dispersante) é transferida para proveta de 1 L, sendo realizado o processo de leitura da argila após 24h. Logo em seguida, areia contida na proveta é obtida por meio de peneiramento, realizado por via úmida em uma malha de 0,053mm, sendo transferida para uma lata e levada a estufa (105°C, 24 h) para posterior pesagem. O silte contido na amostra é obtido por meio da diferença entre os valores de areia e argila, os dados obtidos foram calculados conforme EMBRAPA (2011). Os resultados obtidos podem ser visualizados na Tabela 2.

3.5.10 GRAU DE FLOCULAÇÃO (%)

Após determinação das argilas via dispersante químico e natural (água), os resultados foram utilizados para definir o grau de floculação segundo EMBRAPA (2011), sendo adotado o seguinte cálculo:

$$\text{Grau de Floculação (\%)} = \frac{\text{ADQ} - \text{ADN (água)}}{\text{ADQ}} \times 100 \quad (10)$$

Sendo: ADQ: Argila Dispersa Quimicamente e ADN: Argila Dispersa Naturalmente (água).

3.6 ANÁLISE QUÍMICA DOS SOLOS

As análises químicas serviram apenas para caracterização da área sendo realizadas pela EECAC utilizando as metodologias recomendadas pela EMBRAPA (2011). A Tabela 3 mostra os dados referentes à caracterização química do solo em estudo.

Tabela 2- Granulometria do Argissolo Amarelo distrocoeso utilizado no experimento (valores médios)

Estatística Descritiva	Camada (0- 0,30 m)				Camada (0,30- 0,60 m)				Classe Textural
	Caracterização								
	% Argila (<2 µm)	% Areia (50 - 200 µm)	% Silte (2 - 50 µm)	Grau de Floculação	% Argila (<2 µm)	% Areia (50 - 200 µm)	% Silte (2 - 50 µm)	Grau de Floculação	
Mínimo	11,99	60,85	5,45		15,98	60,56	1,64		
Máximo	25,98	80,59	13,17		31,99	78,36	11,44		
Média	16,1561	75,211	8,633		25,2506	67,7916	6,9569		Franco-arenoso
Mediana	16	75,98	8,42	27,55%	25,98	67,32	7,03	21,55%	
DP	2,9938	3,37585	1,7245		3,6222	3,7349	2,019		
Assimetria	0,8635	-1,664	0,50847		-0,366778	0,8149	-0,50497		
Curtose	1,5874	5,6154	0,11867		-0,3033	7,7499	3,1859		
CV	18,53%	4,49%	19,98%		14,35%	5,51%	29,03%		
d³	0,1669 ^{ns}	0,12838	0,08847		0,17055 ^{ns}	0,0921	0,0938		

DP = Desvio Padrão; CV = Coeficiente de Variação; d³ = teste de normalidade de Kolmogorov Smirnov; ^{ns} = não significativo pelo teste de normalidade

Tabela 3- Caracterização química do Argissolo Amarelo distrocoeso utilizado no experimento

Camada (m)	pH (H ₂ O)	P Mg/dm ³	K	Na	Al	Ca	Mg	H	S.B.	CTC	V	C	m	M.O.
			Cmol _c /dm ³						%					
0 - 0,20	4,6	30	0,07	0,03	0,5	1,5	0,3	4,3	1,9	6,7	28,35	1,18	20,84	2,03
0,20 - 0,40	4,6	24	0,02	0,01	0,6	1,1	0,3	4,3	1,42	6,32	22,52	1,02	29,64	1,76

P = Fósforo; K = Potássio; Na= Sódio; Al = Alumínio; Ca =Cálcio; Mg = Magnésio; H= Hidrogênio; S.B.= Soma de bases (K+ Ca+ Mg+ Na); CTC= Capacidade de troca de cátions; V = Saturação por bases; C= Carbono Orgânico; m = Saturação por alumínio; M.O.= Matéria Orgânica do Solo

3.7 ANÁLISE ESTATÍSTICA E GEOESTATÍSTICA

Os dados foram analisados usando cálculos da estatística descritiva, segundo Vieira et al. (2002), obtendo-se média, variância, coeficiente de variação, assimetria e curtose, para se ter uma visão geral de como se comportam as variáveis estudadas. Os resultados obtidos foram submetidos à análise de variância e a comparação das médias realizada pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade, com o programa Sisvar. Com o intuito de comparar as variações apresentadas durante os tempos de coleta em relação ao uso do manejo, foram adotados os limites de coeficiente de variação (CV) propostos por Warrick e Nielsen (1980), sendo: $CV < 12\%$, $12\% < CV < 60\%$ e $CV > 60\%$, considerados de baixa, média e alta variabilidade, respectivamente.

Para verificar a dependência espacial das variáveis, interpolação dos dados obtidos e construção dos mapas, foi empregada a análise geoestatística (VIEIRA, 2000). Foram construídos semivariogramas, partindo das pressuposições de estacionaridade da hipótese intrínseca e do cálculo da semivariância, conforme equação (11).

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^N [Z(X_i) - Z(X_i + h)]^2 \quad (11)$$

Em que: $\gamma(h)$ é o número de pares dos valores medidos $Z(X_i)$, $Z(X_i + h)$, separados por um vetor h .

Vieira (2000) afirma que medições de pontos localizadas mais próximas são mais parecidas entre si do que aquelas separadas por grandes distâncias. Os semivariogramas obtidos por meio do Programa Gs⁺® foram ajustados de acordo com o modelo matemático que melhor o representasse. Segundo Grego et al. (2005), os programas computacionais e procedimentos para construção e ajuste do modelo do semivariograma obedeceram às instruções propostas por Vieira et al. (2002), conforme equação (12).

$$\gamma(h) = C_0 + C_1; h \geq a \quad (12)$$

Em que foram definidos os parâmetros do semivariograma, a saber: C_0 = efeito pepita, que é o valor de $\gamma(h)$ quando $h = 0$; a = alcance, que é a distância em que $\gamma(h)$ permanece aproximadamente constante, após aumentar com o aumento de h ; $C_0 + C_1$ = patamar que é o valor de $\gamma(h)$ a partir do alcance e que se aproxima da variância dos dados, e C_1 = variância estrutural, ou seja, a diferença entre o patamar e o efeito pepita. De acordo com Cambardella et al. (1994), a dependência espacial apresenta a seguinte proporção: (a) dependência forte < 25%; (b) dependência moderada de 26 a 75%, e (c) dependência fraca > 75%.

Segundo Grego et al. (2005) as construções dos mapas com os valores obtidos por meio da krigagem são importantes para a verificação e interpretação da variabilidade espacial. A análise geoestatística dos dados é completada com as informações mostradas nos mapas visualmente comparadas para o entendimento da variabilidade das propriedades físicas e hídricas do solo no campo e que são úteis nas tomadas de decisões. Após obtenção dos dados através do programa Gs⁺[®], os resultados foram interpolados e gerados mapas por meio do programa Golden Software Surfer[®] (SURFER, 2000).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 INDICADORES ESTATÍSTICOS DOS ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO

Na análise dos resultados obtidos por meio da estatística descritiva e do teste de médias para os tempos e suas respectivas profundidades do solo (Tabelas 4, 5, 6 e 8), percebe-se que os valores de média e mediana referentes à maioria das variáveis estudadas se aproximam, evidenciando assim, uma distribuição simétrica, sendo compatíveis com uma distribuição normal.

Para os valores obtidos a partir do teste de normalidade de Komolgorov-Smirvov (d^3) comprova-se que a maioria foi significativa para os atributos que indicam a qualidade física do solo. Exceções pontuais foram observadas para alguns atributos, como: porosidade total (PT); microporosidade (Mi); condutividade hidráulica saturada (Ksat); RP (resistência do solo à penetração de raízes); umidade gravimétrica medida no campo na determinação da RP (U_{RP}); resistência tênsil de agregados (RT); umidade gravimétrica medida no laboratório na determinação da RT (U_{RT}).

Desse modo, na profundidade 0-0,30 m, em tempos específicos, não houve diferenças significativas para: PT (no T18); U_{RP} (no T12); Mi (no T6, T12 e T18); Ksat (no T18); RP (no T12); RT e U_{RT} (no T18). Já para 0,30-0,60 m, não foram observadas diferenças para a Mi (no T12), Ksat (no T12 e T18), RT (no T12) e U_{RT} (no T12 e T18).

Os dados médios referentes às variáveis relacionadas à distribuição de tamanho de poros do solo apresentaram acentuadas alterações ao longo do tempo de acordo com o manejo utilizado, como podem ser observadas nas Tabelas 4 e 5.

Constata-se que, para a macroporosidade (Ma), os efeitos da ação da subsolagem, realizada ao longo da área após 6 meses (T6), promoveu os menores valores observados

(2,37 %), que diferiram significativamente dos resultados obtidos após 12 e 18 meses (T12 e T18), sendo estes maiores (3,46 e 3,01 %, respectivamente). Esses menores valores de Ma no T6 podem ser explicados diante da compactação exercida inicialmente no processo de atuação da ponteira do subsolador, que tem a função de promover a ruptura de camadas adensadas ou compactadas.

Tabela 4- Estatística descritiva e teste de médias dos poros do solo em área de cana-de-açúcar sob manejo na camada (0-0,30 m)

Estatística Descritiva	Ma	Me	Mi	CC_{aren.}	Cripto	PT
-----m ³ m ⁻³ -----						
Tempo 6 (0 - 0,30 m)						
Mínimo	0,0058	0,0903	0,0984	0,1633	0,0327	0,3246
Máximo	0,0549	0,1997	0,2808	0,271	0,146	0,5035
Média	0,023 B	0,150 A	0,128 A	0,199 AB	0,105 A	0,408 A
Mediana	0,0058	0,1465	0,1228	0,1924	0,1032	0,4057
DP	0,0101	0,0281	0,0251	0,0023	0,0190	0,0356
Assimetria	0,9792	-0,1758	4,3366	0,8199	-0,839	0,3861
Curtose	1,1806	-0,8900	25,0200	0,6426	3,4018	0,6536
CV	42,70%	18,73%	20,06%	11,51%	18,82%	8,71%
d³	0,1281	0,0706	0,1788 ^{ns}	0,11799	0,0863	0,09337
Tempo 12 (0 – 0,30 m)						
Mínimo	0,0156	0,0763	0,0777	0,1536	0,0397	0,3086
Máximo	0,0581	0,1722	0,1903	0,2539	0,152	0,4475
Média	0,034 A	0,122 B	0,109 B	0,190 B	0,108 A	0,375 B
Mediana	0,03211	0,128	0,1078	0,1931	0,1106	0,3777
DP	0,0109	0,0252	0,0173	0,0207	0,0187	0,0292
Assimetria	0,5950	-0,1725	2,2080	0,5953	-0,7237	-0,0801
Curtose	-0,4967	-0,6673	9,1396	0,7535	2,6783	0,402
CV	31,54%	20,57%	15,80%	10,91%	17,38%	7,78%
d³	0,1291	0,1142	0,1641 ^{ns}	0,1165	0,08646	0,0811
Tempo 18 (0 – 0,30 m)						
Mínimo	0,0109	0,0068	0,0813	0,1261	0,083	0,2729
Máximo	0,057	0,268	0,3841	0,4135	0,1792	0,7822
Média	0,030 A	0,114 B	0,127 A	0,211 A	0,113 A	0,386 B
Mediana	0,0302	0,1063	0,1199	0,2268	0,1347	0,39876
DP	0,0102	0,0433	0,0539	0,0439	0,0183	0,0802
Assimetria	0,6561	0,4981	4,0763	2,5349	1,0319	2,989
Curtose	0,695	3,1687	17,3599	9,906	2,0095	12,9
CV	33,93%	37,69%	42,31%	20,76%	16,17%	20,77%
d³	0,0894	0,1107	0,2829 ^{ns}	0,1571	0,122	0,202 ^{ns}

Ma = Macroporosidade; Me = Mesoporosidade; Mi = Microporosidade; CC_{aren.} = Capacidade de Campo para Solos Arenosos; Cripto = Criptoporos; PT = Porosidade Total; DP = Desvio Padrão; CV = Coeficiente de Variação; d³ = teste de normalidade de Kolmogorov Smirnov; ^{ns} = não significativo pelo teste de normalidade. Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade (p≥0,05)

Tabela 5- Estatística descritiva e teste de médias dos poros do solo em área de cana-de-açúcar sob manejo na camada (0,30- 0,60 m)

Estatística Descritiva	Ma	Me	Mi	CC_{aren.}	Cripto	PT
-----m ³ m ⁻³ -----						
Tempo 6 (0,30 – 0,60 m)						
Mínimo	0.009	0.0931	0.0903	0.1703	0.1021	0.3707
Máximo	0.0669	0.2246	0.1533	0.2687	0.1732	0.4865
Média	0.039 A	0.142 A	0.122 A	0.216 A	0.128 AB	0.432 A
Mediana	0.039	0.1381	0.1212	0.2167	0.129	0.4326
DP	0.0136	0.0002	0.0131	0.0186	0.0145	0.0223
Assimetria	-0.1713	0.9546	0.0763	-0.1721	0.2533	-0.02197
Curtose	0.0617	2.1926	0.3158	0.8807	0.6548	0.6934
CV	34.85%	18.05%	10.73%	8.60%	11.30%	5.17%
d³	0.0722	0.10001	0.08449	0.09172	0.0733	0.0819
Tempo 12 (0,30 – 0,60 m)						
Mínimo	0.0144	0.0066	0.0321	0.1523	0.081	0.2859
Máximo	0.0702	0.2196	0.2988	0.2436	0.1868	0.4557
Média	0.038 A	0.118 B	0.106 B	0.198 B	0.122 B	0.385 B
Mediana	0.037	0.1153	0.1007	0.1964	0.1193	0.3918
DP	0.0134	0.0350	0.0329	0.0233	0.0223	0.0365
Assimetria	0.5037	0.343	4.077	-0.10799	0.6777	-0.5821
Curtose	-0.2961	2.8555	25.094	-0.8075	0.8469	0.0372
CV	34.95%	29.52%	30.98%	11.73%	18.22%	9.48%
d³	0.1144	0.1537	0.2139 ^{ns}	0.10812	0.0839	0.08955
Tempo 18 (0,30 – 0,60 m)						
Mínimo	0.0062	0.0416	0.0946	0.1138	0.021	0.2325
Máximo	0.0765	0.1927	0.19	0.2914	0.1661	0.4576
Média	0.032 B	0.107 B	0.120 A	0.229 A	0.133 A	0.394 B
Mediana	0.0296	0.1093	0.1168	0.2026	0.1094	0.381
DP	0.01651	0.023382	0.01536	0.031802	0.024	0.0392
Assimetria	0.7684	0.728	1.866	-0.933	-2.15	-1.539
Curtose	0.4391	3.6664	7.79	2.498	9.068	4.83
CV	50.26%	21.72%	12.78%	13.88%	17.94%	9.94%
d³	0.0983	0.127	0.1365	0.075	0.1152	0.116

Ma = Macroporosidade; Me = Mesoporosidade; Mi = Microporosidade; CC_{aren.} = Capacidade de Campo para Solos Arenosos; Cripto = Criptoporos; PT = Porosidade Total; DP = Desvio Padrão; CV = Coeficiente de Variação; d³ = teste de normalidade de Kolmogorov Smirnov; ^{ns} = não significativo pelo teste de normalidade. Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade (p≥0,05).

Apesar dos maiores valores de M_a observados após 12 e 18 meses da subsolagem (T12 e T18), devido provavelmente ao crescimento radicular da cana, estes ainda estão abaixo do nível crítico indicado como adequado para a aeração do solo, que deve ser de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (10%), como observado nas pesquisas realizadas por Klein e Libardi (2002b), Klein e Camara (2007).

Esses baixos valores da macroporosidade apresentados nos três tempos podem ser devido à influência direta dos intensos e constantes manejos adotados na área, que promovem o revolvimento do solo, atuando, inicialmente, de forma imediata no aumento da porosidade total e na densidade do solo; mas que, ao longo do tempo, tais benefícios tendem a diminuir, pelo reagrupamento das partículas sólidas do solo, tendo-se como consequência a redução da macroporosidade (TORMENA et al., 2002; REICHERT; REINER; BAIDA, 2003)

Hillel (1982) afirma que diante do aumento da compactação ocorrem alterações significativas na rede de poros onde há reduções principalmente no volume de macroporos, enquanto os microporos permanecem praticamente inalterados. Neste sentido, justificam-se os resultados apresentados na macroporosidade que foram alterados devido ao manejo mecanizado na área. Desta forma, como grande parte do sistema radicular da cana-de-açúcar encontra-se na camada superficial, esta condição é preocupante e limitante à produção em maior escala para a cultura (BALL-COELHO et al., 1992; FARIAS et al., 2008).

