

ROBERTA QUEIROZ CAVALCANTI

**ATRIBUTOS FÍSICOS E MECÂNICOS DO SOLO SOB
CULTIVO CONTÍNUO DE CANA-DE-AÇÚCAR EM
TABULEIRO COSTEIRO**

Recife – PE

2018

ROBERTA QUEIROZ CAVALCANTI

**ATRIBUTOS FÍSICOS E MECÂNICOS DO SOLO SOB
CULTIVO CONTÍNUO DE CANA-DE-AÇÚCAR EM
TABULEIRO COSTEIRO**

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Agrícola
da Universidade Federal Rural de
Pernambuco como parte dos requisitos
para obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Agrícola

Orientador:

Prof. Dr. Mário Monteiro Rolim

Recife – PE

2018

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

L732p Roberta Queiroz Cavalcanti
Atributos físicos e mecânicos do solo sob cultivo contínuo de cana-de-açúcar em
tabuleiro costeiro / Roberta Queiroz Cavalcanti. – 2018.
59 f. : il.

Orientador: Mário Monteiro Rolim.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal Rural de
Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Recife, BR-PE,
2018.

Inclui referências.

1. Cisalhamento 2. Solos – Compactação 3. Estrutura do solo 4. Cana-de-açúcar
I. Rolim, Mário Monteiro, orient. II. Título

CDD 631

ROBERTA QUEIROZ CAVALCANTI

**ATRIBUTOS FÍSICOS E MECÂNICOS DO SOLO SOB CULTIVO CONTÍNUO
DE CANA-DE-AÇÚCAR EM TABULEIRO COSTEIRO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal Rural de Pernambuco como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola.

Dissertação defendida e aprovada em 26 de julho de 2018

BANCA EXAMINADORA

Orientador: _____

Prof. Dr. Mário Monteiro Rolim
Departamento de Engenharia Agrícola/UFRPE

Examinadores:

Prof^a. Dr^a. Elvira Maria Regis Pedrosa
Departamento de Engenharia Agrícola/UFRPE

Dr. Renato Paiva de Lima
Departamento de Engenharia Agrícola/UFRPE

Prof. Dr. Igor Fernandes Gomes
Centro de Tecnologia e Geociência/UFPE

DEDICO

Aos meus pais e minha irmã, por todo esforço e dedicação. Ao meu marido, por todo apoio e companheirismo. Aos meus avós Geraldo, Roque e Helena, que mesmo não estando comigo, serviram de grande exemplo e inspiração. À minha avó Zita, por todo amor e apoio. E a todos os meus familiares que, direta ou indiretamente, participaram da minha jornada em busca do conhecimento.

AGRADECIMENTOS

A Deus, a quem confio toda a minha jornada.

À minha família, em especial aos meus pais Roberto e Neide, à minha irmã Helena, ao meu marido Mattheus, aos meus avôs Helena (in memória), Roque (in memória), Geraldo (in memória) e Zita, às minhas tias, Raquel, Rita e Nádia, aos meus sogros Kátia e Cafu, aos meus primos, tios e amigos que sempre estiveram comigo.

À UFRPE e ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola pela oportunidade de cursar o mestrado.

Ao orientador Prof. Dr. Mário Monteiro Rolim, pela orientação e amizade durante todo o curso e aos Pós-Doutorandos, Renato Paiva de Lima e Uilka Elisa Tavares, que auxiliaram na condução do experimento e orientação.

Ao Prof. Dr. Igor e ao Dr. Djalma, pelas sugestões na apresentação do pré-projeto.

A todos os professores do Departamento de Engenharia Agrícola, da UFRPE.

À Capes, pela concessão da bolsa durante todo o período de realização do mestrado.

À EECAC (Estação Experimental de Cana-de-açúcar do Carpina), por permitir a realização do experimento dentro de suas instalações e aos funcionários, Evanilson, Cosmo e José, por auxiliarem da melhor forma possível nas coletas de solo.

Aos colegas e amigos do Laboratório de Mecânica dos solos e Aproveitamento de Resíduos da UFRPE: Keila, Francisco, Jéssica e Wanderson, por toda ajuda durante a realização do experimento e nas análises.

Às estagiárias Bianca e Camila, por toda dedicação, compromisso, eficiência e companheirismo.

Aos meus amigos da Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Fernanda, Dayane, Sirleide, Frederico, Fred, Valentim, Leandro, Anízio e Adiel, pela amizade e parceria durante as disciplinas.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização desta dissertação.

Muito obrigada!

SUMÁRIO

Resumo	8
Abstract	9
CAPÍTULO I – Introdução Geral	10
Introdução	11
Revisão de Literatura	12
<i>A cultura da cana-de-açúcar</i>	<i>12</i>
<i>Umidade do solo</i>	<i>13</i>
<i>Densidade do solo</i>	<i>14</i>
<i>Estabilidade de agregados</i>	<i>15</i>
<i>Compactação e sua influência no desenvolvimento das plantas</i>	<i>16</i>
<i>Tensão de pré-consolidação e índice de compressão</i>	<i>17</i>
<i>Resistência ao cisalhamento do solo</i>	<i>18</i>
<i>Carbono Orgânico</i>	<i>19</i>
Referências Bibliográficas	21
CAPÍTULO II – Atributos físicos e mecânicos do solo em função do tempo de cultivo da cana-de-açúcar.....	27
Resumo	28
Abstract	29
Introdução	28
Material e Métodos	31
Resultados e Discussões	34
Conclusões	40
Referências Bibliográficas	40
CAPÍTULO III - Estabilidade de agregados e carbono orgânico do solo em função do tempo no cultivo de cana-de-açúcar	45
Resumo	46
Abstract	46
Introdução	47
Material e Métodos	48
Resultados e Discussões	50
Conclusões	57
Referências Bibliográficas	57

RESUMO

O aumento da demanda da cultura da cana-de-açúcar, tanto para produção de açúcar como para etanol, faz com que a mecanização gere um número maior de operações no solo, somando-se a isso, a cultura é usualmente manejada em áreas com vários ciclos de produção, resultando em alta compactação do solo. Esse aspecto pode ser avaliado e monitorado através do conhecimento de atributos do solo como a resistência ao cisalhamento, tensão de pré-consolidação (σ_p), grau de compactação e entre outras formas de análise. Dessa forma, o objetivo deste estudo foi avaliar os atributos físicos e mecânicos do solo em função de diferentes épocas de cultivo da cana-de-açúcar. O estudo consistiu em coletas de solo para análises físicas, mecânicas e de carbono orgânico do solo em cinco diferentes áreas, sendo: a primeira em pousio (T0); a segunda, com um ano após a colheita (T1); a terceira, após duas colheitas (T2); a quarta, após três colheitas (T3); e, finalmente a quinta, após quatro colheitas (T4); nas profundidades de 0,00-0,20 m e 0,20-0,40 m, totalizando 40 amostras para cada um dos atributos do solo avaliados. Diante dos resultados, foi possível observar que as variáveis que se mostraram sensíveis ao tempo de colheita foram $D_{S_{m\acute{a}x}}$, CO, w_c , GC, σ_p , as mesmas componentes interferiram nas semelhanças e diferenças entre as áreas. O acúmulo de CO na camada de 0,00-0,20 m foi gradual ao longo do tempo de cultivo. As diferenças entre as áreas de estudo refletem-se na camada de 0,00-0,20 m, pois houve uma sequência em que as áreas com maior número de colheitas possuíram maior GC e densidade seca do solo, ou seja, possivelmente estas áreas estavam compactadas em relação às áreas com menor número de colheitas. Sobre os agregados do solo, foi possível observar que, apesar de aumentar ao longo do tempo de cultivo, o CO não influenciou na formação dos agregados, mas, a evolução do conteúdo de carbono orgânico em ambas as camadas, contribuiu para distribuição dos agregados de tamanho de 0,5-1 mm.

Palavras-Chave: agregados, cisalhamento, compactação, *Saccharum*.