Em contra partida, verificou-se que, com a redução da macroporosidade, ocorreu uma redistribuição dos tamanhos de poros (RTP), com aumento significativo da Mesoporosidade (Me), Microporosidade (Mi) e Porosidade Total (PT), que foram modificados de acordo com o manejo adotado ao longo do tempo, sendo os melhores resultados obtidos após seis meses da subsolagem (T6), época da primeira coleta (Tabelas 4 e 5).

Esses resultados sugerem que, com aplicação dos demais implementos, como gradagem + sulcagem, ocorrida após a primeira coleta, e tendo-se seus efeitos verificados a partir da segunda coleta, com 12 meses da subsolagem (T12), não houve melhorias na RTP, e que tal prática pode estar promovendo diminuição da qualidade estrutural do solo. Essa redução dos poros a partir do T12 pode ser explicada pelo contínuo tráfego de maquinários realizados duas vezes ao longo da área, com posterior utilização do sulcador para o plantio.

Vale salientar que os efeitos positivos da subsolagem foram observados mesmo após seis meses de sua aplicação e que, no caso dos demais manejos (gradagem + sulcagem), mesmo estes sendo aplicados há dois meses da segunda coleta, os esperados benefícios desta prática não foram significativos.

As discussões sobre o efetivo benefício dessas práticas têm sido abordadas em outras pesquisas. De fato, como verificado em Vieira e Klein (2007), ao observarem efeitos positivos

diante do uso da escarificação que atuou na densidade do solo e na taxa de infiltração do solo em um sistema de plantio direto (PD). Vale salientar que os autores destacam o efeito cumulativo promovido por tal procedimento que sob PD proporcionou a melhora das condições para a conversação do solo e água por 24 meses.

Com relação à PT dos Argissolo Coeso, os resultados encontrados nesta pesquisa estão abaixo da faixa de valores observadas por outros autores. De fato, Tavares et al. (2012), ao avaliarem a relação espacial de atributos físicos e mecânicos de um Argissolo Coeso cultivado com cana-de-açúcar no município de Goiana-PE, apresentaram valores de PT entre 47,43% e 45,27%, nas camadas de 0- 0,20 m e 0,20-0,40 m.

Diante dos valores médios obtidos na PT, em ambas profundidades, nota-se que estes promoveram efeito direto nos resultados da Condutividade Hidráulica Saturada (K_{sat}), como constatado nas Tabelas 6 e 8. Neste sentido, Beutler et al. (2001) evidenciaram que a permeabilidade de um solo depende, dentre outros fatores, da quantidade, continuidade e tamanho de poros, sendo a compactação e a descontinuidade dos poros os dois principais processos que mais influenciaram a redução significativa da permeabilidade do solo à água.

A prática da gradagem+sulcagem parece influenciar negativamente a K_{sat} quando comparada à ação da subsolagem. Nota-se que, para a profundidade 0- 0,30m entre os tempos T6 e T12, a K_{sat} teve redução de 43,14% e, entre T6 e T18, a mesma reduziu 25,55%, conforme Tabela 7. Assim, quando aplicada a gradagem+sulcagem estas práticas não promoveram efeitos positivos e cumulativos aos da subsolagem na K_{sat} , havendo, pelo contrário, redução nos seus valores.

Fato semelhante também foi observado para a profundidade de 0,30- 0,60 m (Tabela 9). Neste caso, a redução entre os tempos T6 e T12 foi de 43,60% e de 31,28% para T6 e T18. Apesar dessa redução, em comparação ao T6, nota-se que entre os tempos T12 e T18 houve aumento de 23,62% nos valores de K_{sat} (Tabela 7), passando de 70,8 para 92,7 mm h^{-1} (Tabela 7), para os solos da camada 0- 0,30 m. O mesmo foi observado para a profundidade de 0,30- 0,60 m, com aumento de 17,93% (Tabela 9) passando de 77,76 para 94,75 mm h^{-1} (Tabela 9).

Este aumento pode ser explicado pela influência do sistema radicular da cana, mais pronunciado a partir do final do ciclo da cultura (T18). Nota-se que tal efeito foi mais “efetivo” nos primeiros 0,30 m, onde há maior acúmulo de biomassa de raízes como constatado, também, por Mozambani et al. (2006) e Ohashi et al. (2015).

Tabela 6- Estatística descritiva e teste de médias para os atributos físicos do solo em área de cana-de-açúcar sob manejo na camada (0- 0,30 m)

Estatística Descritiva	URP	Ksat	DS	RP	RT	URT
	kg kg⁻¹	mm h⁻¹	g cm⁻³	MPa	kPa	%
Tempo 6 (0 - 0,30 m)						
Mínimo	0,0384	26,66	1,372	0,54	0	2,33
Máximo	0,097	545,77	1,8	4,38	84,08	18
Média	0,060 A	124,52 A	1,6 A	2,42 A	21,32 B	7,68 A
Mediana	0,0585	118,73	1,61	1,97	16,2	7
DP	0,0128	91,974	0,105	0,9614	17,07	2,48
Assimetria	0,789	2,4112	-0,3146	0,2212	1,71	0,59
Curtose	0,7030	8,5943	-0,3227	-0,5341	3,61	1,23
CV	21,03%	73,86%	6,57%	39,60%	80,08%	37,06%
d³	0,088311	0,1437	0,1213	0,06165	0,134	0,106
Tempo 12 (0 – 0,30 m)						
Mínimo	0,0015	14,42	1,468	0,544	0	2
Máximo	0,1023	282,34	1,829	2,637	84,06	13,33
Média	0,068 A	70,8 B	1,65 A	1,34 B	25,53 B	7,52 A
Mediana	0,0687	63,88	1,647	1,194	20,39	7
DP	0,0147	49,94	0,0797	0,4627	17,95	2,33
Assimetria	-1,6502	2,7261	0,0164	0,9401	1,24	0,1029
Curtose	7,9411	9,6637	-0,218	0,7947	1,47	0,1771
CV	21,68%	70,17%	4,83%	34,36%	70,30%	31,01%
d³	0,1628 ^{ns}	0,1574	0,04457	0,1587 ^{ns}	0,1429	0,113
Tempo 18 (0 – 0,30 m)						
Mínimo	0,0206	3,89	1,30	0,34	0	2,33
Máximo	0,0798	469,18	1,91	2,18	147,89	27,67
Média	0,045 B	92,70 B	1,6 A	1,04 C	40,16 A	7,68 A
Mediana	0,0536	74,94	1,516	1,61	30,72	7
DP	0,0118	91,37	0,1337	0,4892	31,53	3,87
Assimetria	0,0995	1,8487	-0,145	0,5327	1,62	5,35
Curtose	0,3337	4,7042	-0,2561	-0,513	2,72	41,96
CV	26,03%	98,57%	8,29%	46,87%	78,51%	50,31%
d³	0,08456	0,1711 ^{ns}	0,10478	0,1134	0,171 ^{ns}	0,2205 ^{ns}

URP = Umidade Gravimétrica medida no campo na determinação da Resistência do Solo à Penetração de Raízes; Ksat = Condutividade Hidráulica Saturada; DS = Densidade do Solo; RP = Resistência do Solo à Penetração de Raízes; RT = Resistência Tênsil de Agregados; URT = Umidade Gravimétrica medida no laboratório na determinação da RT; DP = Desvio Padrão; CV = Coeficiente de Variação; d³ = teste de normalidade de Kolmogorov Smirnov; ^{ns} = não significativo pelo teste de normalidade. Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade (p≥0,05).

Tabela 7- Variação em % nos valores de Ksat ao longo do tempo na camada 0- 0,30 m

Redução entre os tempos		Aumento entre os tempos
T6- T12	T6-18	T12- T18
43,14%	25,55%	23,62%

Tabela 8- Estatística descritiva e teste de médias para os atributos físicos do solo em área de cana-de-açúcar sob manejo na camada (0,30- 0,60 m)

Estatística Descritiva	URP	Ksat	DS	RP	RT	URT
	kg kg⁻¹	mm h⁻¹	g cm⁻³	MPa	kPa	%
Tempo 6 (0,30 – 0,60 m)						
Mínimo	0.0759	30.44	1.29	0.9	0	2.333
Máximo	0.1326	590.21	1.73	4.34	78.967	18
Média	0.106 A	137.88 A	1.49 B	2.32 A	24.74 C	7.17 A
Mediana	0.1058	113.27	1.51	2.19	20.31	7
DP	0.0154	103.23	0.092	0.7486	16.6472	3.086
Assimetria	-0.0866	2.0559	-0.1618	0.9241	1.068	1.099
Curtose	-0.9652	6.7424	0.6159	1.0594	1.2477	2.008
CV	14.44%	74.87%	6.14%	32.23%	67.28%	43.04%
d³	0.06503	0.1489	0.1351	0.1222	0.1164	0.1171
Tempo 12 (0,30 – 0,60 m)						
Mínimo	0.058	19.18	1.43	1.02	5.54	3.66
Máximo	0.1655	182.63	1.79	4.71	103.67	16
Média	0.090 B	77.76 B	1.59 A	1.93 B	35.12 B	8.06 A
Mediana	0.08977	64.8962	1.5902	1.73657	29.7	7
DP	0.0181	44.66	0.0869	0.7626	21.69	2.41
Assimetria	1.2704	0.8834	0.2443	1.965	0.996	1.05
Curtose	4.9265	-0.245	-0.307	4.111	0.8051	1.44
CV	19.95%	57.43%	5.44%	39.41%	61.77%	29.97%
d³	0.10735	0.1763 ^{ns}	0.0791	0.203	0.123 ^{ns}	0.2004 ^{ns}
Tempo 18 (0,30 – 0,60 m)						
Mínimo	0.0273	2.28	1.331	0.67	10.33	2.33
Máximo	0.0797	285.96	1.719	2.94	195.42	41.33
Média	0.054 C	94.75 B	1.52 B	1.56 C	55.35 A	8.27 A
Mediana	0.044026	62.23	1.6395	0.9836	45.24	8
DP	0.01268	73.33	0.0803	0.4096	37.48	5.30
Assimetria	0.1723	0.7523	0.0453	0.523	1.73	5.16
Curtose	-0.75	-0.369	-0.185	1.998	3.63	32.38
CV	23.23%	77.39%	5.28%	26.25%	67.72%	64.14%
d³	0.1012	0.1662 ^{ns}	0.1035	0.10134	0.1434	0.2709 ^{ns}

U_{RP} = Umidade Gravimétrica medida no campo na determinação da Resistência do Solo à Penetração de Raízes; Ksat = Condutividade Hidráulica Saturada; DS = Densidade do Solo; RP = Resistência do Solo à Penetração de Raízes; RT = Resistência Tênsil de Agregados; U_{RT} = Umidade Gravimétrica medida no laboratório na determinação da RT; DP = Desvio Padrão; CV = Coeficiente de Variação; d³ = teste de normalidade de Kolmogorov Smirnov; ^{ns} = não significativo pelo teste de normalidade. Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade (p≥0,05).

Tabela 9- Variação em % nos valores de Ksat ao longo do tempo na camada 0,30- 0,60 m

Redução entre os tempos		Aumento entre os tempos
T6- T12	T6-18	T12- T18
43,60	31,28	17,93

Os resultados de Lima Neto et al. (2009) também corroboram os desta pesquisa, onde afirmam que a Ksat em um Argissolos de Alagoas, tende a diminuir em profundidade, devido a presença do horizonte coeso.

Estudos desenvolvidos por Lima et al. (2006), avaliando alterações promovidas por diferentes tipos de manejo na qualidade físico-hídrica de um Argissolo Vermelho distrófico, constataram que o maior e o menor valores médio obtido para a Ksat (44,40 e 10,42 mm h⁻¹, respectivamente) foram observados no sistema de semeadura direta, sendo os menores valores no tratamento com 4 passadas de máquina de 10 Mg. Os autores informam que os resultados obtidos estão diretamente ligados a redução da macroporosidade promovida pela intensificação dos sistemas mecanizados que, além disso, influenciaram os valores da densidade do solo.

Em relação aos valores obtidos na Densidade do Solo (DS), nota-se que diante dos diferentes sistemas de manejo na camada 0 - 0,30m as médias não diferiram entre si, permanecendo constante no valor de 1,60 g cm⁻³. Em contrapartida, na camada 0,30 - 0,60m os valores apresentaram oscilação variando na faixa de 1,49 a 1,59 g cm⁻³, sendo o maior valor o verificado no T12 em comparação com os demais tratamentos (Tabelas 6 e 8).

Estes resultados estão acima da faixa para o valor crítico de DS estabelecidos por Veihmeyer e Hendrickson (1948, apud REICHERT; REINER; BAIDA, p. 41, 2003). Estes autores definiram para solos de textura franco-arenosa os valores críticos de DS para solos compactados entre 1,40 e 1,50 g cm⁻³ e, portanto, ligeiramente mais baixos que os encontrados nesta pesquisa.

Valores inferiores aos obtidos nesta pesquisa foram encontrados em Cortez et al. (2011) que, ao avaliarem a DS de um Argissolo Amarelo do semiárido nordestino, após preparo com quatro implementos agrícolas (dentre eles escarificador, grade leve em tandem, grade leve *off-set* com discos de 0,56 m e grade leve *off-set* com discos de 0,61 m com uma, duas e três operações, usando como testemunha uma área sem preparo), obtiveram valores oscilando entre 1,30 e 1,43 g cm⁻³ nas parcelas submetidas aos sistemas de preparo do solo e ao número de operações.

Em relação aos valores obtidos em campo para avaliar a RP, os mesmos indicaram resultados elevados no T6 em ambas as profundidades (Figura 8). Vale frisar que, durante a realização do ensaio em campo, devido a limitação do equipamento em não suportar cargas acima de 5 MPa, as medições foram finalizadas antes de ter sido atingido a profundidade final da segunda camada (0,30 – 0,60 m), ficando a coleta de dados à ~ 0,40 m, não sendo possível, portanto, obter a determinação da RP até a profundidade pretendida. Neste caso, podemos

especular que, em alguns pontos, entre as profundidades de $\sim 0,40 - 0,60$ m os valores de RP podem estar acima de 5 MPa.

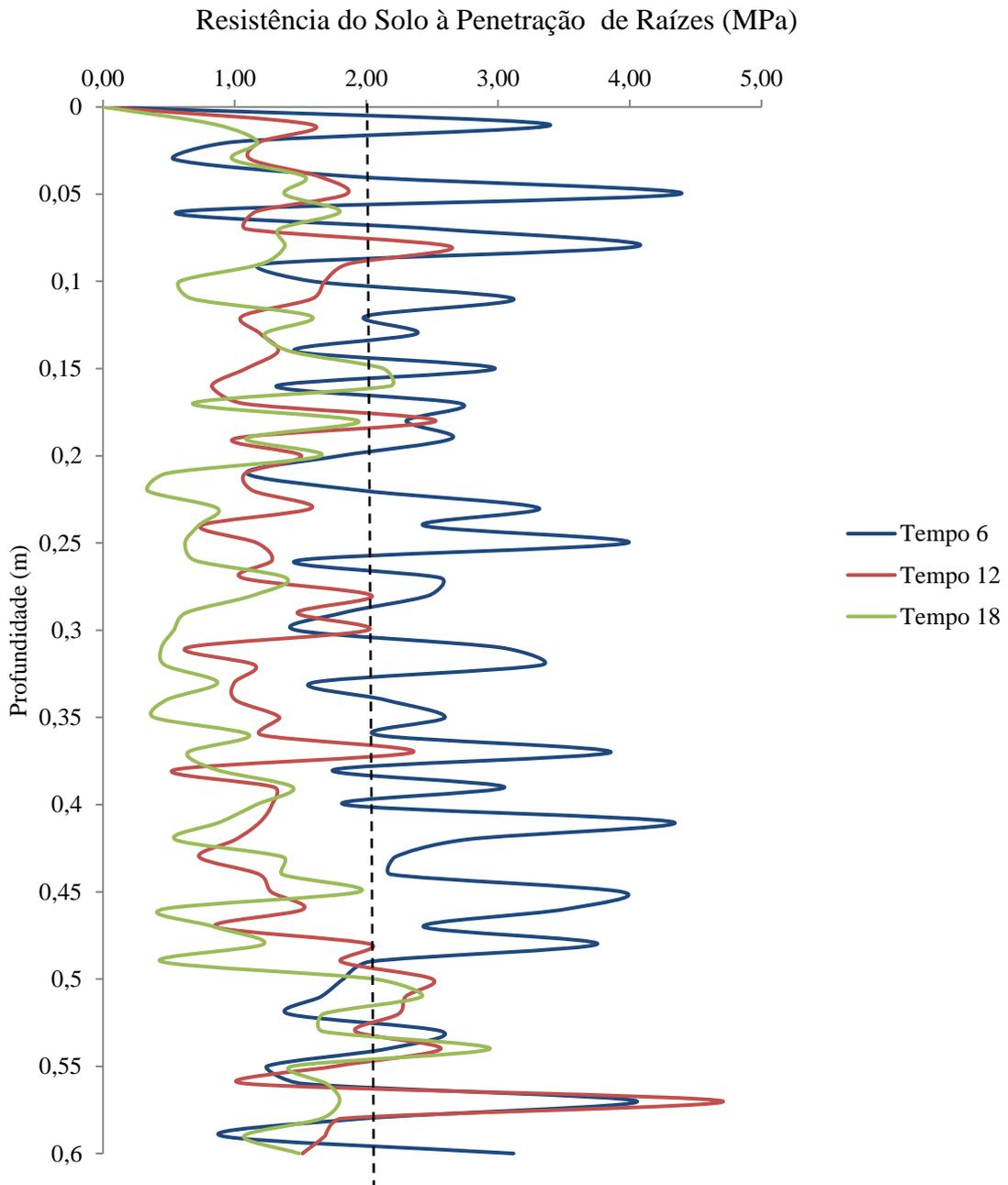


Figura 8- Resistência do Solo à Penetração de Raízes in situ em função dos tempos de coleta e suas respectivas profundidades

A linha tracejada na Figura 8 define o limite de 2 MPa, onde acima deste, os valores de RP são considerados altos, segundo a classificação da Soil Survey Staff (2017). Portanto, pode-se perceber que os tempos T6 e T12, na maioria dos pontos coletados, apresentaram valores iguais ou superiores a 2 MPa, críticos para a maioria das culturas.

A respeito disto, Taylor et al. (1966) comentam que valores de RP superiores a 2 MPa atuam como impeditivos ao crescimento e ao funcionamento do sistema radicular. Com isso, os elevados valores obtidos no T6 indicariam limitação para o desenvolvimento radicular.

Em contrapartida, outros autores concluíram que este valor crítico de RP pode variar, como sugerido por Azooz; Arshad; Franzluebbbers (1996), que ampliaram a faixa de restrição ao crescimento radicular para valores entre 2,0 e 4,0 MPa. Vale salientar que os menores valores obtidos no T18 foram, provavelmente, promovidos pela ação do sistema radicular, bem mais desenvolvido neste período do ciclo da cana, que atuou de maneira significativa para minimizar os efeitos promovidos pela compactação, refletidos pela RP.

Em relação aos valores médios obtidos para a Resistência Tênsil dos Agregados (RT) pode-se notar que, os resultados apresentados no T18, em ambas as profundidades, foram os que apresentaram os maiores valores, com 40,16 e 55,35 kPa, respectivamente (Tabelas 6 e 8). Vale salientar que estas diferenças não tiveram a influência da umidade dos agregados (U_{RT}) durante os ensaios de laboratório, pois, em todos os tratamentos, a U_{RT} foi controlada, não diferindo entre si, com valores médios entre 7,52 e 8,27 %. Neste caso, podemos atribuir tais diferenças ao maior efeito de agregação promovido pelo sistema radicular, mais evidenciado no final do ciclo da cana, período coincidente com o T18.

Resultados superiores ao referido estudo foram encontrados por Lima et al. (2004) que, estudando o comportamento de solos coesos e não coesos localizados nos Tabuleiros Costeiros no estado do Ceará, encontraram valores médios de RT entre 76,65 e 18,80 kPa, com U_{RT} entre 4,2 e 4,4 %.

4.2 CURVA CARACTERÍSTICA DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO (CCRAS) E ÍNDICE S

A manutenção contínua da qualidade física do solo é imprescindível para a preservação do local a ser cultivado e também para o acréscimo de ganhos em produtividade por área. Desta forma, incrementos agrícolas por meio de maquinários, com o intuito de promover a melhoria da qualidade física dos solos, são cada vez mais utilizados. Porém, estudos promovidos por diversos autores (HILLEL, 1982; SILVA; CABEDA; LIMA, 2005; CORTEZ et al., 2014) informam que a intensificação destes mecanismos ao longo das áreas atuam para promover o aumento da compactação dos solos e, principalmente, na redução da porosidade e, assim, limitar o desenvolvimento radicular. Com isso, a utilização da CCRAS com o intuito de analisar os efeitos dos manejos ao longo do tempo torna-se essencial.

As CCRAS comprovaram, em parte, a hipótese desta pesquisa, onde se afirma que o manejo mecanizado (subsolagem + gradagem e sulcagem) influencia negativamente a variabilidade espaço-temporal dos atributos físicos do solo.

De fato, as CCRAS ilustram que, quando o solo recebeu apenas a subsolagem (T6) estes apresentavam uma distribuição dos tamanhos dos poros (DTP) favorecendo uma maior quantidade de macroporos (poros que retêm água entre 0 e 1 kPa) e mesoporos (poros que retêm água entre 1 e 6 kPa), como indicado pela faixa de potenciais de 0 kPa até 6 kPa, destacado pelas setas azuis nas Figuras de 9 e 10. Nestas condições, o solo apenas com a subsolagem teve maior capacidade de drenar a água, arejando o solo de forma mais eficiente.

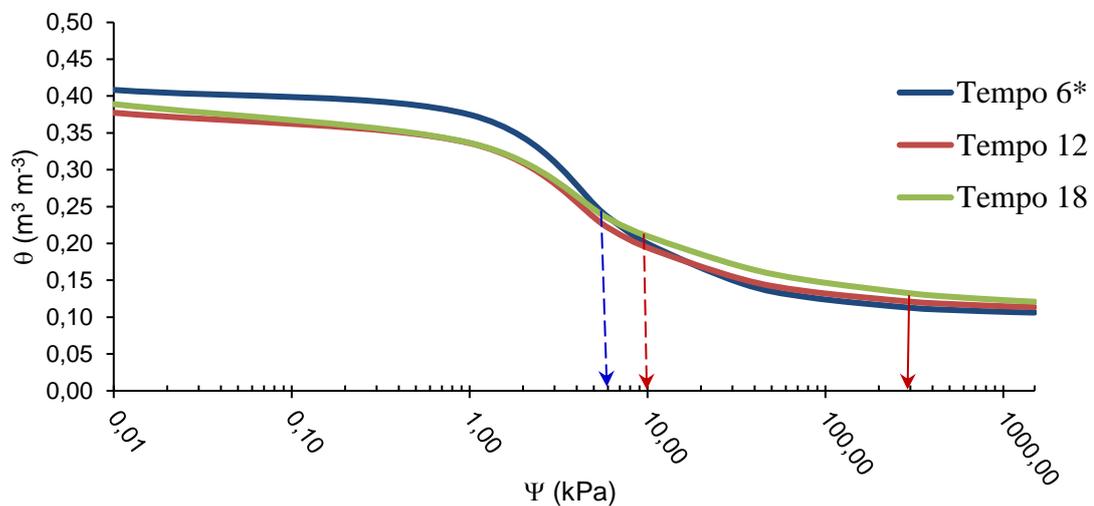


Figura 9- Curva Característica de Retenção de Água no Solo (CCRAS) ajustada ao modelo van Genuchten na camada 0- 0,30 m

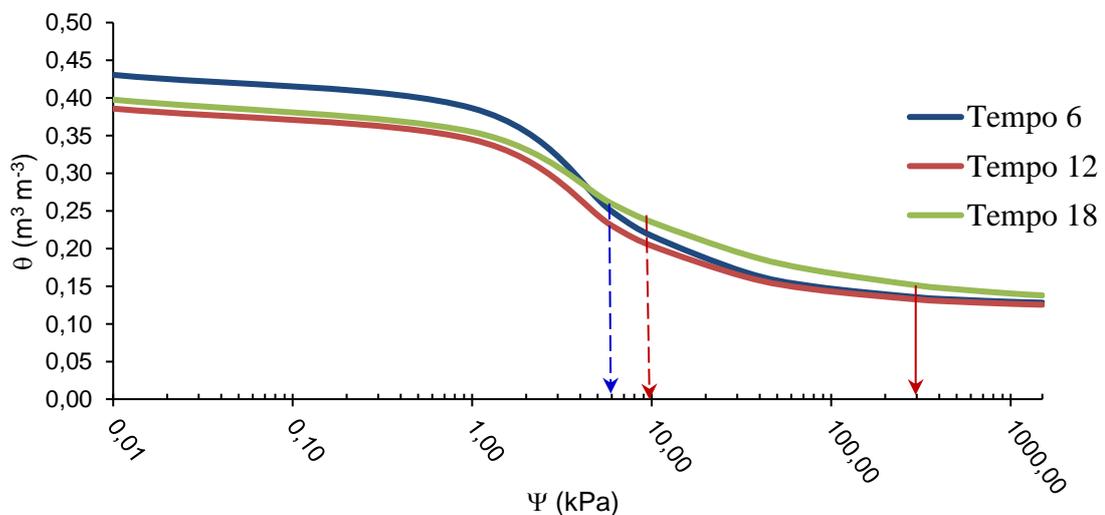


Figura 10- Curva Característica de Retenção de Água no Solo (CCRAS) ajustada ao modelo de van Genuchten na camada 0,30- 0,60 m

Note que, após a aplicação da gradagem e sulcagem (T12) o solo diminuiu sua capacidade de drenar em comparação ao T6. Porém, após a implantação da cana e seu desenvolvimento, e atingido o tempo da terceira coleta (T18), percebe-se que o solo recuperou, em parte, comparando com o T12, sua macro e mesoporosidade, principalmente na camada 0,30 - 0,60 m.

Com relação aos outros pontos da curva, na faixa de água mais prontamente disponível para as plantas, 10 à 300 kPa, indicado entre as setas vermelhas tracejadas e contínua, respectivamente (Figuras 9 e 10), percebe-se que a ação do sistema radicular parece atuar na formação de poros biológicos, aumentando assim a retenção de água, e sua pronta disponibilidade às plantas, principalmente na camada de 0,30-0,60 m, onde há maior concentração do sistema radicular, como observado por Mozambani et al. (2006) e Ohashi et al. (2015).

Com relação a isto, a literatura indica que há uma subdivisão entre a formação dos microporos, dividindo-os entre aqueles gerados pela estrutura do solo e ação biológica (poros que retêm água entre as tensões de 6 e 300 kPa); e aqueles que têm apenas influência da textura do solo (poros que retêm água entre as tensões de 300 e 1500 kPa) (PIRES et al. 2008).

Dessa forma, avaliando os efeitos dos manejos ao longo do tempo, percebe-se, nitidamente, que a DTP, devida à ação apenas da subsolagem, favorece a uma maior quantidade de poros que atuam na drenagem e redistribuição de água; porém, quando somado aos efeitos da gradagem + sulcagem, há uma nítida redução desses poros, como também daqueles que atuam retendo água na capacidade de campo. Por fim, observa-se que a ação do sistema radicular foi mais eficiente na DTP que favorecem a disponibilidade de água.

A implementação de técnicas de mecanização ao longo da área visa fornecer condições favoráveis para que os atributos físico-hídricos do solo sejam alterados positivamente por tais maquinários, e, assim, proporcionar o máximo desenvolvimento da cultivar, estendendo-se estes efeitos até o fim do ciclo da cultura. Entretanto, os resultados obtidos após a efetivação de cada tratamento identificaram que o manejo mais adequado na área em estudo seria a subsolagem, seguindo-se do plantio, sem a gradagem, já que a sulcagem é inevitável. Portanto, pode-se especular que essa combinação de manejo promoveria uma DTP mais eficaz com relação à drenagem, aeração do solo e disponibilidade de água às plantas.

Validando as informações obtidas pelo efeito do T6 no referido estudo, Souza et al. (2014) avaliando o efeito do preparo do solo na retenção de água em um Argissolo Amarelo Coeso, em lavoura de café Conilon (*Coffea canephora Pierre*) submetida à subsolagem na linha de plantio, verificaram que o efeito exercido pelo subsolador atuou no aumento de água

disponível nas camadas de 0- 0,60m e, além disso, promoveu a maior retenção de água em baixas tensões. Os autores ainda informam que o fator tempo após o preparo do solo não variou, sendo assim, as características promovidas pela subsolagem na melhoria da qualidade física do solo persistiram ao longo do tempo.

No entanto, trabalhos como os de Mentges et al. (2010) e Cortez et al. (2011) avaliando os efeitos promovidos por meio da haste escarificadora em Argissolo Vermelho- Amarelo e Argissolo Amarelo, respectivamente, encontraram que os efeitos promovidos pelas hastes atuaram diretamente na redução da porosidade total dos solos.

Diante das intensivas práticas mecanizadas utilizadas nos solos agrícolas modelos matemáticos têm sido usados para indicar a qualidade estrutural do solo, e quais atributos físicos do solo são mais afetados por estes manejos. Um dos comumente utilizados é o Índice S proposto por Dexter (2004a) que, por meio do ponto de inflexão encontrado na CCRAS ajustada pelo modelo de van Genuchten, fornece um valor limite ($S = 0,035$) para avaliar a condição estrutural do solo.

Ao analisarmos os valores obtidos pelo módulo do Índice S na Tabela 10 podemos verificar que, independentemente do tempo, todos os valores de S ficaram acima do índice crítico (0,035), comprovando que, segundo este atributo, os solos possuem boa qualidade estrutural. Avaliando os resultados ao longo dos tempos de coleta é nítida a redução da qualidade estrutural do solo, com diminuição do S na sequência $T6 > T12 > T18$.

Tabela 10- Parâmetros de ajuste (coeficientes) da CCRAS e o módulo do Índice- S para os diferentes tratamentos nas camadas de 0- 0,30 m e 0,30- 0,60 m

Tempo (meses)	CCRAS					S- index ^b
	θ_s^a	θ_r^a	α^b	n^b	m^b	
(0-0,30 m)						
6	0,41	0,10	0,051	1,682	0,405	0,089
12	0,38	0,11	0,070	1,576	0,365	0,070
18	0,39	0,11	0,097	1,446	0,308	0,060
(0,30- 0,60 m)						
6	0,43	0,12	0,065	1,628	0,386	0,084
12	0,39	0,12	0,071	1,587	0,370	0,069
18	0,40	0,12	0,084	1,417	0,294	0,057

^a = $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$; ^b = adimensional

Neste sentido, os valores fornecidos pelo S podem ser usados como um indicativo de melhoria da condição estrutural do solo, refletida pela melhor distribuição de tamanho de poros no solo, o que, conseqüentemente, está associado a uma menor restrição física para o

crescimento das raízes das plantas, quer seja por aeração, restrição mecânica ou por características de retenção de água (ANDRADE; STONE, 2009).

4.3 ANÁLISE GEOESTATÍSTICA E KRIGAGEM (MODELOS DE ELEVAÇÃO)

Vale destacar que, os valores de CV classificados como baixos na camada 0- 0,30 m no T6 e T12 foram apenas para CCarenoso, PT e DS; já no T18 apenas a DS foi apresentou CV < 12%; os demais atributos, em todos os tempos de coleta, encontraram-se de média a alta variabilidade.

Em relação aos valores apresentados na camada subsuperficial, o T6 apresentou baixa variabilidade nos atributos como: Mi; CCarenoso; Cripto; PT e DS. Em relação ao T12 os atributos CCarenoso, PT e DS seguiram esse mesmo limite; porém no T18 apenas a DS apresentou baixa variabilidade, sendo os demais atributos com valores na faixa considerada como media a alta.

Neste sentido, diante da faixa de valores encontrados durante as análises estatísticas, nota-se que o CV, na maioria destes atributos, encontraram-se entre média e alta variabilidade em decorrência dos manejos promovidos ao longo do tempo. Porém, este parâmetro estatístico não fornece indicativos para avaliar a distribuição espacial e temporal dos referidos atributos, com isso, realizou-se a análise geoestatística com o intuito de identificar o comportamento espaço-temporal dos atributos físicos do solo.