ABSTRACT

The increase in the demand for sugarcane crops, both for sugar production and for ethanol, make that agricultural mechanization generates a greater number of operations in the soil, and in addition, the crop is usually managed in areas with several cycles of production, resulting in greater soil compaction. This aspect can be evaluated and monitored through knowledge of soil attributes such as shear strength, pre-consolidation stress (σ_p), degree of compaction and among other forms of analysis. Thus, the objective of this study was to evaluate the physical and mechanical attributes of the soil as a function of different sugarcane cultivation periods. The study consisted of soil samples for physical, mechanical and soil organic carbon analyzes in five different areas, being: fallow land (T0), one year after harvest (T1), two harvests (T2), three harvests (T3) and finally four harvests (T4); and at depths of 0,00-0,20 m and 0,20-0,40 m, totaling 40 samples for each of the evaluated soil attributes. Considering the results, it was possible to observe that the variables that were sensitive to the successive harvests were $BD_{m\acute{a}x}$, OC, w_c , DC, σ_p , witch these same components interfered in the similarities and differences between the areas. The accumulation of OC in the 0,00-0,20 m layer was gradual over the successive harvests. The differences between the study areas are reflected in the 0,00-0,20 m layer, as there was a sequence in which the areas with the highest number of harvests had higher DC and dry bulk density, which is likely that these areas were compacted in relation to the areas with the lowest number of harvests. On the soil aggregates, it was possible to observe that, although increasing during the growing time, the OC did not influence the formation of the aggregates, but the evolution of the organic carbon content in both layers contributed to the distribution of aggregates of size 0,5-1 mm.

Keyword: aggregates, shear, compaction, *Saccharum*.

- CAPÍTULO I -
Introdução Geral

INTRODUÇÃO

Um dos mais importantes produtos agrícolas do Brasil é a cana-de-açúcar. O setor canavieiro vem crescendo cada vez mais devido ao aumento da demanda por álcool no Brasil, sendo o Nordeste uma das regiões que possui características edafoclimáticas favoráveis ao cultivo da cana-de-açúcar, principalmente, onde se encontram extensas áreas de tabuleiros que são propícias à produção.

Sendo os tabuleiros costeiros formações geológicas onde se constituem de planícies litorâneas, com predominância de Latossolos Amarelos e Argissolos Amarelos Distróficos, e têm, como característica principal, a presença de horizontes coesos, que dificultam o desenvolvimento das raízes das plantas, bem como o movimento de água no solo.

Devido à necessidade de aumento da produção, a mecanização e as atividades de preparo do solo são cada vez mais frequentes. No entanto, a contínua mobilização do solo, bem como o tráfego de veículos cada vez mais pesados em condições adversas de umidade, resultam em maior possibilidade de ocorrência de compactação ao longo do tempo de cultivo, fazendo com que as plantas possam ter seu desenvolvimento limitado.

Para evitar as consequências da compactação sobre o crescimento das plantas, é necessário conhecer o comportamento físico-mecânico do solo, para que, então, estratégias de manejo do tráfego possam ser adotadas. Para tanto, a capacidade de suporte de carga do solo, bem como a influência dos atributos físicos e mecânicos sobre o comportamento mecânico do solo, são ferramentas que podem auxiliar no entendimento do processo de compactação. Tendo o conhecimento de tais critérios, o planejamento das operações pode agir como fator para mitigar os impactos causados pelas sucessivas operações.

O comportamento físico-mecânico do solo pode ser entendido por meio de indicadores. O grau de compactação, a tensão de pré-consolidação, o índice de compressão e a resistência ao cisalhamento do solo são atributos que devem ser avaliados para a compreensão dos processos de compactação e cisalhamento do solo, os quais exercem influência sobre a estrutura, qualidade do preparo do solo e o crescimento das raízes das plantas.

As mudanças nos indicadores físicos-mecânicos do solo são afetadas por sucessivas ações ocorridas durante todo o ciclo da cana-de-açúcar. O preparo convencional do solo, a ausência de mobilização a longo prazo, o tráfego contínuo, as operações para tratos

culturais e colheita, podem ser alguns dos fatores que contribuem para degradação do solo ao longo dos ciclos.

O objetivo deste trabalho foi avaliar os atributos físicos e mecânicos do solo em função de diferentes épocas de cultivo da cana-de-açúcar.

REVISÃO DE LITERATURA

A cultura da cana-de-açúcar

O Brasil continua sendo o maior produtor de cana-de-açúcar devido as grandes áreas cultivadas e as características edafoclimáticas. A produção de cana-de-açúcar, estimada na safra 2017/2018, é de 647,6 milhões de toneladas, tendo uma queda aproximada de 1,5% em relação à safra anterior com área plantada em torno de 8,84 milhões de hectares (CONAB, 2017). Junto a isso, o preço do petróleo, a poluição do ar, a exaustão previsível das fontes não renováveis, têm moldado as estratégias do sistema de produção em busca de fontes de energia renováveis e menos poluentes. Assim, o crescente aumento pela procura dos biocombustíveis resulta em aumento gradual do cultivo agrícola (LOURENZANI; CALDAS, 2014).

No Nordeste, a produção de cana-de-açúcar vem se desenvolvendo ao longo dos anos devido às características da região, pois a cultura necessita de um período quente e úmido, com intensa radiação solar durante o estágio vegetativo, seguido de um período seco, na fase de maturação e colheita, pois, a qualidade e a intensidade luminosa, exercem influência no crescimento vegetativo e na maturação, estabelecendo uma relação direta com a fotossíntese, translocação e acúmulo de carboidratos das folhas para o colmo (SILVA et al., 2014).

Além disso, o relevo, a geologia e a geomorfologia interferem nas características pedológicas, estabelecendo uma implicação direta sobre o manejo da cultura. As frações granulométricas, bem como a coesão e estabilidade do solo, interferem na resistência da camada superficial ao rompimento dos brotos primários. Somado a isso, a região de crescimento das raízes é constituída de um tecido muito sensível às barreiras físicas. Deste modo, é muito importante que haja um bom preparo de solo, para que as camadas sejam descompactadas e, assim, favorecer o desenvolvimento radicular e conseqüentemente o crescimento das plantas (SILVA, 2016).

Embora a colheita de cana-de-açúcar em algumas regiões ainda continua sendo através da queima, esta prática está em declínio global, pois a colheita da cana verde traz

uma série de benefícios agronômicos, tais como: aumento do rendimento da cana, uma vez que as folhas verdes são utilizadas como cobertura do solo reduzindo a evaporação; e oportunidades de reduzir as pressões e preocupações ambientais sobre a qualidade do solo e do ar relacionadas com a queima (PRYOR et al., 2017).

Em relação aos períodos de colheita da cana-de-açúcar, o primeiro corte é realizado em torno de 12 ou 18 meses, e, após essa primeira colheita, ocorre o rebrote, e nos mesmos períodos de tempo, ocorrem os demais cortes, fazendo com que a cana sofra de 4 a 5 colheitas para então a lavoura ser renovada (VITTI et al., 2007). Somando-se a isso, o incremento da colheita mecanizada aumenta o risco de compactação do solo e da degradação de sua estrutura pelo tráfego de colhedoras e transbordos, principalmente, em condições adversas de umidade (SÁ et al., 2016). Segundo Chamen et al. (2015), as ações de subsolagem e escarificação nem sempre são eficientes na descompactação do solo, pois normalmente têm efeito temporário, o que demanda repetições frequentes e custos elevados. Além disso, estas práticas sucessivas favorecem a mineralização da matéria orgânica.

Devido a esses fatores, busca-se cada vez mais mudanças nas perspectivas de produção e de pesquisas relacionadas às formas de manejo e tecnologias nos sistemas produtivos. Segundo Ortiz et al. (2017), a irrigação, adubação, o uso de maquinários agrícolas e a sistematização dos processos agrícolas são algumas tecnologias adotadas para tornar mais eficientes os processos agrícolas da cana-de-açúcar.

Umidade do solo

Para estudar as características físicas e mecânicas do solo é necessário se ter conhecimento da umidade do solo. Além disso, a água é extremamente importante na produção vegetal, onde o seu manejo é decisivo para o desenvolvimento das plantas. Desta maneira, o estudo da dinâmica da distribuição de água no solo torna-se cada vez mais indispensável, uma vez que está intimamente ligado às propriedades do sistema solo-água-planta (SOUZA et al., 2006).

A umidade do solo tem forte relação com o nível de tensão de pré-consolidação (σ_p). Quando esta se apresenta no estado saturado, os níveis de σ_p são menores, diminuindo também a capacidade suporte do solo (VISCHI FILHO et al., 2015). Esse fato também interfere na resistência do solo à penetração das raízes das plantas, que é influenciada fortemente pelos níveis de umidade do solo (CAMPOS et al., 2013). Souza et

al. (2014) encontraram menores valores de resistência à penetração quando os níveis de umidade eram elevados.