Os resultados dos ajustes dos semivariogramas, por meio da análise geoestatística, apresentaram variabilidade espacial e temporal nos atributos físicos analisados nas distintas camadas analisadas (Tabelas 11 e 12; Figuras 11 a 18). Os modelos semivariogramas escolhidos para melhor representar as variáveis estudadas no ramo da física do solo foram o esférico e exponencial, pois os mesmo apresentavam coeficientes de determinação (R^2) superiores a 0,7 (CORÁ et al., 2004).

Tabela 11- Parâmetros geoestatísticos da análise granulométrica do solo sob manejo

Parâmetros Geoestatísticos	Camada (0- 0,30 m)			Camada (0,30- 0,60 m)		
	Caracterização					
	% Argila	% Areia	% Silte	% Argila	% Areia	% Silte
Modelo	Esf.	Esf.	Esf.	Exp.	Exp.	Esf.
EP	2,96	3,21	1,45	6,95	2,86	1,89
Patamar	10,75	13,93	4,65	16,74	10,09	4,36
Alcance	55,90	53,92	210,90	279,90	44,20	141,24
R ²	0,996	0,988	0,833	0,903	0,863	0,833
DE	0,725	0,769	0,688	0,585	0,716	0,563
VC	1,024	1,113	1,050	0,722	0,790	1,022

Esf.= Esférico; Exp.= Exponencial; EP = efeito pepita; R² = coeficiente de determinação; DE = dependência espacial; VC = validação cruzada.

Tabela 12- Parâmetros geoestatísticos dos atributos físicos do solo em detrimento do manejo sob cultivo de cana-de-açúcar nas camadas 0- 0,30 m e 0,30- 0,60 m

Parâmetros Geoestatísticos	U _{RP}	DS	RP	PT	U _{RP}	DS	RP	PT	U _{RP}	DS	RP	PT
	%	g cm ⁻³	MPa	%	%	g cm ⁻³	MPa	%	%	g cm ⁻³	MPa	%
Camada (0- 0,30 m)												
	TEMPO 6				TEMPO 12				TEMPO 18			
Modelo	Exp.	Lin.	Exp.	Exp.	Esf.	Lin.	Esf.	Exp.	Esf.	Exp.	Exp.	Exp.
EP	0,12	—	0,39	1,70	0,29	—	0,00	1,11	0,57	0,00	0,02	2,11
Patamar	1,91	—	1,85	8,24	1,07	—	0,15	4,04	2,47	0,01	0,26	16,30
Alcance	49,13	—	593,46	24,14	20,05	—	17,35	24,00	200,37	27,30	25,99	18,90
R ²	0,816	—	0,866	0,710	0,937	—	0,805	0,702	0,900	0,858	0,961	0,704
DE	0,933	—	0,786	0,793	0,720	—	0,935	0,842	0,767	0,856	0,912	0,871
VC	0,336	—	0,019	0,574	0,542	—	0,880	-0,219	0,908	0,820	0,748	0,578
Camada (0,30- 0,60 m)												
	TEMPO 6				TEMPO 12				TEMPO 18			
Modelo	Lin.	Lin.	Esf.	Exp.	Exp.	Lin.	Esf.	Exp.	Exp.	Lin.	Exp.	Esf.
EP	—	—	0,06	0,53	0,55	—	0,12	1,35	0,93	—	0,01	1,36
Patamar	—	—	0,24	4,29	1,75	—	1,01	8,76	1,72	—	0,18	9,98
Alcance	—	—	26,09	27,30	25,21	—	282,48	28,50	56,54	—	26,96	22,00
R ²	—	—	0,921	0,891	0,748	—	0,905	0,788	0,836	—	0,913	0,850
DE	—	—	0,752	0,876	0,683	—	0,881	0,846	0,456	—	0,915	0,864

U = Umidade Gravimétrica; DS = Densidade do Solo; RP = Resistência do Solo à Penetração de Raízes; PT = Porosidade Total; Lin.= Linear; Esf.= Esférico; Exp.= Exponencial; EP = efeito pepita; R² = coeficiente de determinação; DE = dependência espacial; VC = validação cruzada

A maioria dos atributos possuíram resultados na faixa de dependência espacial forte a moderada; com exceção para os resultados obtidos na camada 0- 0,30 m para Areia; no T6 para U_{RP}, RP e PT; no T12 para RP, PT; e no T18 para U_{RP}, DS, RP, PT. Na camada 0,30- 0,60 os atributos que não possuíram DE foram: no T6 para RP e nos tempos 12 e 18 para RP e PT.

Segundo Cambardella et al. (1994) a DE classificada como forte pode ser atribuída aos fatores de formação do solo, como material de origem, relevo, clima, organismos e tempo; ao passo que a DE fraca pode ser atribuída a fatores extrínsecos, como adubação, preparo do solo e tráfego de máquinas agrícolas.

Carvalho; Takeda; Freddi (2003) ao analisarem a dependência espacial dos atributos químicos e físicos em solos cultivados com videira em São Paulo obtiveram valores de DE para porosidade total (45%) inferiores aos obtidos nesta pesquisa. Mion et al. (2012) estudando a variabilidade espacial da umidade e a resistência do solo à penetração de raízes em áreas sob diferentes usos e manejos em um Argissolo Amarelo de textura arenosa verificaram que estes dois atributos apresentaram DE fraca.

Nota-se que dentre as variáveis estudadas estas apresentaram distintos alcances. Este parâmetro detém a finalidade de representar a distância com que os pontos estudados da mesma variável se correlacionam e, assim, apresentar o mesmo efeito. Os resultados para esta variável possuíram os maiores valores para a fração silte na camada 0-0,30 m (210,90 m) e para as frações Argila e Silte na camada 0,30- 0,60 m, 279,90 e 141,24 m respectivamente (Tabela 11).

Baracat et al. (2009) caracterizando a variabilidade espacial de atributos do solo e os fatores de erosão em diferentes pedoformas, sob cultivo de cana-de-açúcar, em um Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico em São Paulo, obtiveram valores de alcance (A) superiores aos encontrados para as frações granulométricas do solo em estudo, sendo 144, 112 e 122 para argila, silte e areia, respectivamente.

Em relação ao alcance obtido com os dados dos demais atributos, em detrimento do tempo de coleta, nota-se que os maiores valores foram aqueles obtidos no T6, por meio da RP (593,46 m) e no T18 pela U_{RP} (200,37 m), ambas na profundidade de 0- 0,30m; como também o encontrado no T12, pelos dados da RP (282,48 m) na camada subsuperficial, conforme pode ser verificado na Tabela 12.

Em referência aos menores alcances promovidos ao longo dos tempos de coleta podemos destacar os encontrados no T12, por meio da RP (17,35 m) e no T18, pelos dados da PT (18,90 m), ambas na camada 0- 0,30 m; sendo, na camada subsequente, os valores da U_{RP} (17,36 m) para o T6.

Em comparação aos alcances obtidos para U_{RP} , Tavares et al. (2012) estudando a relação espacial de atributos físicos e mecânicos de um Argissolo Coeso, cultivado com cana-de-açúcar, obtiveram valores de 27,79 e 53,43 m nas profundidades de 0- 0,20 e 0,20- 0,40 m, respectivamente. Vale salientar que estes valores aproximam-se dos resultados no T12 na camada 0- 0,30m e no T18 na camada subsuperficial.

Com relação ao efeito pepita puro, este fato foi observado apenas nas variáveis DS e U_{RP} . Para a DS, este indicador ocorreu nos solos coletados em superfície, para os T6 e T12; sendo que na camada subsuperficial, a DS apresentou esta característica em todos os tempos de coleta. Para a umidade gravimétrica durante o ensaio da RP (U_{RP}), na camada subsuperficial, tal evento foi constatado apenas no T6.

Com relação a isto, Bertolani e Vieira (2001) comentam que “O efeito pepita puro pode-se referir a um erro analítico (variabilidade não explicada) ou pode ser devido a variações não detectadas, conforme a distância de amostragem utilizada”. Neste caso, sugere-se que ocorra uma maior quantidade de pontos coletados na malha amostral ou que seja reduzida a distância entre os pontos coletados.

Em relação ao único resultado de DS que não apresentou efeito pepita puro (27,30 m), observado nos solos coletados no T18, na camada superficial, está próximo ao encontrado por outros autores, como aquele verificado por Oliveira et al. (2015) que, ao analisarem a variabilidade dos atributos químicos e físicos em um Argissolo Vermelho, sob distintas áreas no Amazonas, encontraram em área de pastagem o valor de alcance para DS igual a 29,70 m.

A seguir, são mostrados nas Figuras 11 a 18 os mapas de superfície interpolada nas camadas de 0- 0,30 e 0,30- 0,60 m das frações granulométricas e dos atributos físicos que indicam a qualidade física do solo. Segundo Guimarães et al. (2016) a partir dos mapas de superfície fornecidos após o procedimento de Krigagem “é possível identificar a localização e a abrangência dos valores extremos, o grau de homogeneidade da área e as direções de maior gradiente”. Estes autores ainda enfatizam que o uso deste método auxilia na identificação de padrões que tenham correlação com outras variáveis, como a altitude, manejo e uso da terra.

Neste sentido, ao analisarmos as distribuições das frações granulométricas ao longo das camadas podemos observar que na camada de 0,30-0,60 m os valores de argila total (%) foram os maiores em comparação com os de 0-0,30m (Figura 11). Vale salientar que, a relação argila/areia ocorre de forma inversa, pois na camada de 0,30-0,60 m foram observados os menores valores de areia.

Semelhanças com estes resultados na distribuição das frações granulométricas do solo ao longo do perfil podem ser observados nos trabalhos de Giarola et al. (2001); Giarola et al.

(2009) e Lima et al. (2004) que, ao analisarem o comportamento de solos coesos, verificaram que em profundidade os teores de argila total são crescentes, em contrapartida, os de areia total tendem a decrescer. Segundo estes autores, esta peculiaridade é uma característica intrínseca de solos com horizontes coesos, como o estudado na pesquisa.

Em relação ao conteúdo de água ($U_{RP}\%$) apresentados nas Figuras 12 e 16, verifica-se um padrão mais uniforme na distribuição espacial representada no T18 na camada 0- 0,30m em relação às faixas de descontinuidades apresentadas pelos demais tempos e profundidades. Por outro lado, podemos identificar que, apesar desta uniformização apresentada no T18, o mesmo apresenta os menores valores em escala ao compararmos com o T6 e T12, sendo o T6 apresentando os maiores valores em ambas as profundidades de coleta.

A distribuição de valores ao longo da área para a DS nos tempos 12 e 18 na camada 0- 0,30 m evidenciam que os maiores valores estão presentes onde os teores de água foram menores.

Ao analisarmos a distribuição dos resultados para a RP em campo, nota-se que há uma relação inversamente proporcional com a umidade do solo referente ao momento do ensaio ($RP \sim 1/U_{RP}$). Assim, nos pontos que apresentaram baixos valores de U_{RP} os respectivos resultados de RP foram os mais elevados. Vale destacar que, mesmo o T6 apresentando os maiores valores de U_{RP} , a RP foi a que obteve os maiores resultados para o referido atributo. Neste sentido, Cerqueira Silveira et al. (2010) estudando um Argissolo Amarelo distrocoeso apresentando valores de RP acima de 2,5 MPa na $CC_{arenoso}$, informam que, mesmo para conteúdos elevados de umidade no solo, este atua influenciando diretamente no crescimento vegetal .

Em relação à distribuição dos valores apresentados na PT constata-se que estes foram inversamente proporcionais aos obtidos na RP. Neste sentido, verifica-se a funcionalidade de métodos geoestatísticos para efetivação de meios para avaliar a qualidade do solo, servindo como indicador de sua melhoria e eficácia, auxiliando assim na tomada de decisões em relação ao suprimento das necessidades exigidas pelo mercado consumidor.

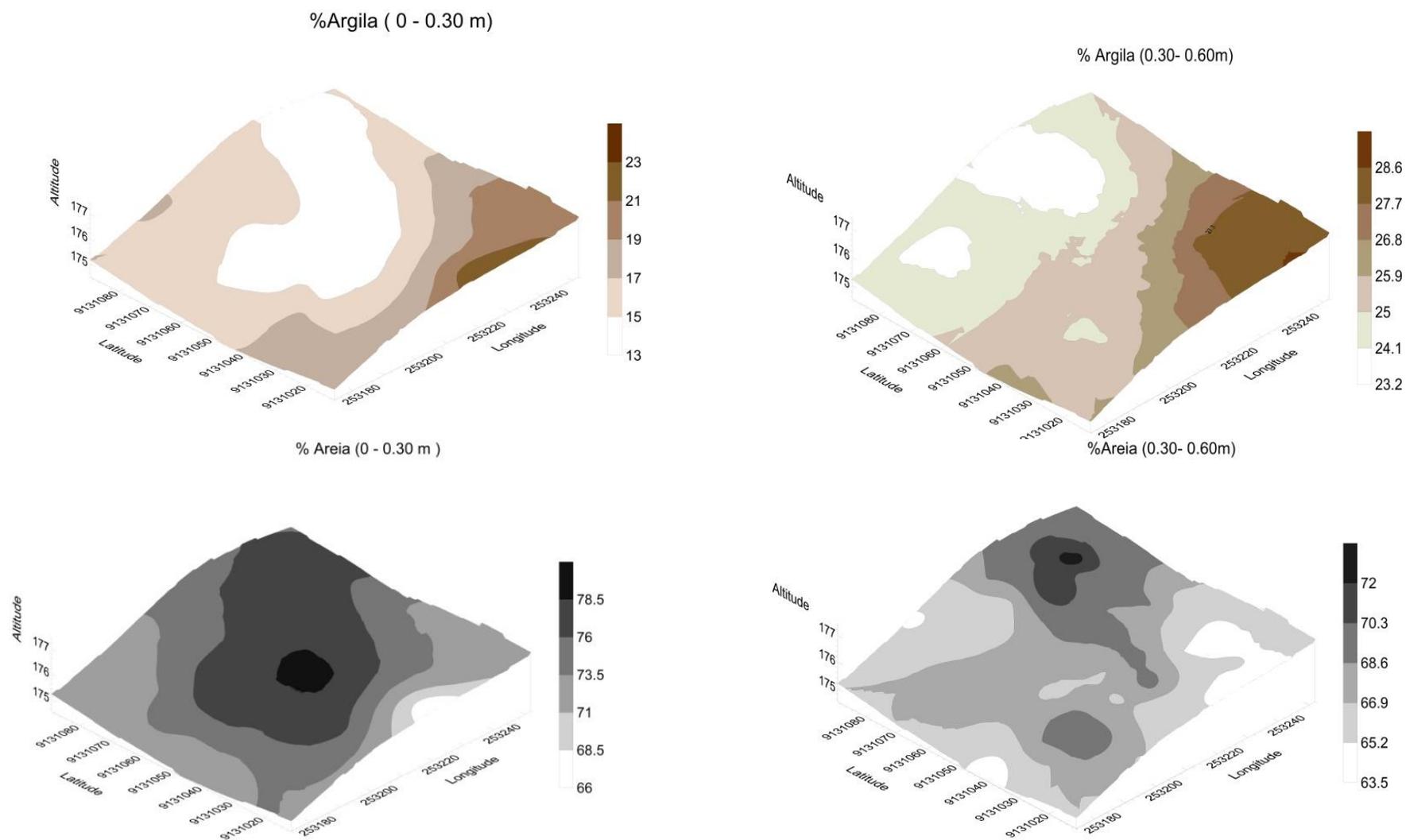


Figura 11- Mapas de Krigagem das frações granulométricas do solo em área de cana-de-açúcar nas suas respectivas profundidades