A água retida no solo serve como lubrificante para os agregados, desse modo, os mesmos podem se rearranjar de acordo com a carga aplicada. Nas curvas de compactação, percebe-se que a densidade do solo aumenta com a adição de água até que se atinja a umidade crítica do solo, onde ocorre a máxima compactação. Após esse período, o fator da compactação é reduzido na medida que o solo tende a ficar saturado, pois a água é incompressível. Vale ressaltar que este processo irá depender da textura do solo (TAVARES, 2016).

Densidade seca do solo

As alterações provocadas pelo uso do solo com fins agrícolas provocam mudança na distribuição de poros, nas propriedades mecânicas e em processos de transporte de água e gases no solo, sendo esses processos direta e indiretamente relacionados com a densidade seca do solo e, por isso, a mesma é utilizada como indicador indireto de restrição crítica para o crescimento das plantas (GUBIANI et al., 2014).

Em solos não cultivados, a densidade seca do solo geralmente apresenta variações naturais decorrentes basicamente das diferenças na estrutura do solo, mais especificamente de macro e microporosidade, que por sua vez são função da textura, do teor de carbono orgânico e de sua mineralogia. Há também o efeito da profundidade sobre a densidade seca do solo, pois, nas camadas mais profundas, as partículas do solo apresentam-se mais agrupadas entre si, aumentando o seu valor. Além disso, esse efeito é intensificado pelo adensamento provocado pelas camadas subjacentes. O cultivo intensivo do solo causa alterações na sua porosidade, promovendo graus variáveis de compactação (PÁDUA et al., 2015).

A densidade seca do solo também é um fator muito importante na drenagem e recuperação de terras, programação de irrigação (estimativa do conteúdo volumétrico de água no solo), avaliação do estoque de carbono e nutrientes no solo e determinação do balanço de massa poluente no solo (SHIRI et al., 2017).

Em estudo, Brown et al. (2018) avaliando os efeitos de manejos diferentes após 20 anos de cultivo, mostrou que a densidade do solo e os outros atributos físicos foram influenciados por todos os manejos utilizados, e que no sistema convencional, a densidade do solo foi maior e também houve redução na produção. Assim, pode-se concluir que os

sistemas de manejo são responsáveis por alterar vários atributos do solo, principalmente, a densidade seca do solo e a produção agrícola.

Estabilidade de agregados

O estudo da estabilidade de agregados é de grande importância, uma vez que, esse atributo está relacionado à estrutura do solo, a qual contribui para a avaliação do comportamento agrícola, e exerce grande influência nos ciclos de carbono e de nutrientes, na capacidade de receber, estocar e transmitir água, e na penetração das raízes. Desta forma, é através da distribuição e estabilidade de agregados que se obtém os indicativos da qualidade do solo (PORTUGAL et al., 2010). Segundo Tisdall; Oades (1982), cada agregado é formado pela união dos mesmos da classe que vem logo abaixo, seguindo assim, uma ordenação hierárquica e sendo unida por diferentes agentes de agregação. Diante disso, existe uma classificação conforme o tamanho, sendo os agregados menores que 0,25 mm denominados micro-agregados e os maiores que 0,25 mm, macro-agregados.

Estudos apontam que a estabilidade de agregados têm fortes relações com as frações granulométricas, umidade, argila dispersa, porosidade e carbono orgânico (VICENTE et al., 2012; TAVARES et al., 2017). E, em relação à contribuição da vegetação na estabilidade de agregados, pode-se dizer que as partes aéreas das plantas servem como camada protetora contra a erosão e modificam a intensidade em que as gotículas de água advindas da chuva atingem o solo. Somando-se a isso, há o incremento da matéria orgânica proveniente da decomposição e as raízes também contribuem para a formação e estabilização dos agregados do solo (ERKTAN et al., 2016).

A alteração na estrutura do solo desestabiliza o arranjo das partículas e a distribuição de poros, comprometendo a disponibilidade de ar e água e o desenvolvimento radicular das plantas, além de aumentar a susceptibilidade do solo a compactação (CORRÊA et al., 2012).

Isso ocorre devido ao fato de que a estrutura do solo está relacionada com a infiltração e retenção de água no solo, pois, quando a infiltração diminui em função do manejo, o solo se torna mais susceptível à degradação. Isso acontece mais acentuadamente quando se adotam sistemas de manejo com intenso revolvimento de solo e com baixas taxas de adição de resíduos orgânicos. Diante disso, o uso e manejo contínuo ou inadequado alteram suas condições físicas e estruturais e tendem a ocasionar perda da

estrutura original pelo fracionamento dos agregados maiores em menores partículas (OLIVEIRA et al., 2010)

Compactação e sua influência no desenvolvimento das plantas

A compactação do solo é definida como sendo a redução do volume de solo pela aplicação de energia mecânica, acarretando um rearranjo das partículas do solo e consequente redução da porosidade. Dessa forma, do ponto de vista agrícola, a compactação é uma consequência indesejada da mecanização que reduz a produtividade biológica do solo e, em casos extremos, torna-o inadequado ao crescimento das plantas (REICHERT et al., 2016).

Os processos de transporte de fertilizantes, pesticidas químicos, mudas e plantas para a moagem geralmente movem grandes quantidades de cargas que contribuem para o processo de compactação. Em muitos casos, os danos são irreversíveis à estrutura do solo (SILVA et al., 2018). A compactação do solo é um processo mecânico susceptível à umidade, carbono orgânico, textura e limites de consistência. Além disso, para a caracterização deste problema, a densidade do solo serve como ponto inicial. Neste sentido, a compactação é um fator importante para as práticas de uso e manejo do solo, principalmente após o processo de colheita (LIMA et al., 2015).

Em pesquisa realizada por Cherubin et al. (2016), em áreas com cultivo de cana-de-açúcar, houve redução de 56% da produção em relação à capacidade total do solo. Isso ocorreu devido à diminuição da porosidade do solo e a degradação estrutural. Além disso, a compactação altera as propriedades físicas do solo, podendo causar redução no comprimento do sistema radicular e aumento do seu diâmetro, dificultando o desenvolvimento da raiz da planta, como também, diminuição na absorção de água e nutrientes e impedindo assim as trocas gasosas com o ambiente (LABEGALINI et al., 2016).

Girardello et al. (2017), avaliando a resistência do solo a penetração e o desenvolvimento radicular da soja sob sistema de plantio direto com tráfego controlado de máquinas agrícolas, verificou que os tratamentos onde não houve tráfego de máquinas foi o que apresentou melhor desenvolvimento das plantas e maior produtividade e que, os tratamentos onde houve tráfego, ocasionou redução no comprimento do sistema radicular da cultura.

Nunes et al. (2015) estudaram formas de mitigar a compactação, pois ele afirma que a compactação sempre foi um problema para a produtividade agrícola. Em suas análises, verificou que uma semeadora, a qual atinge maior profundidade, melhorou as condições físicas do solo, pois promoveu aumento da macro-porosidade e da porosidade total, diminuiu a compactação e o grau de compactação. Consequentemente, o sistema radicular das plantas desenvolveu-se melhor, bem como os colmos aumentaram o seu diâmetro, assim, concluiu que essa é uma das formas de mitigar a compactação do solo.

A compactação do solo reduz o volume dos macroporos, desse modo, o crescimento das raízes é afetado devido à diminuição da concentração de oxigênio, menor taxa de mineralização da matéria orgânica e desaceleração da absorção de nutrientes e de água para planta, por conseguinte, reduzindo a produção das plantas. Segundo Rossato et al. (2016), ao avaliarem os atributos físicos do solo em diferentes anos de cultivo, concluiu que a compactação reduz a macro-porosidade, a estabilidade de agregados e aumenta a densidade do solo através dos anos de cultivo, ou seja, a resistência do solo a penetração das raízes aumenta ao longo do tempo de cultivo.

O preparo de solo traz grandes vantagens para o cultivo de cana-de-açúcar, pois é onde ocorre o rompimento das camadas de solo compactadas, favorecendo o desenvolvimento inicial da cultura e criando boas condições ao crescimento das raízes, visando assim, o crescimento positivo das plantas. Os sistemas de preparo de solo conhecidos são o preparo convencional, cultivo mínimo e plantio direto. O primeiro deles é o mais comum no cultivo de cana-de-açúcar, sendo responsável pelo rompimento das camadas do solo, na camada arável (ROCHA et al., 2014).