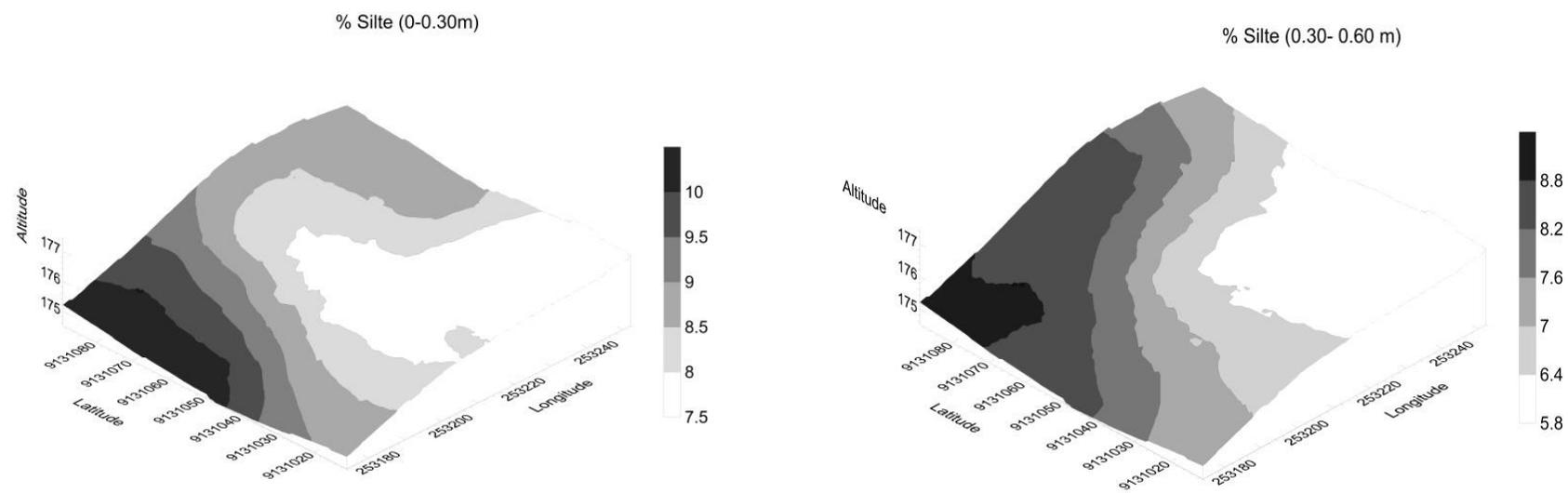


Figura 12- Continuação dos Mapas de Krigagem das frações granulométricas do solo em área de cana-de-açúcar nas suas respectivas profundidades

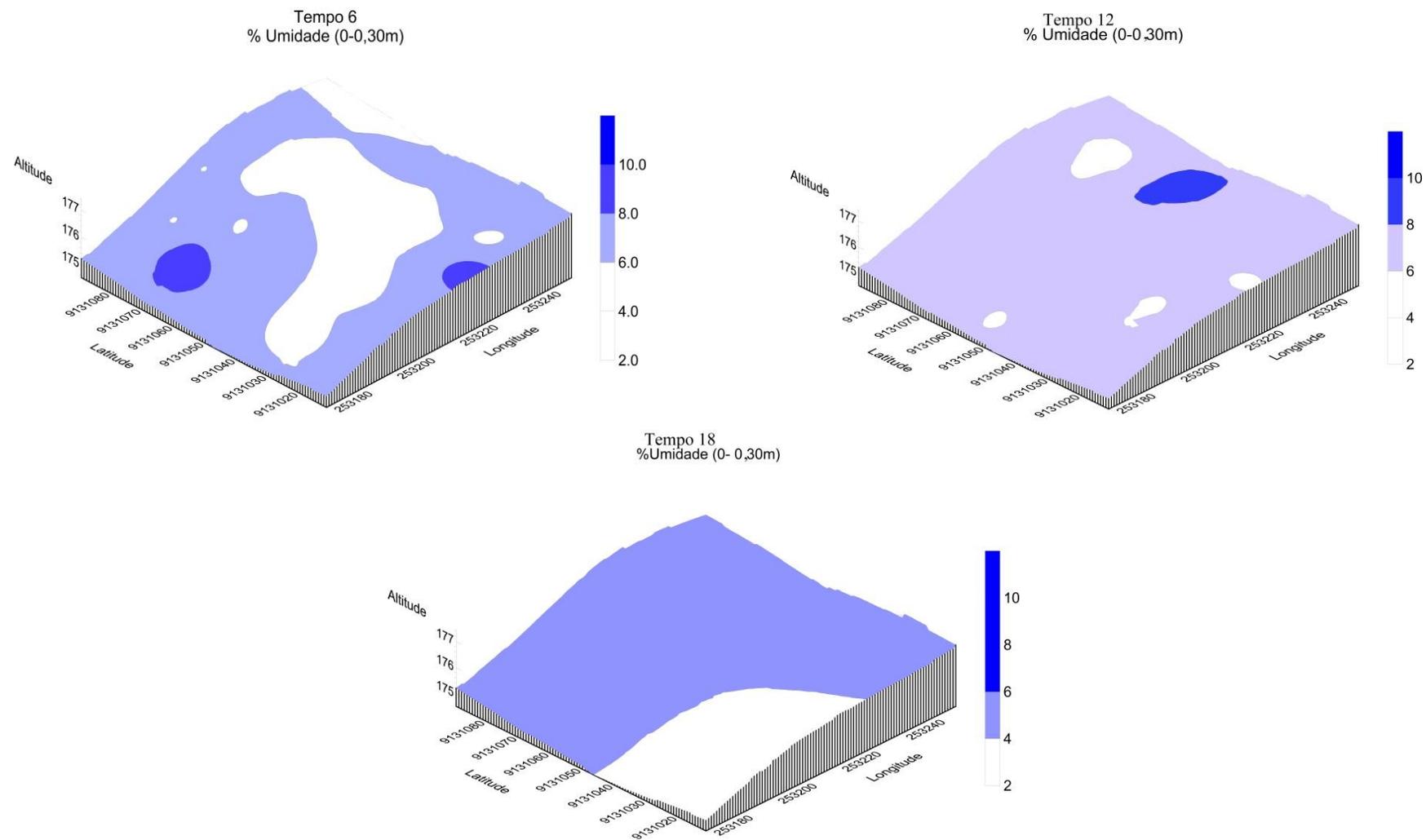


Figura 13- Mapas de Krigagem para % Umidade em T6; T12 e T18 (0-0,30m)

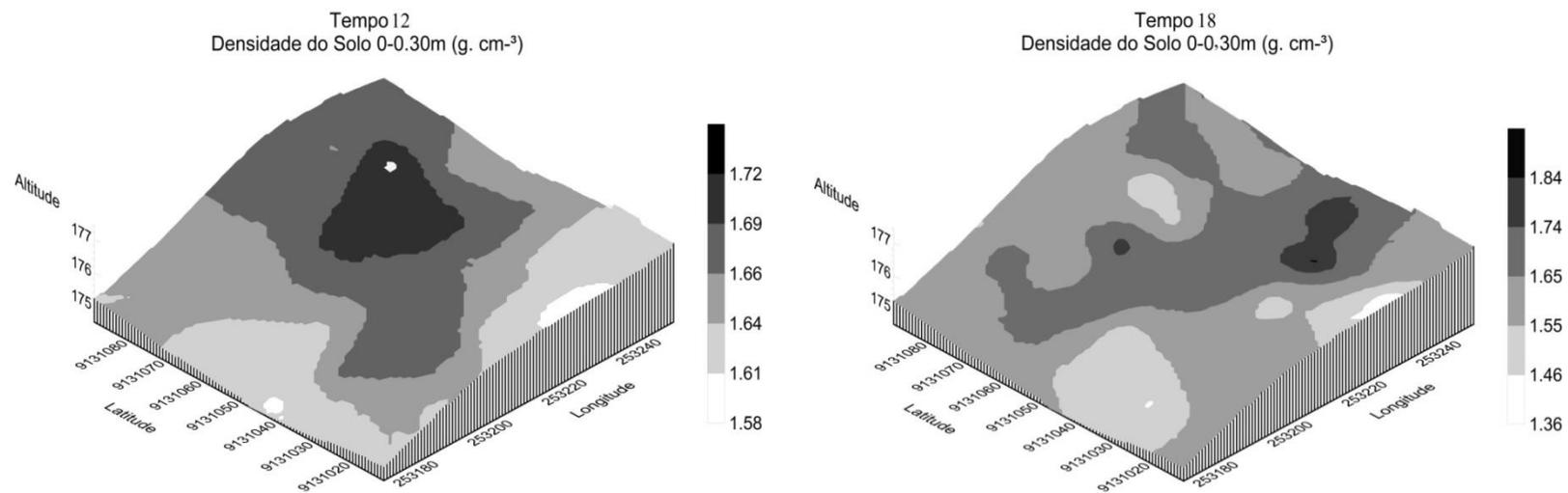


Figura 14- Mapas de Krigagem para Densidade do Solo em T12 e T18 (0-0,30m)

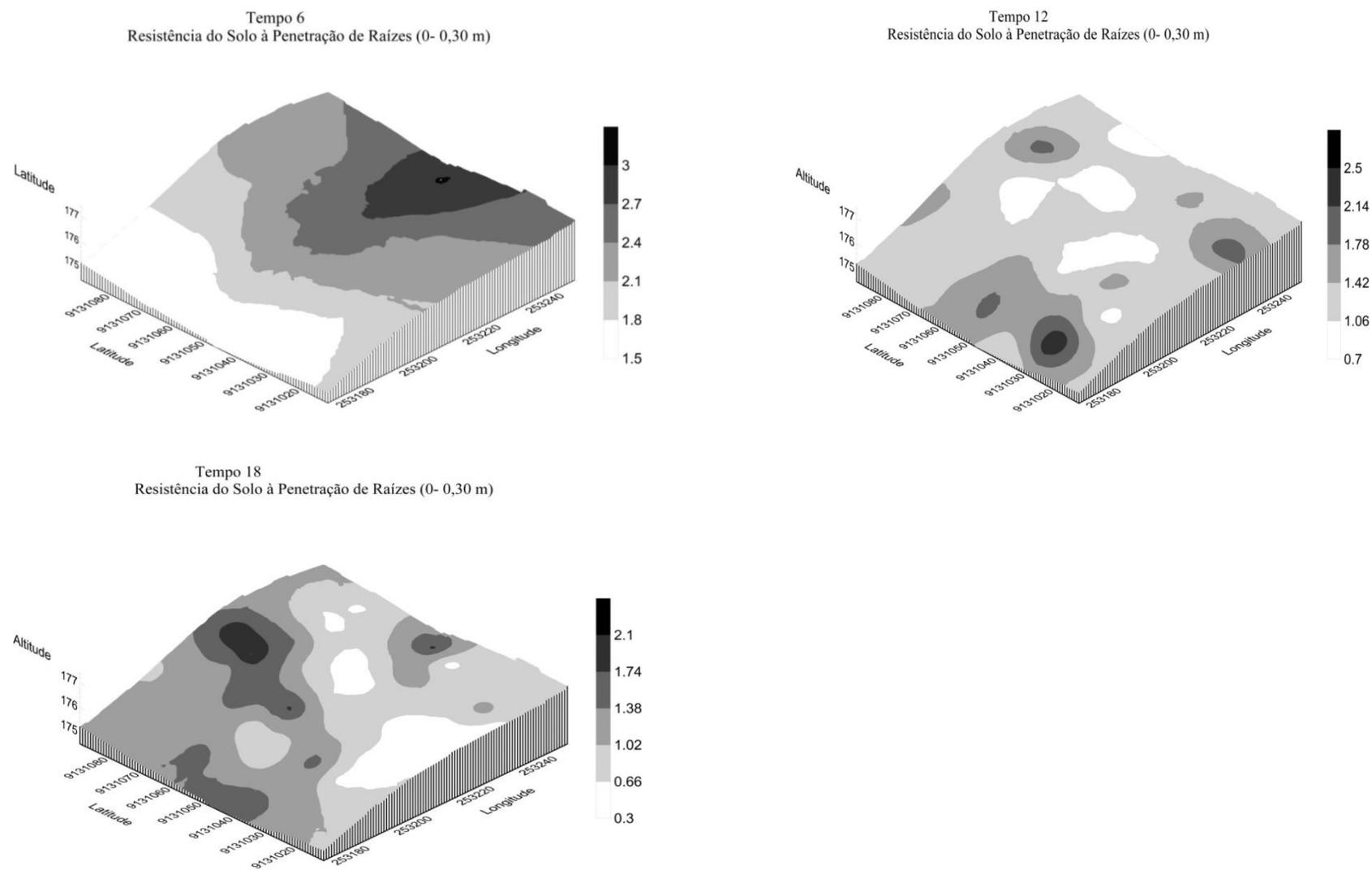


Figura 15- Mapas de Krigagem para Resistência do Solo à Penetração de Raízes em T6; T12 e T18(0- 0,30m)

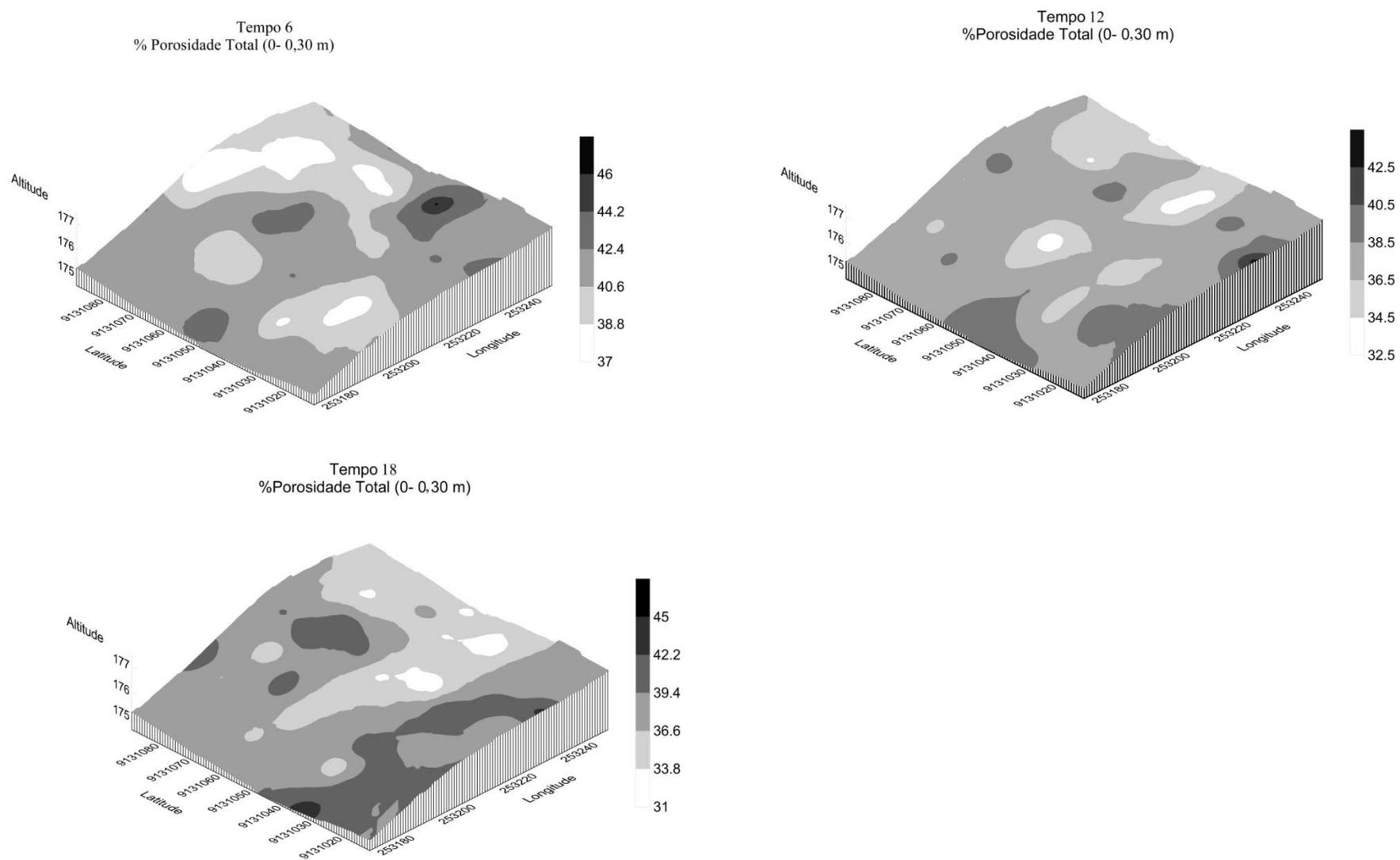


Figura 16- Mapas de Krigagem para % Porosidade Total em T6; T12 e T18 (0- 0,30 m)