O tráfego de máquinas durante as operações de preparo do solo sem a devida supervisão e avaliação causa efeito adverso sobre as propriedades do solo, tais como, redução da porosidade total e aumento da densidade aparente, consequentemente resultando na compactação do solo (REICHERT et al., 2016). Mas também as técnicas de preparo do solo são importantes para tentar mitigar a compactação, pois proporcionam diminuição da lixiviação entre outros benéficos, tornando o meio favorável ao desenvolvimento da agricultura e diminuindo os efeitos da degradação do meio ambiente (NUNES et al., 2015).

Tensão de pré-consolidação e índice de compressão

A partir de testes de compressão edométrica, é possível obter a compressibilidade do solo, a tensão de pré-consolidação (σ_p) e o índice de compressão. A tensão de pré-consolidação é de suma importância para o conhecimento da capacidade suporte do solo, pois, quando uma carga é aplicada no solo, ocorre o processo de redução dos espaços porosos, especialmente os macroporos, e o índice de compressibilidade indica a suscetibilidade que o solo tem em reduzir o seu volume. Dessa forma, é possível avaliar a compactação do solo utilizando esses parâmetros (OLIVEIRA FILHO et al., 2015). Segundo Nascimento et al. (2017), em sistemas de manejo convencional, há mais suscetibilidade a tensões aplicadas no solo, conseqüentemente, o índice de compressibilidade é maior nesse manejo.

A σ_p é também conhecida por determinar a maior tensão que o solo já sofreu no passado. Esta variável é representada no sistema de curvas de compressão, onde a primeira parte da reta representa o estado elástico e recuperável do solo, mostrando os níveis de tensão sofridos pelo solo no passado, enquanto que a segunda parte, mostra a reta de compressão virgem, que resulta nas primeiras pressões aplicadas ao solo que poderá resultar em compactação adicional (PACHECO; CANTALICE, 2011).

As características da textura do solo também influenciam na σ_p e, conseqüentemente, na capacidade suporte, pois, segundo Braga et al. (2015), solos com maior teor de argila apresentam maior capacidade suporte, devido a maior força de coesão entre as partículas de argila, dificultando a separação e o deslocamento dessas quando uma tensão é aplicada.

Segundo An et al. (2015), o índice de compressão e a σ_p são dependentes da estrutura e da umidade do solo e ao avaliarem três tipos de solos diferentes, concluíram que a umidade e a densidade do solo podem influenciar essas duas variáveis em qualquer tipo de solo, resultados similares foram encontrados por Lima et al. (2015).

Resistência ao cisalhamento do solo

A resistência do solo ao cisalhamento é definida como a tensão máxima que o solo suporta sem sofrer ruptura, sendo o ensaio de cisalhamento direto proposto por Lambe (1951) uma das formas mais comuns de se determinar esse parâmetro, pois consiste no deslizamento da metade superior do corpo de prova em relação a inferior, determinando

para cada tensão normal (σ_n), aplicada à superfície de deslizamento, o valor da força cisalhante necessária para provocar a ruptura do corpo de prova. Este atributo envolve duas componentes: coesão e ângulo de atrito.

A coesão é a força de atração entre as superfícies de suas partículas, sendo resultado de agentes cimentantes, como o carbonato de cálcio, sílica, óxidos de ferro e de alumínio. Já o ângulo de atrito interno, representa as características friccionais entre as partículas de solo, sendo definido como ângulo máximo que a força transmitida ao solo pode fazer com a tensão normal à superfície de contato, dependendo de fatores como o grau de compactação, teor de argila, tamanho e forma dos grãos de areia (SILVA; CARVALHO, 2007).

Existem vários critérios para determinação dos limites da resistência ao cisalhamento. Sendo o modelo de *Mohr-Coulomb*, o mais adequado pelo fato de envolver poucos parâmetros, que são de fácil obtenção em ensaios laboratoriais, onde se tem como resultado a tensão de cisalhamento a partir da equação $\tau = c + \sigma_n \tan \phi$, que envolve a coesão (c) e o ângulo de atrito interno (ϕ). Porém, vale ressaltar que, na realidade, a resistência ao cisalhamento pode estar em função de outros fatores, tais como a umidade e o efeito térmico (MOLINA JÚNIOR, 2017).

A resistência do solo ao cisalhamento é um aspecto que deve ser levado em conta quando se quer avaliar o tráfego dos maquinários, sendo esse parâmetro altamente dependente do teor de água do solo e sua estrutura. Em estudo avaliando os diferentes tipos de solo, Schjonning (1986) relatou que em solos franco arenosos e solos arenosos grossos tinham o mesmo ângulo de atrito, mas, se comparado com os solos argilosos, os valores da coesão eram muito menores.

Os problemas de compactação e de resistência ao cisalhamento do solo ocorrem quando os maquinários trafegam em condições de umidade acima da ideal. Ao longo do tempo, a produtividade das áreas onde o controle da umidade não é feito, aumenta a probabilidade da degradação do solo (SAMPIETRO et al., 2015).

Em estudos relacionados a métodos de preparo do solo, Yavuzcan et al. (2002) constataram que nos sistemas de preparo do solo, tanto a resistência ao cisalhamento quanto a densidade do solo, diminuíram e verificaram que após a colheita os processos naturais e o tráfego de veículos auxiliaram na re-compactação do solo fazendo com que o mesmo tenha o mesmo aspecto de antes do preparo.

A coesão constitui importante propriedade física do solo, podendo ser influenciada pelos sistemas de manejo. Silva; Cabeda (2005) estudaram os efeitos sobre a resistência do solo pela influência sobre a coesão e ângulo de atrito de diferentes manejos de solo cultivado com cana-de-açúcar e concluíram que a coesão do solo aumentou à medida que a quantidade de água diminuiu. Mesmo resultado foram constatados por Braida et al. (2007).

O ângulo de atrito interno (ϕ) é uma propriedade que é influenciada diretamente com a composição granulométrica do solo, pois a predominância de areia provoca um acréscimo ângulo de atrito interno (ARAÚJO FILHO et al., 2017).

Carbono Orgânico

Os resíduos de matéria seca das plantas permitem um incremento no estoque de carbono do solo, além de recuperar os teores de matéria orgânica a valores próximos do original, pois o acúmulo de carbono no solo é um fator de extrema relevância para o cultivo (COSTA et al., 2015). O estoque de carbono de um solo sob vegetação natural representa o balanço dinâmico entre a adição de material vegetal morto e a perda pela decomposição ou mineralização, sendo a quantidade e qualidade desse componente dependente do clima, do tipo de vegetação, da estrutura do solo e da fertilidade do mesmo (PEDRA et al., 2012).

As práticas intensivas de manejo do solo alteram suas características físicas e químicas. Em relação à parte química, o carbono orgânico é uma das componentes mais importantes e que sofre mais alteração. Em estudo realizado por Bruun et al. (2015), foi constatado que, em solos franco-arenosos, a concentração de carbono orgânico tende a ser menor, além disso, verificaram uma redução média de 30% de carbono orgânico em solo cultivado há 20 anos em relação à floresta nativa.

O preparo do solo aumenta a decomposição da matéria orgânica e diminui o conteúdo de carbono, aumentando a taxa de oxidação da matéria orgânica. Porém, segundo Parihara et al. (2016), o sistema de rotação de cultura tem relação positiva na renovação do carbono orgânico e constataram um aumento aproximado de 10%, utilizando o sistema de renovação do cultivo.

O índice de compressão avaliado por Freitas (2018) teve forte correlação com os teores de carbono, pois em seu trabalho ele observou que o índice de compressão foi maior nos tratamentos que receberam maiores quantidades de carbono orgânico, mas também evidenciou que a densidade do solo e o grau de compactação tiveram relação inversa ao

índice de compressão, pois o aumento dessas duas variáveis é proporcionado pela compactação, o que significa a redução da suscetibilidade às novas compactações.

Em sistemas agrícolas que promovem elevada adição de resíduos orgânicos ao solo, tanto vegetal como animal, provocam aumento nos teores de matéria orgânica, esse fator contribui com o aumento da relação entre a estabilidade de agregados, pois fatores como o teor de matéria orgânica, a fauna do solo, presença de microrganismos, presença de raízes e de agentes inorgânicos auxiliam na formação dos agregados do solo (TROLEIS et al., 2017). Somando-se a isso, as práticas de colheita sem fogo em cultivos de cana-de-açúcar influenciam a matéria orgânica que está intrinsecamente ligada ao armazenamento de carbono.

A presença da palha da cana sobre a superfície permite aumentar em 5 anos o intervalo entre as reformas do canavial, o que minimiza a perda gradual dos nutrientes da planta. Alguns estudos avaliaram a quantidade de carbono em áreas cultivadas com cana-de-açúcar com e sem queima da palhada e tiveram como conclusão que, nas áreas onde não houve queima, a quantidade de carbono foi maior, corroborando assim para a sustentabilidade dos sistemas (SIGNOR et al., 2016).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- An, J.; Zhang, Y.; Yu, N. Quantifying the effect of soil physical properties on the compressive characteristics of two arable soils using uniaxial compression tests. *Soil & Tillage Research*, v.145, p.216-223, 2015.
- Araújo Filho, R. N. de; Holanda, F. S. R.; Pedrotti, A.; Santos, T. O.; Lino, J. B.; Rocha, I. P. da. Influência dos atributos físicos-mecânicos do solo na estabilidade do talude do Baixo São Francisco. *Revista Scientia Agraria*, v.18, p.107-113, 2017.
- Braga, F. V. A.; Reichert, J. M.; Mentges, M. I.; Vogelmann, E. S.; Padrón, R. A. R. Propriedades mecânicas e permeabilidade ao ar em topossequência Argissolo-Gleissolo: variação no perfil e efeito de compressão. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.39, p.1025-1035, 2015.
- Braida, J. A.; Reichert, J. M.; Reinert, D. J.; Soares, J. M. D. Coesão e atrito interno associados aos teores de carbono orgânico e de água de um solo franco arenoso. *Ciência Rural*, v.37, p.1646-1653, 2007.

- Brown, V.; Barbosa, F. T.; Bertol, I; Mafra, A. L.; Muzeka, L. M. Efeitos no solo e nas culturas após vinte anos de cultivo convencional e semeadura direta. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, v.13, p.981-997, 2018.
- Bruun, T. B.; Elberling, B.; Neergaard, A.; Magid, J. Organic Carbon Dynamics in Different Soil Types After Conversion of Forest to Agriculture. *Land Degradation & Development* v.26, p.272-283, 2015.
- Campos, M. C. C.; Aquino, R. E.; Oliveira, I. A.; Bergamim, A. C. Variabilidade espacial da resistência mecânica do solo à penetração e umidade do solo em área cultivada com cana-de-açúcar na região de Humaitá, Amazonas, Brasil. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, v.8, p.305-310, 2013.
- Chamen, T. W. C.; 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 Research*, v.146, p.10-25, 2015.
- Cherubin, M. R.; Karlen, D. L.; Franco, A. L. C.; Tormena, C. A.; Cerri, C. E. P.; Davies, C. A.; Cerri, C. C. Soil physical quality response to sugarcane expansion in Brazil. *Geoderma*, v.267, p.156-168, 2016.
- CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento de safra brasileira: cana-de-açúcar, quarto levantamento. Brasília: Conab, 2017. 82p.
- Corrêa, J. C. Efeito de sistemas de cultivo na estabilidade de agregados de um Latossolo vermelho amarelo em Querência, MT. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.37, p.203-209, 2012.
- Costa, N. R.; Andreotti, M.; Lopes, K. S. M.; Yokobatake, K. L.; Ferreira, J. P.; Pariz, C. M.; Bonini, C. S. B.; Longhini, V. Z. Atributos do solo e acúmulo de carbono na integração lavoura-pecuária em sistema plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.39, p.852-863, 2015.
- Erktan, A.; Cécillon, L.; Graf, F.; Roumet, C.; Legout, C.; Rey, F. Increase in soil aggregate stability along a Mediterranean successional gradient in severely eroded gully bed ecosystems: combined effects of soil, root traits and plant community characteristics. *Plant Soil*, v.398, p.121-137, 2016.
- Freitas, J. A. S. Propriedades físico-mecânicas e carbono do solo após aplicação sucessivas de resíduos orgânicos de aves e suínos. 2018. 72p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

- Girardello, V. C.; Amado, T. J. C.; Santi, A. L.; Lanzaova, M. E.; Tasca, A. Resistência do solo à penetração e desenvolvimento radicular da soja sob sistema plantio direto com tráfego controlado de máquinas agrícolas. *Revista Scientia Agraria*, v.18, p.1-10, 2017.
- Gubiani, P. I.; Reinert, D. J.; Reichert, J. M. Valores críticos de densidade do solo avaliados por condições de contorno. *Ciência Rural*, v.44, p.994-1000, 2014.
- Labegalini, N. S.; Buchelt, A. C.; Andrade, L.; Oliveira, S. C.; Campos, L. M. Desenvolvimento da cultura do milho sob efeitos de diferentes profundidades de compactação do solo. *Revista de Agricultura Neotropical*, v.3, p.7-11, 2016.
- Lambe, T. W. *Soil testing for engineers*. New York: John Wiley, 1951. 165p.
- Lima, R. P.; Rolim, M. M.; Oliveira, V. S.; Silva, A. R.; Pedrosa, E. M. R.; Ferreira, R. L. C. Load-bearing capacity and its relationships with the physical and mechanical attributes of cohesive soil. *Journal of Terramechanics*, v.58, p.51-58, 2015.
- Lourenzani, W. L.; Caldas, M. Mudanças do uso da terra decorrentes da expansão da cultura da cana-de-açúcar na região oeste do estado de São Paulo. *Ciência Rural*, v.44, p.980-987, 2014.
- Molina Júnior, W. F. *Comportamento Mecânico do Solo em Operações Agrícolas*. São Paulo: ESALQ/USP, 2017. 223p.
- Nascimento, E. M. S.; Amorim, M. Q.; Araújo, K. L. B.; Cavalcante, T. R. B.; Chioderoli, C. A. Shear strength and preconsolidation Red Yellow Acrisol from Northeast semiarid under conventional and no-tillage management. *Revista Ciências Agrárias*, v.60, p.322-327, 2017.
- Nunes, M. R.; Denardin, J. E.; Pauletto, E. A.; Faganello, A.; Pinto, L. F. S. Mitigation of clayey soil compaction managed under no-tillage. *Soil & Tillage Research*, v.148, p.119-126, 2015.
- Oliveira Filho, F. X.; Miranda, N. O.; Medeiros, J. F., Silva, P.C. M.; Mesquita, F. O.; Costa, T. K. G. Zona de manejo para preparo do solo na cultura da cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.19, p.186-193, 2015.
- Oliveira, V. S.; Rolim, M. M.; Vasconcelos, R. F. B.; Pedrosa, E. M. R. Distribuição de agregados e carbono orgânico em um Argissolo Amarelo distrocoeso em diferentes manejos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.14, p.907-913, 2010.