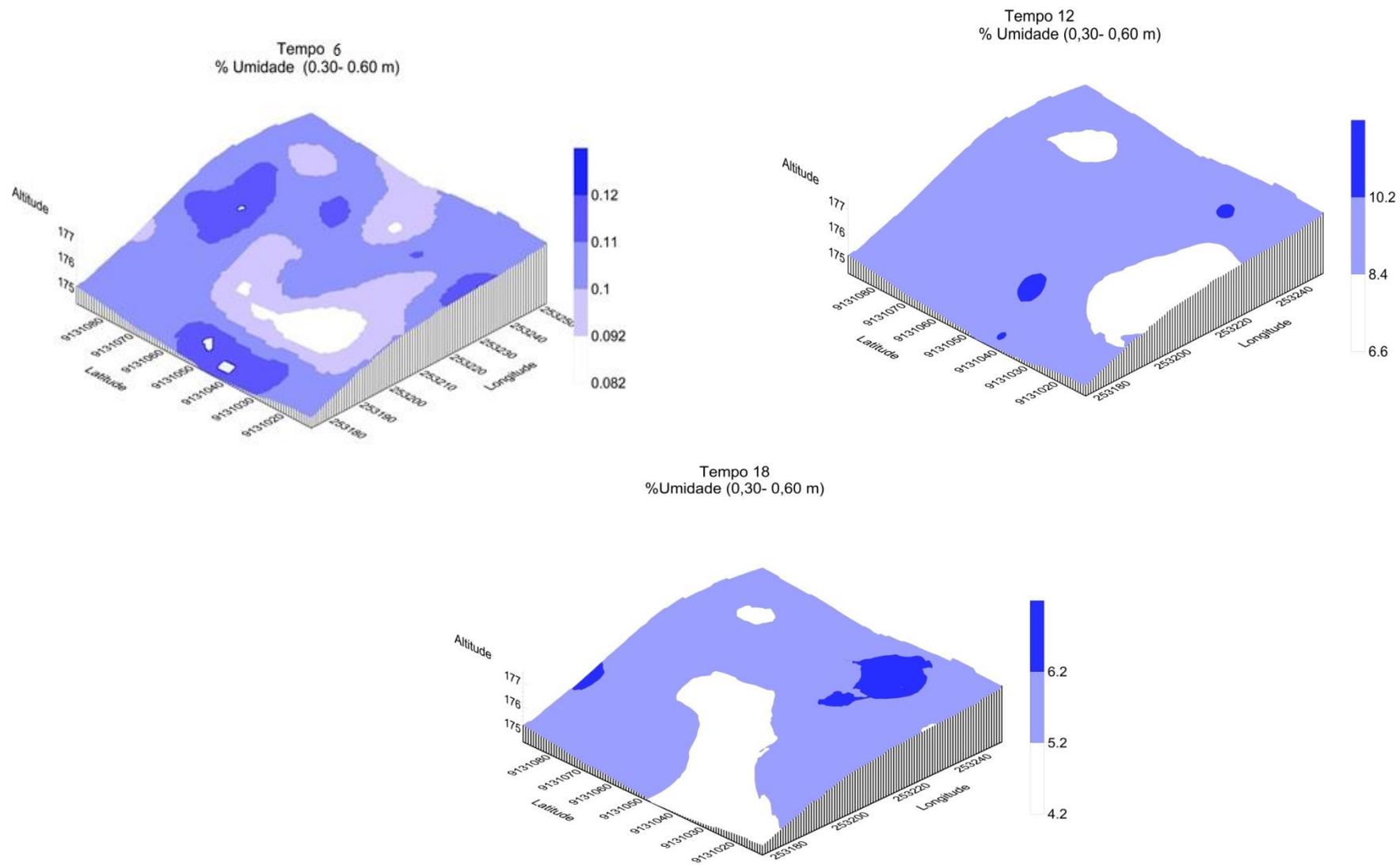


Figura 17- Mapas de Krigagem para % Umidade em T6; T12 e T18 (0,30- 0,60 m)

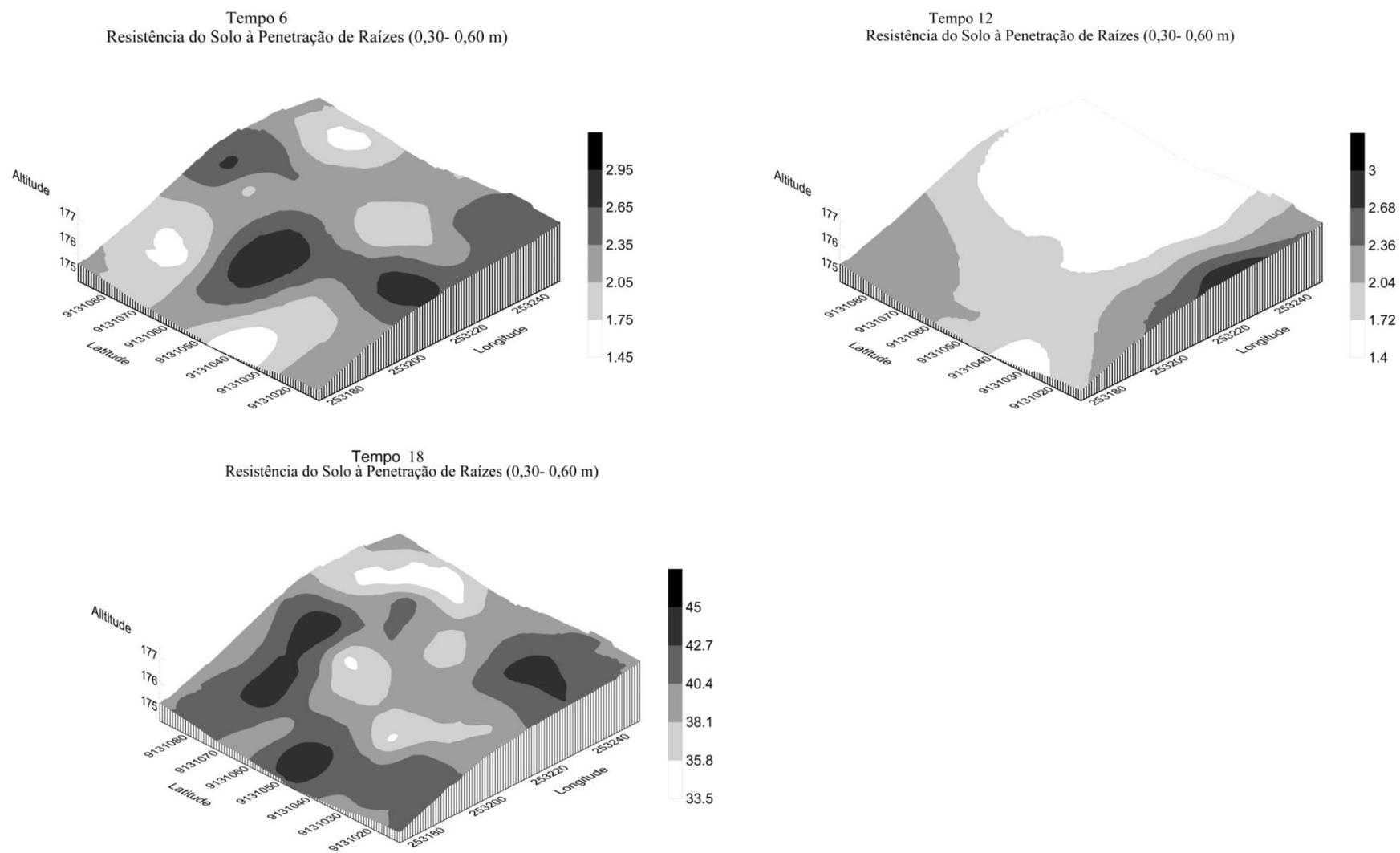


Figura 18- Mapas de Krigagem para Resistência do solo à penetração de Raízes em T6; T12 e T18 (0,30- 0,60 m)

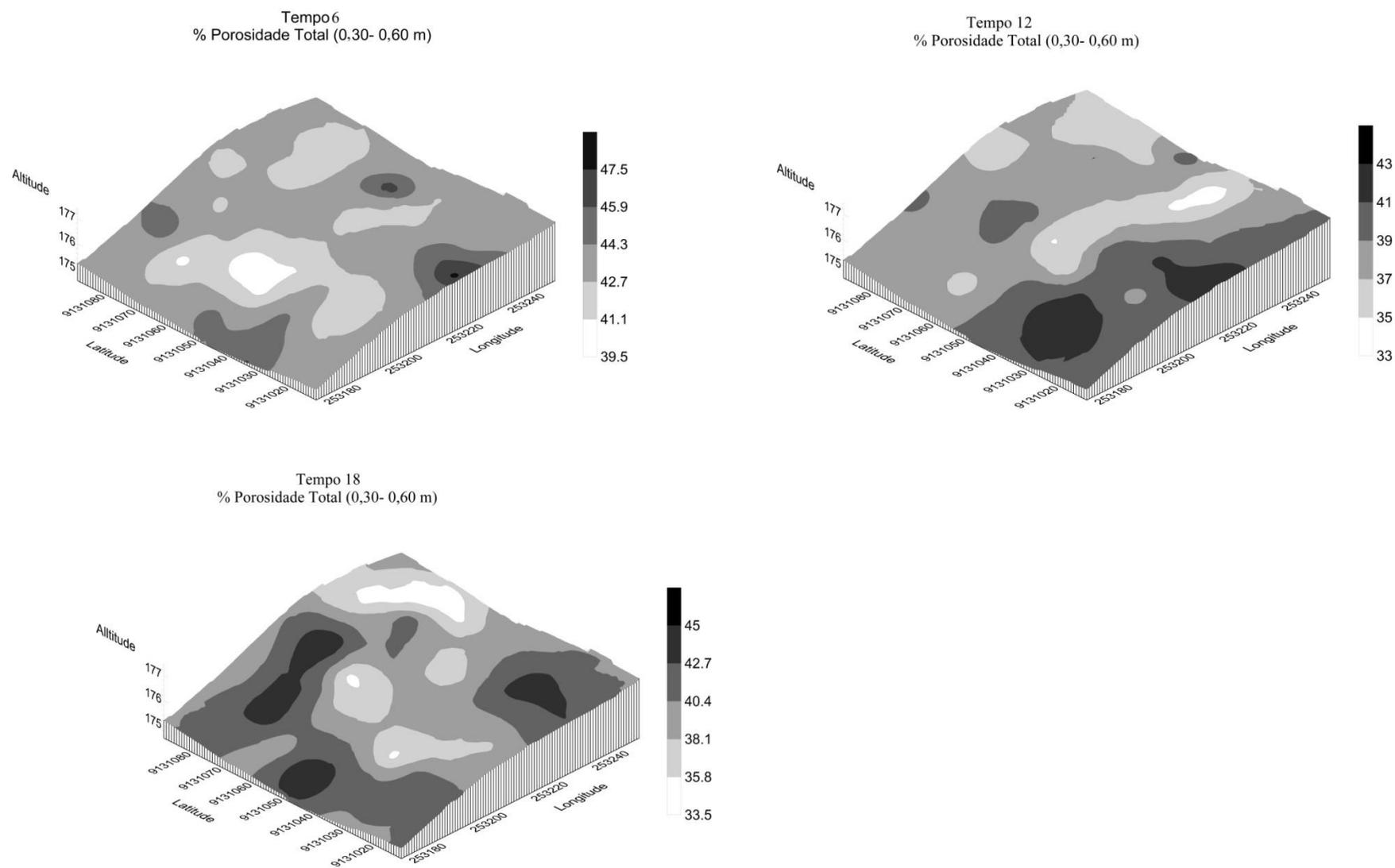


Figura 19- Mapas de Krigagem para % Porosidade Total em T6; T12 e T18 (0,30- 0,60 m)

5 CONCLUSÕES

- I. Os sistemas de manejo mecanizados promoveram efeitos negativos na Macroporosidade, sendo obtidos resultados, em todos os tempos de coleta, inferiores aos recomendados para a aeração (10%). Em relação aos valores mais adequados de PT foram os referentes aos solos do T6, em ambas as profundidades. Estes valores influenciaram diretamente nos resultados obtidos da Ksat no referido tempo e nas suas respectivas profundidades;
- II. A DS não diferiu nos solos da camada superficial, com valores médios de $1,6 \text{ g cm}^{-3}$, mas com menores valores na camada subsuperficial. Em contrapartida, os valores relativos à RP possuíram maior variação de valores. Em T6 os valores médios ficaram acima do recomendado para o crescimento do sistema radicular;
- III. Em relação aos dados da CCRAS, o efeito promovido pela subsolagem (T6) apresentou uma maior quantidade de macro e mesoporos. Já em relação aos efeitos promovidos pelo sistema radicular da cana-de-açúcar em T18, verifica-se que os resultados apresentados na CCRAS apresentaram maior retenção de água nos seus poros;
- IV. Os valores obtidos para o Índice S possuíram resultados superiores ao sugerido por Dexter (2004) de $S = 0,035$, mesmo o solo sendo classificado como coeso. Além, disso, nota-se uma diminuição do S na sequência fornecida diante dos manejos empregados ao longo dos $T6 > T12 > T18$;
- V. Em relação às análises geoestatísticas, a maioria dos atributos possuiu grau de dependência espacial variando na faixa de moderada a forte, sendo os maiores valores de alcance obtidos nas frações granulométricas do solo e, além disso, na RP e na U_{RP} . Com relação ao efeito pepita puro este fato pôde ser observado apenas nas variáveis DS e U_{RP} . Sugerindo-se que sejam promovidos maiores coletas ao longo do espaço amostral para assim, explicar as variações promovidas pelos atributos.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O monitoramento da qualidade física do solo por meio de técnicas fornecidas pela agricultura de precisão, como a Geoestatística, atua de forma pontual e precisa para auxiliar no melhoramento do manejo dos solos. Esta ferramenta torna-se de extrema relevância para os meios de produção agrícola, pois podem atuar diretamente no ganho produtivo de áreas. Com isso, os mapas de superfície interpolada fornecidos por através das técnicas da Geoestatística irão auxiliar visualmente a identificação e quantificação dos atributos físicos do solo que estão sendo alterados ao longo da área e do tempo.

Desta forma, a aplicação do trabalho ao longo de um ano pôde fornecer resultados consideráveis para posteriores tomadas de decisão no emprego do manejo convencional na EECAC. Neste sentido, diante dos resultados obtidos em relação aos manejos empregados recomenda-se que, apenas seja realizada a prática de subsolagem e, logo em seja feito a sulcagem e plantio da cultivar.

Porém, para resultados mais satisfatórios sobre as reais alterações exercidas por cada prática de manejo convencional adotada na EECAC recomenda-se, também, a adoção de parcelas experimentais em que cada prática seja aplicada individualmente e, com isso, verificar-se-á a influência de cada maquinário nos solos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, B. G. **Métodos alternativos de determinação de parâmetros físicos do solo e uso de condicionadores químicos no estudo da qualidade do solo**. Escola Superior de Agricultura de Luiz de Queiroz. Piracicaba, São Paulo, Brasil. Tese. 2008.
- ANDRADE, M. C. Espaço e tempo na agroindústria canavieira de Pernambuco. **Estudos Avançados**, São Paulo, v.15, p. 267-280, 2001.
- ANDRADE, M.C. de. A questão do território no Brasil. **Editora Hucitec**, São Paulo. 2^a edição. 2004.
- ANDRADE, M. C. de. A Terra e o Homem no Nordeste. São Paulo: **Cortez Editora**, São Paulo, 7^a edição, 2005.
- ANDRADE, R. da S.; STONE, L. F. Índice S como indicador da qualidade física de solos do cerrado brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.13, n.4, p.382–388, 2009.
- ARAÚJO, D. C. dos S.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; MONTENEGRO, A. A. de A.; SILVA JUNIOR, V. de P. E.; SANTOS, S. M. dos. Spatial variability of soil attributes in an experimental basin in the semi-arid region of Pernambuco, Brazil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 22, n. 1, p. 38-44. 2018.
- AUGSTBURGER, F.; BERGER, J.; CENSKOWSKY, U.; HEID, P.; MILZ, J.; STREIT, C. Organic Farming in the Tropics and Subtropics - Exemplary Description of 20 Crops (Sugarcane). **NATURLAND**, Alemanha, p. 20, 2000.
- AZOOZ, R. H., ARSHAD, M. A., FRANZLUEBBERS, A.J., Pore size distribution and hydraulic conductivity affected by tillage in northwestern Canada. **Soil Science Society of America**, Madison, v.60, n.1, p.1197–1201, 1996.
- BALL-COELHO, B.; SAMPAIO, E. U. S. B.; TIESSEN, H.; STWARTJ, W. B. Root dynamics in plant ratoon crops of sugar cane. **Plant and Soil**, Holanda, v.42, p.297-305, 1992.
- BARACAT, R. S.; MARQUES JÚNIOR, J.; MENEZES DE SOUZA, Z.; TADEU PEREIRA, G.; VIEIRA MARTINS FILHO, M. Variabilidade espacial de atributos do solo e de fatores de erosão em diferentes pedoformas. **Bragantia**, Campinas, vol. 68, n. 4, p. 1095-1103, 2009.
- BERTOLANI, F. C.; VIEIRA, S. R. Variabilidade espacial da taxa de infiltração de água e da espessura do horizonte a, em um argissolo vermelho-amarelo, sob diferentes usos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 4, p. 987-995, 2001.
- BEUTLER, A. N.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; FERREIRA, M. M.; CRUZ, J. C.; PEREIRA FILHO, I. A. Resistência à penetração e permeabilidade de Latossolos Vermelho Distrófico típico sob sistemas de manejo na Região dos Cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, p.167-177, 2001.