- Ortiz, P. F. S.; Rolim, M. M.; Lima, J. L.P.; Pedrosa, E. M. R.; Dantas, M. S. M.; Tavares, U. E. Physical qualities of an Ultisol under sugarcane and Atlantic forest in Brazil. *Geoderma Regional*, v.11, p.62-70, 2017.
- Pacheco, E. P.; Cantalice, J. R. B. 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*, v.35, p.417-428, 2011.
- Pádua, E. J.; Guerra, A. R.; Zinn, Y. L. Modelagem da densidade do solo em profundidade sob vegetação nativa em Mina Gerais. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.39, p.725-736, 2015.
- Parihara, C. M.; Yadav, M. R.; Jat, S. L.; Singh, A. K.; Kumar, B.; Pradhan, S.; Chakraborty, D.; Jat, M. L.; Jat, R. K.; Saharawat, Y. S.; Yadav, O. P. Long term effect of conservation agriculture in maize rotations on total organic carbon, physical and biological properties of a sandy loam soil in north-western Indo-Gangetic Plains. *Soil & Tillage Research*, v.161, p.116-128, 2016.
- Pedra, W. N.; Pedrotti, A.; Silva, T. O.; Macedo, F. L.; Gonzaga, M. I. S. Estoques de carbono e nitrogênio sob diferentes condições de manejo de um Argissolo Vermelho Amarelo, cultivado com milho doce nos tabuleiros costeiros de Sergipe. *Semina: Ciências Agrárias*, v.33, p.2075-2090, 2012.
- Portugal, A. F.; Juncksh, I.; Schaefer, C. E. R. G., Neves, J. C. L. Estabilidade de agregados em Argissolo sob diferentes usos comparado com mata. *Revista Ceres*, v.57, p.545-553, 2010.
- Pryor, S. W.; Smithers, J.; Lyne, P.; Antwerpen, R. Impact of agricultural practices on energy use and greenhouse gas emissions for South African sugarcane production. *Journal of Cleaner Production*, v.141, p.137-145, 2017.
- Reichert, J. M.; Rosa, V. T.; Vogelmann, E. S.; Rosa, D. P.; Horn, R.; Reinert, D. J.; Sattler, A.; Denardin, J. E. Conceptual framework for capacity and intensity physical soilproperties affected by short and long-term (14 years) continuous no-tillage and controlled traffic. *Soil & Tillage Research*, v.158, p.123-136, 2016.
- Rocha, K. F.; Cassol, L. C.; Piva, J. T.; Minato, E. A.; Faversoni, J. C. Caracteres morfológicos e componentes de rendimento de milho sob diferentes sistemas de preparo de solo e plantas de cobertura de inverno. *Synergismus Scyentifica*, v.9, p.1-5, 2014.

- Rossato, O. B.; Martello, J. M.; Crusciol, C. A. C. Fitomassa e acumulo de macronutrientes em cana-de-açúcar sob compactação e umidade do solo. *Irriga*, v.21, p.605-619, 2016.
- Sá, M. A. C.; Santos Junior, J. D. G.; Franz, C. A. B.; Rein, T. A. Qualidade física do solo e produtividade da cana-de-açúcar com uso da escarificação entre linhas de plantio. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.51, p.1610-1622, 2016.
- Sampietro, J. A.; Lopes, E. S.; Reichert, J. M. Compactação causada pelo tráfego de máquinas em Neossolo Regolítico sob distintas umidades. *Ciência Floresta*, v.25, p.239-248, 2015.
- Schjonning, P. Shear strength determination in undisturbed soil at controlled water potential. *Soil & Tillage Research*, v.8, p.171-179, 1986.
- Signor, D.; Czczyca, R. V.; Milori, D. M. B. P.; Cunha, T. J. F.; Cerri, C. E. P. Atributos químicos e qualidade da matéria orgânica do solo em sistemas de colheita de cana-de-açúcar com e sem queima. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.51, p.1438-1448, 2016.
- Silva, A. J. N.; Cabeda, M. S. V. Influência de diferentes sistemas de uso e manejo na coesão, resistência ao cisalhamento e óxidos de Fe, Si e Al em solo de tabuleiro costeiro de Alagoas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.29, p.447-457, 2005.
- Silva, A. J. N.; Carvalho, F. G. Coesão e resistência ao cisalhamento relacionadas a atributos físicos e químicos de um Latossolo amarelo de tabuleiro costeiro. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.31, p.853-862, 2007.
- Silva, J. S. Variabilidade espacial e temporal da salinidade do solo e da produtividade de cana-de-açúcar em área de sequeiro. 2016. 116f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife.
- Silva, M. A.; Arantes, M. T.; Rhein, A. F. L.; Gava, G. J. C.; Kolln, O. T. Potencial produtivo da cana-de-açúcar sob irrigação por gotejamento em função de variedades e ciclos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.18, p.241-249, 2014.
- Silva, R. P.; Rolim, M. M.; Gomes, I. F.; Pedrosa, E. M. R.; Tavares, U. E.; Santos, A. N. Numerical modeling of soil compaction in a sugarcane crop using the finite element method. *Soil & Tillage Research*, v.181, p.1-10, 2018.
- Shiri, J.; Keshavarzi, A.; Kisi, O.; Karimi, S.; Iturraran-Viveros, U. Modeling soil bulk density through a complete data scanning procedure: Heuristic alternatives. *Journal of Hydrology*, v.549, 2017.
- Souza, C. C. M.; Pedrosa, E. M. R.; Rolim, M. M.; Pereira Filho, J. V.; Souza, M. A. L. M. Influência da densidade do solo infestado por nematoide no desenvolvimento inicial da

- cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.18, p.475-479, 2014.
- Souza, C. F.; Matura, E. E.; Folegatti, M. V.; Coelho, E. F.; Or, D. Sondas de TDR para a estimativa da umidade e da condutividade elétrica do solo. *Irriga*, v.11, p.12-25, 2006.
- Tavares, U. E.; Rolim, M. M.; Simões Neto, D. E.; Pedrosa, E. M. R.; Magalhães, A. G.; Silva, E. F. F. Aggregate stability and penetration resistance after mobilization of a dystrocohesive Ultisol. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.21, p.752-757, 2017.
- Tavares, U. E. Resistência mecânica e atributos físicos de um Argissolo submetido a diferentes preparos do solo. 2016. 90f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife.
- Tisdall, J. M.; Oades, J. M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal Soil Science*, v.33, p.141-163, 1982.
- Troleis, M. J. B.; Roque, C. G.; Borges, M. C. R. Z.; Nogueira, K. B.; Gouveia, N. A. Estabilidade de agregados e teor de matéria orgânica em um Latossolo Vermelho sob *Urochloa brizantha* após aplicação de cama de peru. *Revista de Agricultura Neotropical*, v.4, p.83-87, 2017.
- Vicente, T. F. S.; Pedrosa, E. M. R.; Rolim, M. M.; Oliveira, V. S.; Oliveira, A. K. S.; Souza, A. M. P. L. Relações de atributos do solo e estabilidade de agregados em canaviais com e sem vinhaça. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.16, p.1215-1222, 2012.
- Vischi Filho, O. J.; Souza, Z. M.; Silva, R. B.; Lima, C. C.; Pereira, D. M. G.; Lima, M. E.; Sousa, A. C. M.; Souza, G. S. Capacidade de suporte de carga de Latossolo Vermelho cultivado com cana-de-açúcar e efeitos da mecanização no solo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.50, p.322-332, 2015.
- Vitti, C. A.; Trivelin, P. C. O.; Gava, G. J. C.; Pernatti, C. P.; Bologna, I. R.; Faroni, C. E.; Franco, H. C. J. Produtividade da cana-de-açúcar relacionada ao nitrogênio residual da adubação e do sistema radicular. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.42, p.249-256, 2007.
- Yavuzcan, H. G.; Vatandas, M.; Gürhan, R. Soil strength as affected by tillage system and wheel traffic in wheat -corn rotation in central Anatolia. *Journal of Terramechanics*, v.39, p.23-34, 2002.

- CAPÍTULO II -

**Atributos físicos e mecânicos do solo em função do tempo de cultivo da cana-de-
açúcar**

Atributos físicos e mecânicos do solo em função do tempo de cultivo da cana-de-açúcar

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi avaliar as relações dos atributos físicos e mecânicos do solo em função de diferentes épocas de cultivo da cana-de-açúcar. O estudo consistiu em coletas de solo para análises físicas, mecânicas e de carbono orgânico em cinco diferentes áreas: a primeira em pousio (T0), a segunda com um ano após a colheita (T1), a terceira após duas colheitas (T2), a quarta após três colheitas (T3) e a quinta após quatro colheitas (T4), e em duas profundidades 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m. As variáveis analisadas foram submetidas a estatística descritiva e análise multivariada canônica. Diante disso, as variáveis que se mostraram sensíveis ao tempo de colheita foram $D_{s\text{máx}}$, CO, w_c , GC, σ_p e essas mesmas componentes interferiram nas semelhanças e diferenças entre as áreas. O acúmulo de CO na camada de 0,00-0,20 m foi gradual ao longo do tempo de cultivo. As diferenças entre as áreas de estudo refletem-se na camada de 0,00-0,20 m, pois houve uma sequência em que as áreas com maior número de colheitas se mostraram próximas a compactação.

Palavras-chaves: carbono, cisalhamento, pré-consolidação, Proctor

Physical and mechanical attributes of the soil as a function of the time of cultivation of sugarcane

ABSTRACT

The objective of this work was to evaluate the physical and mechanical attributes of the soil as a function of different sugarcane cycles after harvest. The study consisted of soil samples for physical, mechanical and organic carbon analyzes in five different areas: the first fallow land (T0), the second with one year after harvest (T1), the third after two harvests (T2), the fourth after three harvests (T3) and the fifth after four harvests (T4), and at two depths 0,00-0,20 and 0,20-0,40 m. The analyzed variables were submitted to descriptive statistics and canonical multivariate analysis. Therefore, the variables that were sensitive to harvest time were $BD_{\text{máx}}$, OC, w_c , DC, σ_p and these same components interfered in the similarities and differences between the areas. The accumulation of CO in

the 0,00-0,20 m layer was gradual over the growing time. The differences between the study areas are reflected in the 0,00-0,20 m layer, as there was a sequence in which the areas with the highest number of crops were close to compaction.

Keyword: carbon, shear, preconsolidation, Proctor

INTRODUÇÃO

A procura intensa por fontes de energia renováveis ao longo dos anos devido ao grande aumento do preço do petróleo, bem como por questões ambientais, viabilizou uma crescente expansão no cultivo e produção de cana-de-açúcar (RIBEIRO et al, 2016). Neste contexto, o Brasil se insere como maior produtor dessa cultura com área cultivada de aproximadamente 10 milhões de hectares, esse número é exemplo da expansão da cultura que, entre os anos de 1990 e 2011, constatou-se um aumento de 45% de área plantada e uma produção de 1,5 bilhão de toneladas por ano (FILOSO et al., 2015).

No Nordeste, as áreas de cultivo de cana-de-açúcar encontram-se instaladas em tabuleiros costeiros, com predominância de Latossolos e Argissolos, onde a exploração do solo durante longos períodos de tempo atrelado ao aumento da produção pode resultar em alterações nas suas propriedades físicas e mecânicas (VASCONCELOS et al., 2014). Dessa forma, o cultivo intensivo tem tornado-se um desafio para o uso racional do solo de tabuleiros costeiros, causando potenciais impactos sobre o solo, uma vez que a qualidade do mesmo reflete na sustentabilidade ambiental e na produção futura de etanol (LIMA et al., 2015a; CHRERUBIN et al. 2015). Assim, para avaliação das áreas de cultivo e também do estado em que o solo encontra-se, é necessário se ter o conhecimento de algumas características do solo, que refletem a qualidade do mesmo, sendo elas a textura, porosidade, densidade, agregação e compactação (ALARCÓN-JIMÉNEZ et al., 2015; SILVA et al., 2014).

A compactação do solo é um processo que ocorre na maioria dos sistemas de manejo, principalmente os que têm um aporte de maquinários, dessa forma, do ponto de vista agrícola, a compactação é uma consequência indesejada que reduz a produtividade biológica do solo e, em casos extremos, torna-o inadequado ao crescimento das plantas, tornando-se uma das variáveis mais importantes para avaliação do solo (REICHERT et al., 2016).

Para se estudar os fenômenos decorrentes da compactação do solo, faz-se necessário conhecer o comportamento físico-mecânico do solo. O uso do ensaio de Proctor, que fornece os parâmetros do grau de compactação, densidade máxima e umidade crítica, é de suma importância para observar a susceptibilidade à compactação, bem como estabelecer níveis de umidade em que se pode tráfegar sem acarretar danos irreversíveis ao solo (BRAIDA et al., 2006).

Somando-se a isso, é também importante o conhecimento das tensões do solo que são obtidas através do ensaio de compressibilidade, que permite, através das curvas de compressão, a estimativa das tensões de pré-consolidação e índice de compressão, os quais representam a capacidade suporte do solo e explicam os efeitos da redução dos espaços porosos, especialmente dos macroporos (NASCIMENTO et al., 2017). Assim, esses componentes são influenciados pela estrutura do solo e condição de umidade, pois esta é fundamental para o conhecimento dos atributos físicos e mecânicos, uma vez que suas propriedades são as que mais modificam instantaneamente o rearranjo das partículas (AN et al., 2015).

Para uma avaliação mais completa, faz-se necessário também o estudo da resistência ao cisalhamento, que serve para complementar as informações já obtidas nos outros atributos. Yavuzcan; Gürhan (2012) avaliaram a resistência do solo ao cisalhamento em diferentes tipos de plantio e épocas de cultivo e concluíram que os valores de resistência ao cisalhamento aumentam significativamente após a colheita quando se compara com os valores obtidos após o plantio. Os parâmetros coesão e ângulo de atrito estão intrinsecamente ligados à textura do solo, densidade, teor de matéria orgânica e entre outros atributos do solo (BRAIDA et al., 2007; YANRONG 2018; HAVAEE et al., 2015).

Esses mecanismos de investigação são importantes para identificar os indicadores para monitorar a sustentabilidade dos sistemas de produção, pois permite caracterizar a situação atual do solo e alertar para possíveis riscos e prevenção de problemas futuros, demonstrando uma contribuição para alterar a capacidade produtiva, bem como sugerir práticas para o manejo da colheita, onde ocorre a maior parte dos processos deletérios decorrentes do sistema de plantio da cultura (CÂNDIDO et al., 2015).

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar as relações dos atributos físicos e mecânicos do solo em função de diferentes épocas de cultivo da cana-de-açúcar.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi conduzido na Estação Experimental de Cana-de-açúcar do Carpina (EECAC-UFRPE), situada no município de Carpina, PE, nas coordenadas 7°51'S de Latitude e 35°14'W Longitude e 178 m de altitude. O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo "AS", tropical chuvoso com verão seco.

O estudo consistiu em coletas de solo para análises físicas, mecânicas e de carbono orgânico, que foram realizadas no Laboratório de Aproveitamento de Resíduos e Mecânica dos Solos – UFRPE, em um Argissolo Amarelo distrocoeso, em cinco áreas: a primeira em pousio (T0); a segunda, com um ano após a colheita (T1); a terceira, após duas colheitas (T2); a quarta, após três colheitas (T3); e a quinta, após quatro colheitas (T4). Estas áreas estavam sendo cultivadas com variedades de cana-de-açúcar distintas, tais como: RB001443 (T1 e T2), RB951541 (T3) e RB92579 (T4), e a produtividade das respectivas áreas foram, 128,3 ton.ha⁻¹ (T1), 86 ton.ha⁻¹ (T2), 72,8 ton.ha⁻¹ (T3) e 60,6 ton.ha⁻¹, conforme registro de campo da EECAC.

Tabela 1. Caracterização física do Argissolo Amarelo distrocoeso e carbono orgânico (CO)

	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	Ds (g.cm ⁻³)	CO (g.kg ⁻¹)
0,00-0,20 m					
T0	80	10	10	1,46	8,50
T1	73	12	16	1,44	11,50
T2	68	13	19	1,43	13,10
T3	75	11	14	1,43	13,50
T4	77	10	13	1,60	17,30
0,20-0,40 m					
T0	71	11	17	1,58	17,40
T1	75	10	18	1,58	23,80
T2	64	12	24	1,49	24,70
T3	69	8	23	1,45	21,30
T4	72	10	19	1,56	22,60

T0 - pousio; T1 - 1 ano após a colheita; T2 - após 2 colheitas; T3 - após 3 colheitas; T4 - após 4 colheitas; Ds - densidade do solo; CO – carbono orgânico

Todas as áreas passaram pelos processos de preparo do solo antes de serem cultivadas: análise do solo, dessecação da cana, subsolagem, correção do solo com calcário e gesso, gradagem e sulcagem.

As coletas foram realizadas em novembro de 2017. Dentro de cada uma dessas

áreas, estabeleceu-se uma parcela experimental de 15,00×10,00 m para determinação dos atributos físicos e mecânicos do solo. Em cada uma das parcelas, foram determinados aleatoriamente quatro pontos onde as coletas foram realizadas, retirando-se as amostras nas camadas de 0,00-0,20 m e 0,20-0,40 m, totalizando 40 amostras para cada um dos atributos do solo avaliados.

A textura do solo foi determinada de acordo com a metodologia do densímetro de Boyoucos, onde a areia foi separada por peneiramento, enquanto a argila por sedimentação à temperatura constante de 20°C e o silte por diferença. A densidade seca (D_s) foi determinada por meio de amostras inderformadas coletadas com um amostrador tipo Uhland, utilizando anel volumétrico de 0,053 m de altura e 0,047 de diâmetro. Posteriormente, as amostras foram colocadas em estufa a 105°C para a obtenção do peso seco. A densidade do solo foi então determinada por meio da relação massa do solo seco sobre volume. Para umidade gravimétrica (w), utilizou-se a massa úmida do solo obtida em campo. Todas essas análises seguiram a metodologia da EMBRAPA (2011).