BORKOWSKI, A. K. Análise de curvas de retenção e de distribuição de poros de um latossolo vermelho distrófico submetido aos sistemas de plantio convencional e direto. 78p. Dissertação (Mestrado em Ciências), **Universidade Estadual de Ponta Grossa**, 2009.

BORTOLUZZI, E.C.; SILVA, V.R.; PETRY, C.; CECCHETTI, D. Porosidade e retenção de água em um Argissolo sob manejo convencional e direto submetido a compressões unidimensionais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n.4, p.1447-1457, 2008.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. Elementos da Natureza e Propriedades dos Solos. **Bookman**, Porto Alegre, 3ª Ed. 2012.

CAMBARDELLA, C.A.; MOOMAN, T.B.; NOVAK, J.M.; PARKIN, T.B.; KARLEM, D.L.; TURVO, R.F.; KONOPA, A.E. Field scale variability of soil properties in central Iowa soil. **Soil Science American Journal**, Madison, v. 47, p.1501-1511, 1994.

CARDUCCI, C. E.; OLIVEIRA, G. C. de; MAIA DE OLIVEIRA, L.; BARBOSA, S. M.; SILVA, E. A. Retenção de água do solo sob sistema conservacionista de manejo com diferentes doses de gesso. **Revista Ciência Agrária- Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, Pará, v. 58, n. 3, p. 284-291, 2015.

CARNEIRO, M.A. C.; SOUZA, E. D. de; REIS, E. F. dos; PEREIRA, H. S.; AZEVEDO, W. R. de. Atributos físicos, químicos e biológicos de solo de Cerrado sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 1, p. 147-157, 2009.

CARVALHO, C.M. de; AZEVEDO, H.M. de; DANTAS NETO, J.; MELO, E.P. de; SILVA, C.T.S. da; GOMES FILHO, R.R. Resposta dos parâmetros tecnológicos da terceira folha de cana-de-açúcar submetida a diferentes níveis de irrigação. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v.3, p.337-342, 2008.

CARVALHO, M. P.; TAKEDA E.Y.; FREDDI, O. S. Variabilidade espacial de atributos de um solo sob videira em Vitória Brasil (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 695-703, 2003.

CASSARO, F.A.M.; PIRES, L. F.; SANTOS, R. A.; GIMÉNEZ, D.; REICHARDT, K. Funil de haines modificado - curvas de retenção de solos próximos à saturação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa. v. 32, p.2555-2562, 2008.

CERQUEIRA SILVEIRA, D. de; MELO FILHO, J. F. de; SACRAMENTO, J. A. A. S. do; PINTO SILVEIRA, E. C. Relação umidade versus resistência à penetração para um Argissolo Amarelo Distrocoeso no recôncavo da Bahia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 3, p. 659-667, 2010.

CHAMEN, W.C.T.; MOXEY, A.P.; TOWERS, W.; BALANA, B.; HALLETT, P.D. Mitigating arable soil compaction: a review and analysis of available cost and benefit data. **Soil Tillage and Research**, Amsterdam, v.146, n.1, p.10-25, 2015.

CHERUBIN, M. R.; KARLEN, D. L.; FRANCO, A. L.C.; TORMENA, C. A.; CERRI, C. E.P.; DAVIES, C. A.; CERRIF, C. C. Soil physical quality response to sugarcane expansion in Brazil. **Geoderma**, Amsterdam, v. 267, n.1, p. 156-168, 2016.

CHINN, C.; PILLAI, U.P.P. Self-repair of compacted Vertisols from Central Queensland, Australia. **Geoderma**, Amsterdam, v.144, p.491- 504, 2008.

CINTRA, F.L.D.; LIBARDI, P.L. Caracterização física de uma classe de solo do ecossistema do tabuleiro costeiro. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 55, n. 3, p. 367-378, 1998.

CINTRA, F.L.D; LIBADI, P.L. Caracterização Física de uma classe de solo do ecossistema do Tabuleiro Costeiro. Piracicaba: **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.55. n.3, 1998.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO, CONAB. Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar. – v. 1 – Safra 2014/15, n. 3 - Terceiro Levantamento, Brasília, dez. 2014.

CONAB-COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar. v. 4 - Safra 2017/18, n. 2 - Segundo levantamento, Brasília, p. 1-73, agosto 2017. ISSN 2318-7921.

CORÁ, J. E.; ARAUJO, A. V.; PEREIRA, G. T.; BERALDO, J. M. G. Variabilidade espacial de atributos do solo para adoção do sistema de agricultura de precisão na cultura de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa. v. 28, núm. 6, p. 1013-1021, 2004.

CORRÊA, M. M., KER, J. C., BARRÓN, V., TORRENT, J.; CURI, N.; TORRES, T. C. Caracterização física, química, mineralógica e micromorfológica de horizontes coesos e fragipãs de solos vermelhos e amarelos do ambiente Tabuleiros Costeiros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa. v. 32, p. 297-313, 2008.

CORTEZ, J.W.; SILVA ALVES, A. D. da; MOURA, M. R. D. de; OLSZEWSKI, N.; JESUS NAGAHAMA, H. de. Atributos físicos do Argissolo Amarelo do Semiárido nordestino sob sistemas de preparo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa. v. 35, p. 1207-1216, 2011.

CORTEZ, J. W.; OLSZEWSKI, N.; PIMENTA, W. A.; PATROCÍNIO FILHO, A. P.; SOUZA, E. B. de; NAGAHAMA, H. de J. Avaliação da intensidade de tráfego de tratores em alguns atributos físicos de um argissolo amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa. v.3, p. 1000-1010, 2014.

COSTA, D. B.; ANDRADE, P. K. B. de; SILVA, S. A. M. da; NETO, D. E. S.; FREIRE, F, J.; OLIVEIRA, E. C. A. de. Adubação fosfatada em cana planta e soca em argissolos do nordeste de diferentes texturas. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 27, n. 4, p. 47 – 56, 2014.

CPRM - Serviço Geológico do Brasil Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea. Diagnóstico do município de Carpina, estado de Pernambuco / Organizado [por] João de Castro Mascarenhas, Breno Augusto Beltrão, Luiz Carlos de Souza Junior, Manoel Júlio da Trindade G. Galvão, Simeones Neri Pereira, Jorge Luiz Fortunato de Miranda. Recife: CPRM/PRODEEM, 2005. 11 p.

CUENCA, R. H. Irrigation system design: an engineering approach. **Englewood Cliffs**: P. H., 1989. 552p. Department of Agricultural Engineering, Oregon State University, Corvallis.

DANE, J.H.; HOPMANS, J.W. Water retention and storage. In: DANE, J.H ; TOPP, G.C. (Ed). *Methods of soil analysis: Part 4 – physical methods*. **American Society of America**, p.671-720. 2002.

DANTAS NETO, J.; FIGUEIREDO, J. L. C.; FARIAS, C. H. A.; AZEVEDO, H. M. de; AZEVEDO, C. A. V de. Resposta da cana-de-açúcar, primeira soca, a níveis de irrigação e adubação de cobertura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.10, n.2, p.283-288, 2006.

DEXTER, A. R. et al. A user-friendly water retention function that takes account of the textural and structural pore spaces in soil. **Geoderma**, Amsterdam, v. 143, p. 243–253, 2008.

DEXTER, A. R. Soil physical quality part I: theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, Amsterdam, v. 120, n. 1, p. 201-214, 2004a.

DEXTER, A. R. Soil physical quality. Part II. Friability, tillage, filth and hard-setting. **Geoderma**, Amsterdam, v.120, p.215-225, 2004b.

DEXTER, A. R. Soil physical quality. Part III. Unsaturated hydraulic conductivity and general conclusions about S-theory. **Geoderma**, Amsterdam, v.120, p.227-239, 2004c.

DEXTER, A. R.; RICHARD, G. Tillage of soils in relation to their bi-modal pore size distributions. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 103, n. 2, p. 113-118, 2009.

DEXTER, A.R.; KROESBERGEN, B. Methodology for determination of tensile strength of soil aggregates. **Journal of Agricultural Engineering Research-Elsevier**, San Diego, v. 31, p.139-147, 1985.

EMBRAPA. Manual de Métodos de Análises de solo. **Centro Nacional de Pesquisa de Solos**, Rio de Janeiro, 2. ed. 230 p. 2011.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Sistema brasileiro de classificação de solos. Rio de Janeiro. 3.ed. Brasília, 353p. 2013.

FARIAS, Carlos H. de A.; FERNANDES, Pedro D.; AZEVEDO, Hamilton M.; DANTAS NETO, José. Índices de crescimento da cana-de-açúcar irrigada e de sequeiro no Estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande:, v.12, n.4, p.356–362, 2008.

FERLINI, V.L.A. A civilização do açúcar (séculos XVI a XVIII). **Editora Brasiliense**, São Paulo, 11ª edição. 1994.

GALVÃO, A.S. **Rendimento de cana-de-açúcar e alguns atributos físicos de um Argissolo afetado pelo sistema de preparo do solo**. Maceió, Universidade Federal de Alagoas, 2002. 75p. (Dissertação de Mestrado).

GEE, G.W.; OR, D. Particle-size analysis. In: DANE, J.H.; TOPP, G.C., eds. *Methods of soil analysis. Physical methods*. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, Part 4. p. 255-293, 2002,

GIAROLA, N. F. B.; SILVA, A. P.; TORMENA, C.; SOUZA, L. S.; RIBEIRO, L. P. Similaridades entre o caráter coeso dos solos e o comportamento hardsetting: estudo de caso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa. v. 25, n. 1, pp. 239-247, 2001.

GIAROLA, N. F. B.; SILVA, A.P. da. Conceitos sobre solos coesos e hardsetting. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.59, p.613-620, 2002.

GIAROLA, N. F. B.; DE LIMA, H. V.; ESPÍNDOLA ROMERO, R.; BRINATTI, A. M.; PIRES DA SILVA, A.. Mineralogia e cristalografia da fração argila de horizontes coesos de solos nos tabuleiros costeiros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa. v. 33, núm. 1, p. 33-40, 2009.

GIRARDELLO, V. C.; AMADO, T. J. C.; SANTI, A. L.; CHERUBIN, M. R.; KUNZ, J.; TEIXEIRA, T. de G.. Resistência à penetração, eficiência de escarificadores mecânicos e produtividade da soja em Latossolo argiloso manejado sob plantio direto de longa duração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa. v. 38, núm. 4, p. 1234-1244, 2014.

GOLDEN SOFTWARE (2000): **SURFER**, version 8.0. conjunto de programas. 1CD-Rom e manuais.

GOMES, N. M.; FARIA, M. A. de; SILVA, A. M. da; MELLO, C. R. de; VIOLA, M. R. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo associados ao uso e ocupação da paisagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.11, n.4, p.427-435, 2007.

GREGO, C.R. Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo em uma parcela experimental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa. v. 29, p.169-177, 2005.

GUIMARÃES, W.D.; GRIPP JÚNIOR, J.; MARQUES, E.A.G.; SANTOS, N.T.; FERNANDES, R.B.A. Variabilidade espacial de atributos físicos de solos ocupados por pastagens. **Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v.47, n.2, p.247-255, 2016.

HILLEL, D. Introduction to Soil Physics. **Academic Press**, San Diego. 1982.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Caracterização do município de Carpina-PE**. Disponível em: <<http://www.cidades.ibge.gov.br/>>. Acessado em: Agosto de 2016.

KIBBLEWHITE, M. G., RITZ, K.; SWIFT, M. J. Soil health in agricultural systems. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, v.363, p.685-701. 2008.

KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. Condutividade hidráulica de um Latossolo Roxo, não saturado, sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 32, n. 6, p. 945-953, 2002a.

KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho, sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, v. 26, p. 857-867, 2002b.

KLEIN, V.A. **Propriedades físico-hídrico-mecânicas de um Latossolo Roxo, sob diferentes sistemas de uso e manejo**. 1998. 150 f. Tese (Doutorado) Escola Superior de Agricultura de Luiz de Queiroz, Piracicaba, 1998.

KLEIN, V.A.; CAMARA, R.K. Rendimento da soja e intervalo hídrico ótimo em Latossolo Vermelho sob plantio direto escarificado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, n.2, p.221-227, 2007.

KLUTE, V. A. Water retention: laboratory methods. In: KLUTE, A. (Ed.). *Methods of soil analysis*. 2nd ed. Madison: **Soil Science Society of America**, pt. 1, v. 1, p. 635-662. 1986.

LANDIM, P.M. B. Sobre Geoestatística e mapas. Instituto de Geociências da UNICAMP – **TERRÆ DIDÁTICA**, Campinas, v. 2, p.19-33, 2006.

LETEY, J. O. Relationship between soil physical properties and crop production. In *Advances in soil science*. **Springer**, New York, p. 277-294, 1985.

LIBARDI, P. L. Dinâmica da Água no Solo. **Editora da Universidade de São Paulo (EDUSP)**, São Paulo, 344p, 2005.

LIMA NETO, J. A.; RIBEIRO, M. R.; CORRÊA, M. M.; SOUZA JÚNIOR, V. S.; LIMA, J. F. W. F.; FERREIRA, R. F. A. L. Caracterização e gênese do caráter coeso em Latossolos amarelos e Argissolos dos Tabuleiros costeiros do estado de Alagoas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa. v. 33, p. 1001-1011, 2009.

LIMA NETO, J. de A.; RIBEIRO, M. R.; CORRÊA, M. M.; SOUZA-JÚNIOR, V. S. de; ARAÚJO FILHO, J. C. de; LIMA, J. F. W.F. Atributos químicos, mineralógicos e micromorfológicos de horizontes coesos de Latossolos e Argissolos dos Tabuleiros Costeiros do estado de Alagoas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa. v. 34, n. 2, p. 473-486. 2010.

LIMA, C. L. R. de; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; GUBIANI, P. I. Qualidade físico-hídrica e rendimento de soja (*Glycine max L.*) e feijão (*Phaseolus vulgaris L.*) de um Argissolo Vermelho distrófico sob diferentes sistemas de manejo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.36, n.4, 2006.

LIMA, H. V. de; SILVA, A. P. da; ROMERO, R. E.; JACOMINE, P. K. T.. Comportamento físico de um Argissolo Acinzentado coeso no estado do Ceará. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa. v. 29, p.33-40, 2004.

LIMA, H. V. de; SILVA, A. P. da; GIAROLA, N. F. B.; IMHOFF, S. Index of soil physical quality of hardsetting soils on the brazilian coast. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa. v. 38, n. 6, p. 1722-1730, 2014 .

LIMA, J.P.R.; SICSÚ, A.B. Revisitando o setor sucro-alcooleiro do Nordeste: o novo contexto e a reestruturação possível. Estudos info sucro. nº 4. **Grupo de estudos sucroalcooleiros**. NUCA – IE – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Outubro, 2001.

LIPIEC, J. K.; SLOWINSKA-JURKIEWICZ, A.; NOSALEWICZ, A. Soil porosity and water infiltration as influenced by tillage methods. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 89, p. 210-220. 2006.

LIPIEC, J.; HATANO, R. Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth. **Geoderma**, Amsterdam, v.116. p.107 – 136. 2003.

MAIA, J. L. T; RIBEIRO, M R. Propriedades de um Argissolo Amarelo fragipânico de Alagoas sob cultivo contínuo da cana-de-açúcar. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v.39, n.1, p.79-87, 2004.

MAURI, R.; COELHO, R. D.; FRAGA JUNIOR, E. F.; BARBOSA, F. da S.; LEAL, D. P. V. Water relations at the initial sugarcane growth phase under variable water deficit. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.37, n.2, p.268-276, 2017.

MAYBURYLEWIS, B.; RANINCHESKI, S.. Desafios aos direitos humanos no Brasil Contemporâneo. **CAPES/VERBENA**, Brasília, 2011.

MENTGES, M.I.; REICHERT, J. M.; ROSA, D. P. da, VIEIRA, D. A.; ROSA, V. T. da; REINERT, D. J. Propriedades físico- hídricas do solo e demanda energética de haste escarificadora em Argissolo compactado. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v.45, n.3, p.315-321, 2010.

MION, R. L.; SOUSA NASCIMENTO, E. M.; DE LIMA SALES, F. A.; FERREIRA DA SILVA, S.; LIMA DUARTE, J. M.; MARQUES DE SOUSA, B. Variabilidade espacial da porosidade total, umidade e resistência do solo à penetração de um Argissolo amarelo. **Semina: Ciências Agrárias**, vol. 33, n. 6, p. 2057-2066, 2012.

MOREAU, A.M.S dos S.; COSTA, L. M. da; KER, J. C.; GOMES, F. H. Gênese de horizonte coeso, fragipã e duripã em solos do Tabuleiro Costeiro do sul da Bahia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.30, p.1021-1030, 2006.

MOZAMBANI, A. E.; PINTO, A. de. S.; SEGATO, S. V.; MATTIUZ, F. M. História e morfologia da cana-de- açúcar. In: SEGATO, S.V. Atualização em produção de cana-de-açúcar. **Cadernos Planalsucar**, Piracicaba, p.11-18, 2006.

NETO, D. E. S.; OLIVEIRA, A. C. de; ROCHA, A. T. da; FREIRE, F. J.; FREIRE, M. B. G. dos S.; NASCIMENTO, C. W. A. do. Características agroindustriais da cana-de-açúcar em função da adubação fosfatada, em solos de Pernambuco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.16, n.4, p.347–354, 2012.

OHASHI, A. Y. P.; PIRES, R. C. de M.; RIBEIRO, R. V.; SILVA, A. L. B. de O. Root growth and distribution in sugarcane cultivars fertigated by a subsurface drip system. **Bragantia**, Campinas, v. 74, n. 2, p.131-138, 2015.

OLIVEIRA, E.C.A.; FREIRE, F.J.; OLIVEIRA, A.C.; SIMÕES NETO, D.E.; ROCHA, A.T.; CARVALHO, L.A. Produtividade, eficiência de uso da água e qualidade tecnológica de cana-de-açúcar submetida a diferentes regimes hídricos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.46, n.6, p.617-625, 2011.

OLIVEIRA, I.A.; MARQUES JÚNIOR J.; CAMPOS, M.C.C; AQUINO, R.E.; FREITAS, L.; SIQUEIRA, D.S.; CUNHA, J.M. Variabilidade Espacial e Densidade Amostral da Suscetibilidade Magnética e dos Atributos de Argissolos da Região de Manicoré, AM. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.39, n.3, p.668-681, 2015.

OLIVEIRA, L. B. de. Determinação da macro e microporosidade pela "mesa de tensão" em amostras de solo com estrutura indeformada. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v. 3, p.197-200. 1968.

PACHECO, E. P.; CANTALICE, J. R. Análise de trilha no estudo dos efeitos de atributos físicos e matéria orgânica sobre a compressibilidade e resistência à penetração de um Argissolo cultivado com cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa. v. 35, p. 417-428, 2011a.

PACHECO, E. P.; CANTALICE, J. R. Compressibilidade, resistência à penetração e intervalo hídrico ótimo de um Argissolo Amarelo cultivado com cana-de-açúcar nos Tabuleiros Costeiros de Alagoas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa. v.35, p. 403-415, 2011b.

PAGLIAI, M.; VIGNOZZI, N.; PELLEGRINI, S. Soil structure and the effect of management practices. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 79, n.2, p. 131-143, 2004.

PARAHYBA, R. da B. V. **Geoambientes, litotopossequência e características físico-hídricas de solos arenosos da Bacia do Tucano, Bahia**. Tese (Doutorado em Geografia), UFPE, Recife/PE, 2013. 269 p.

PEDROTTI, A.; CRESTANA, S.; FERREIRA, M. M.; DIAS JUNIOR, M. S.; GOMES, A. S.; TURATTI, A. L.. Resistência mecânica à penetração de um Planossolo submetido a diferentes sistemas de cultivo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa. v.25, p.521-529, 2001.

PEREIRA, L. dos S.; RODRIGUES, A. M.; JORGE, M. do C. O.; GUERRA, A. J. T.; FULLEN, M. A. Processos hidro-erosivos em solos degradados em relevo de baixa declividade. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, Brasília, v. 17, n. 2, 2016.

PIRES, L. F.; CÁSSARO, F. A.M.; REICHARDT, K.; BACCHI, O. O.S. Soil porous system changes quantified by analyzing soil water retention curve modifications. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 100, p. 72–77. 2008.

PREVEDELLO, C. L. Física do solo com problemas resolvidos. **Saeafs**, Curitiba, 1996. 446p.

PREVEDELLO, J., VOGELMANN, E. S., KAISER, D. R.; REINERT, D. J. A funcionalidade do sistema poroso do solo em floresta de eucalipto sob Argissolo. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, 2013.

RABBI, S. M. Fazle; R., Bina R.; MIAH, M. M.; AMIN, M. S.; KHANDAKAR, T. Spatial Variability of Physical Soil Quality Index of an Agricultural Field. **Applied and Environmental Soil Science**, Bangladesh, 2014.

REDE INTERUNIVERSITÁRIA PARA O DESENVOLVIMENTO DO SETOR SUCROALCOOLEIRO. Catálogo nacional de variedades “RB” de cana de açúcar. Organizada por Edelclaiton Daros Ricardo Augusto de Oliveira José Luis Camargo Zambon João Carlos Besspalhok Filho. Curitiba, 136 p., 2010.

REICHARDT, K. Dinâmica da matéria e da energia em ecossistemas. **ESALQ**, Piracicaba, 2ed., 505p.1996.

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

REYNOLDS, W. D.; ELRICK, D. E. Constant head well permeameter (vadose zone). In: J. h. DANE; G. C. TOPP, Eds, Methods of soil analysis, part 4, physical methods, p. 844-858. **Soil Science Society of America**, Madison, 2002.

REYNOLDS, W.D.; BOWMAN, B.T.; DRURY, C.F.; TANA, C.S.; LU, X. Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. **Geoderma**, Amsterdam, v.110, p.131-146, 2002.

RITCHIE, J.T. Soil water availability. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 58, p. 327-338, 1981.

RITZ, K.; YOUNG, J. M. Interactions between soil structure and fungi. *British Mycological Society: Mycologist*, v. 18, p. 52-59. 2004.

SAFFIT-HDADI, K.; DÉFOSSEZA, P.; RICHARD, G.; CUIC, Y.-J; TANG, A.-M; CHAPLAIND, V. A method to predict the soil susceptibility to compaction of surface layers as a function of water content and bulk density. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v.105, p.96-103, 2009..

SANTORO, E.; SOLER, E.M.; CHERRI, A.C. Route optimization in mechanized sugarcane harvesting. **Computers and Electronics in Agriculture, E.U.A.**, v. 141 , p.140–146, 2017.

SCHAEFER, C. E. G. R.; SOUZA, C. M.; VALLEJOS M., F. J.; VIANA, J. H. M.; GALVÃO, J. C. C.; RIBEIRO, L. M. Características da porosidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo submetido a diferentes sistemas de preparo de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, p.765-769, 2001.

SILVA, A. J. N.; CABEDA, M. S. V. Modificações na matriz de um Argissolo Amarelo Coeso sob diferentes sistemas de manejo com cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 03, p. 554-562, 2006.

SILVA, A. J. N.; CABEDA, M. S. V.; CARVALHO, F. G. Matéria orgânica e propriedades físicas de um Argissolo Amarelo Coeso sob sistemas de manejo com cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 03, p. 579-585, 2006.

SILVA, A. J. N.; CABEDA, M. S. V.; LIMA, J. F. W. F. Efeito de sistemas de uso e manejo nas propriedades físico-hídricas de um Argissolo Amarelo de Tabuleiro Costeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa. v.29, p. 833-842, 2005.

SILVA, A.P.; KAY, B.D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.58, n.6, p.1775-1781, 1994.

SILVA, E.J. da; SILVA, P.C.C.; AMORIM, F.F.; BRITO, R.B.F.; PAMPONET, B.M.; REZENDE, J.O. Atributos físicos e químicos de um Latossolo Amarelo distrófico coeso e crescimento radicular de *Brachiaria decumbens* submetido à subsolagem e fertilização. **Comunicata Scientiae**, Bom Jesus, v.6, n.4, p.385-395, 2015.

SILVA, S.R.; BARROS, N.F.; COSTA, L.M. Atributos físicos de dois latossolos afetados pela compactação do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10,p. 842-847, 2006.

SILVA, S.; DANTAS NETO, J.; TEODORO, I.; SOUZA, J. L. de; LYRA, G. B.; SANTOS, M. A. L. dos. Demanda hídrica da cana-de-açúcar irrigada por gotejamento nos Tabuleiros Costeiros de Alagoas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.19, n.9, p.849–856, 2015.

SIVARAJAN, S.; MAHARLOOEI, M.; BAJWA, S.G.; NOWATZKI, J. Impact of soil compaction due to wheel traffic on corn and soybean growth, development and yield. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 175. p.234–243. 2018.

SMITH L. H. Plot arrangement for variety experiment with corn. **American Society of Agronomy**, Madison, v. I. p.84-89. 1910.

SOIL SURVEY STAFF. Soil survey manual. **USDASCS**. U.S. Gov. Print. Office, Washington, 437p. , 2017.

SORACCO, C. G.; LOZANO, L. A.; BALBUENA, R.; RESSIA, J. M.; FILGUEIRA, R. R. Contribution of macroporosity to water flux of a soil under different tillage systems. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa. v.36, n. 4, p.1149-1156, 2012.

SOUZA, Gustavo Soares de; SOUZA, Zigomar Menezes de; SILVA, Reginaldo Barboza da; ARAÚJO, Fernando Silva; BARBOSA, Ronny Sobreira. Compressibilidade do solo e sistema radicular da cana-de-açúcar em manejo com e sem controle de tráfego. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v.47, n.4, p.603-612, abr. 2012.

SOUZA, G. S.de; SOUZA, Z. M. de; SILVA, R. B. da; ARAÚJO, F. S.; BARBOSA, R. S. Effects of traffic control on the soil physical quality and the cultivation of sugarcane. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa. v. 38, n.1,2014.

SOUZA, J. M.; BONOMO, R.; PIRES, F. R.; BONOMO, D. Z. Curva de retenção de água e condutividade hidráulica do solo em lavoura de café conilon submetida à subsolagem. **Coffee Science**, Lavras, v. 9, n. 2, p. 226-236, 2014.

SOUZA, Z. M. de; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo em diferentes formas do relevo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa. v.28, p.937-944, 2004.

SOUZA, Z. M. de; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T. Spatial variability of the physical and mineralogical properties of the soil from the areas with variation in landscape shapes. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, Brazil, v. 52, n.2, p.305-316. 2009.

STRECK, C. A.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; KAISER, D. R. Modificações em propriedades físicas com a compactação do solo causada pelo tráfego induzido de um trator em plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.34, n.3, p.755-760, 2004.

SURFER. **Surfer 7.0**. Contouring and 3D surface mapping for scientist's engineers. Version 7.0. User's Guide. New York: Golden Software, 1999. 619p.

TAVARES, U. E.; ROLIM, M. M.; PEDROSA, E. M. R.; MONTENEGRO, A. A. A.; MAGALHÃES, A. G.; BARRETO, M. T. L. Variabilidade espacial de atributos físicos e mecânicos de um Argissolo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.16, n.11, p.1206-1214, 2012.

TAYLOR, H.M.; ROBERSON, G.M.; PARKER, J.J. Soilstrength-root penetration relations for medium-to-coarse-textured soil materials. **Soil Science**, Nova Yorque, v.102, p.18-22, 1966.

TOO, V. K.; OMUTO, C. T.; BIAMAH, E. K.; OBIERO, J. P. Review of Soil Water Retention Characteristic (SWRC) Models between Saturation and Oven Dryness. **Open Journal of Modern Hydrology**, E.U.A., v.4, p.173-182, 2014.

TOPP, G.C.; REYNOLDS, W.D.; COOK, FJ.; KIRBY, J.M.; CARTER, M.R. Chapter 2 Physical attributes of soil quality. **Developments in Soil Science**, E.U.A., v. 25, p. 21-58,1997.

TORMENA, C. A.; ARAÚJO, M. A.; FIDALSKI, J.; IMHOFF, S.; SILVA, A. P. da. Quantificação da resistência tênsil e da friabilidade de um latossolo vermelho distroférico sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa. v.32, p.943-952, 2008.

TORMENA, C. A., SILVA, A. P., GONÇALVES, A. C. A., FOLEGATTI, M. V. Intervalo ótimo de potencial da água no solo: um conceito para avaliação da qualidade física do solo e manejo da água na agricultura irrigada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.3, n.3, p.286-292, 1999.

TORMENA, C. A.; BARBOSA, M. C.; COSTA, A. C. S.; GONÇALVES, A. C. A. Densidade, porosidade e resistência à penetração em Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo do solo. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.59, p.795-801, 2002.

TULLER, M.; OR, D. Water retention and characteristic curve. Encyclopedia of Soils in the Environment, Publisher: **Elsevier Ltd.**, Oxford, U.K., p.278-289. 2004.

VAN GENUCHTEN, M. T. H. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 44, p. 892-898, 1980.

VAN GENUCHTEN, M. T. H.; LEIJ, F. J.; YATES, S. R. The RETC code for quantifying the hydraulic function of unsaturated soils. **US Salinity Laboratory and USDA Agricultural Research Service**, U.S.A, 1991, 85 p.

VASCONCELOS, R. F. B. de; CANTALICE, J. R. B.; OLIVEIRA, V. S. de; COSTA, Y. D. J. da; CAVALCANTE, D. M. Estabilidade de agregados de um Latossolo Amarelo Distrocoeso de tabuleiro costeiro sob diferentes aportes de resíduos orgânicos da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa. v.34, p.309-316, 2010.

VEIHMEYER F. J.; HENDRICKSON, A. H. Soil density and root penetration. **Soil Science**, Nova Iorque, v .65, n. 6 , p. 487-494, 1948.

VIEIRA, M. L.; KLEIN, V. A. Propriedades físico-hídricas de um Latossolo Vermelho submetido a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa. v. 31, n. 6, p. 1271-1280, 2007.

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

VIEIRA, S.R.; MILLETE, J.; TOPP, G.C.; REYNOLDS, W.D. Handbook for geostatistical analysis of variability in soil and climate data. In: ALVAREZ V., V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R.; BARROS, N.F.; MELLO, J.W.V.; COSTA, L.M., eds. Tópicos em ciência do solo. Viçosa, **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa. v.2, p.1-45, 2002.

VISCHI FILHO, O. J.; DE SOUZA, Z. M.; DE SOUZA, G. S.; DA SILVA, R. B.; TORRES, J. L. R.; DE LIMA, M. E.; TAVARES, R. L. M. Physical attributes and limiting water range as soil quality indicators after mechanical harvesting of sugarcane. **Australian Journal of Crop Science**, Australia, v. 11, n. 02, p. :169-176; 2017.

WARRICK, A.W.; NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D., ed. Applications of soil physics. **Academic Press**, New York, 1980. 350p.

WATTS, C.W.; DEXTER, A.R. Soil friability: Theory, measurement and the effects of management and organic carbon content. **Eur. J. Soil Science**, Europa, v. 49, p.73-84, 1998.

WILDING, L.P.; DREES, L.R. Spatial variability and pedology. In: Wilding, L.P.; Smeck, N.E.; HALL, G.F., eds. Pedogenesis and soil taxonomy I. Concepts and Interactions. **Elsevier**, Amsterdam, p.83-116, 1983.

YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. Geoestatística: Conceitos e Aplicações. **Oficina de Textos**, São Paulo, 2013.

ZORNOZA, R.; ACOSTA, J. A.; BASTIDA, F.; DOMÍNGUEZ, S. G.; TOLEDO, D. M.; FAZ, A. Identification of sensitive indicators to assess the interrelationship between soil quality, management practices and human health. **SOIL**, Europa, v.1, n.173–185, 2015.