O ensaio de Proctor normal consistiu em compactar uma amostra de solo, previamente peneirada na peneira de nº 4, de acordo com a metodologia estabelecida pela norma NBR 7182 (ABNT, 1986). Com os resultados do ensaio, determinou-se a densidade seca máxima ($D_{s_{máx}}$) de compactação do solo e a umidade crítica (w_c); e o grau de compactação (GC) determinou-se pela relação entre a densidade do solo e a densidade seca máxima de compactação obtida no ensaio.

A compressibilidade do solo foi avaliada utilizando amostras indeformadas que foram coletadas em anéis metálicos com 0,025 m de altura e 0,065 m de diâmetro, nas profundidades de 0,00-0,20 m e 0,20-0,40 m, em cada um dos pontos das cinco áreas, totalizando 40 amostras. Os ensaios seguiram norma estabelecida pela NBR 12007 (ABNT, 1990) e todas as amostras foram saturadas durante todo o ensaio. As cargas sucessivas aplicadas foram de 3,125; 6,25; 12,5; 25; 50; 100; 200; 400; 800 e 1600 kPa, com leituras feitas aos 30, 60 e 120 segundos. Nesta última leitura, eram colocadas as cargas seguindo a ordem já descrita.

Para a determinação da tensão de pré-consolidação (σ_p) no estado saturado e o índice de compressibilidade (IC) a partir das curvas de compressão obtidas nos ensaios, utilizou-se o pacote *soilphysics* (SILVA; LIMA, 2015), por meio do software R (R CORE TEAM, 2016), onde se optou pela curva de Pacheco Silva para a determinação da tensão de pré-consolidação.

Para realização do ensaio de cisalhamento, para determinação da coesão (c) e ângulo de atrito (ϕ), foi escavada uma trincheira em cada um dos 4 pontos das 5 áreas, da qual foram extraídos os blocos indeformados com dimensões de $0,20 \times 0,20 \times 0,20$ m, nas profundidades de 0,00-0,20 m e 0,20-0,40 m, perfazendo um total de 40 blocos, que foram devidamente parafinados e acondicionados em caixas de madeira para a sua proteção durante o transporte.

Os ensaios foram realizados com o auxílio da prensa de cisalhamento direto da marca Solotest, em conformidade com a norma D6528 (ASTM, 2007). De cada bloco, foram extraídas 4 amostras onde as tensões utilizadas no ensaio foram de 10, 30, 40 e 50 kPa para camada de 0,00-0,20 m e para a camada de 0,20-0,40 m as tensões foram de 55, 60, 65, 70 kPa, simulando os níveis das cargas geostáticas verticais efetivas para o solo estudado.

As leituras foram realizadas seguindo as medidas da deflexão do extensômetro horizontal de 0,0; 0,1; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 7,0; 8,0; 9,0; 10,0 mm, com a amostra sendo saturada desde a primeira leitura. A velocidade mínima aplicada pelo equipamento foi de 0,30 mm/minuto, caracterizando assim o estudo como ensaio de cisalhamento direto rápido, sem consolidação e sem drenagem.

Ao final dos ensaios, para as tensões normais aplicadas, obteve-se um ponto que representa o estado de tensão na ruptura de cada ensaio, representando o círculo de Mohr. A linha que tangencia estes círculos é definida como envoltória de ruptura de Mohr, a qual aplica-se a equação de Coulomb ($\tau = c + \sigma_n \operatorname{tg} \phi$), permitindo encontrar os valores da coesão (c) e do ângulo de atrito interno (ϕ) para os pontos avaliados.

O carbono orgânico (CO) foi determinado por oxidação quente com dicromato de potássio e titulação com sulfato ferroso amoniacal, de acordo com Yeomans; Bremner (1988).

Os dados foram submetidos à análise descritiva (médias e coeficiente de variação), bem como análise de discriminantes canônicas (ADC), em uma abordagem multivariada, com o intuito de agrupar e reduzir variáveis originais. Os gráficos bidimensionais, do tipo Biplot, foram utilizados para representar as variáveis canônicas com alta retenção da variabilidade experimental. As médias das variáveis canônicas, para cada tratamento, foram comparadas por esferas de confiança a 95% de significância. Toda análise multivariada foi realizada através do pacote *candisc*, por meio do Software R (R CORE TEAM, 2016).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Em todas as áreas observou-se uma quantidade maior da fração areia em relação à fração argila e silte, independentemente das áreas estudadas, o teor de argila aumentou na camada de 0,20-0,40 m (Tabela 2 e 3), indicando a translocação de argila da camada superior para a inferior, corroborando estudo realizado por Cortez et al. (2015) em Argissolo Amarelo distrófico. Vale ressaltar que esse comportamento é típico de solos de tabuleiros costeiros onde a predominância de um gradiente estrutural, pois partículas mais finas podem ser consideradas moveis no interior do perfil (BORTOLUZZI et al., 2007).

Tabela 2. Médias e coeficiente de variação (CV) da areia, silte e argila, umidade gravimétrica (w), densidade seca máxima ($D_{s_{máx}}$), umidade crítica (w_c), grau de compactação (GC), tensão de pré-consolidação (σ_p), índice de compressão (IC), coesão (c), ângulo de atrito (ϕ) e carbono orgânico (CO), na camada 0,00-0,20 m nas áreas T0, T1, T2, T3 e T4.

Áreas	T0		T1		T2		T3		T4	
	Média	CV (%)								
Areia (%)	79,75	4,46	72,75	11,30	67,94	10,16	74,63	2,98	76,69	0,62
Silte (%)	9,67	16,28	11,98	10,69	13,26	27,45	11,28	18,41	10,39	15,68
Argila (%)	9,99	11,76	15,86	18,64	18,80	32,27	14,10	13,61	12,93	10,50
$D_{s_{máx}}$ (g.cm ⁻³)	1,94	2,87	1,95	2,88	1,93	2,63	1,82	3,67	1,87	2,36
w_c (g.g ⁻¹)	0,09	11,30	0,10	8,60	0,12	11,50	0,11	8,77	0,13	8,79
GC (%)	75,16	3,06	74,06	2,69	74,25	8,22	78,76	8,95	85,43	3,08
w (g.g ⁻¹)	0,07	3,93	0,10	16,02	0,09	15,73	0,06	30,19	0,05	21,46
σ_p (kPa)	24,83	16,50	24,06	14,83	39,14	35,51	58,44	16,98	40,14	17,45
IC (kPa)	0,20	11,80	0,22	18,37	0,23	16,46	0,22	25,08	0,20	23,92
c (kPa)	8,37	67,48	11,99	30,17	6,66	47,31	9,19	61,04	13,08	23,07
ϕ (°)	34,31	15,61	32,73	30,44	32,33	20,54	32,49	15,57	29,90	9,33
CO (g.kg ⁻¹)	8,50	8,00	11,50	7,99	13,10	23,44	13,50	12,02	17,30	6,54

Para a camada de 0,00-0,20 m, as variáveis canônicas Can1 e Can2 explicaram 97% da variância dos dados. Tal valor confere elevada confiabilidade na explicação da variação total dos atributos do solo. A primeira variável canônica (Can1) explicou 91% e a segunda variável canônica (Can2) representou apenas 6%, isso quer dizer que a maior parte das informações estão sendo explicadas pela variável Can1 na camada de 0,00-0,20 m, ou seja,

no sentido esquerdo-negativo ou direito-positivo. Nesta mesma camada, as áreas foram diferentes entre si, pois as esferas não estão sobrepostas (Figura 1A).

Tabela 3. Médias e coeficiente de variação (CV) da areia, silte e argila, unidade gravimétrica (w), umidade crítica (w_c), densidade seca máxima ($D_{S_{máx}}$), grau de compactação (GC), tensão de pré-consolidação (σ_p), índice de compressão (IC), ângulo de atrito (ϕ) e carbono orgânico (CO) na camada 0,20-0,40 m nas áreas T0, T1, T2, T3 e T4

Áreas	T0		T1		T2		T3		T4	
	Média	CV (%)								
Areia (%)	71,31	14,14	74,50	5,18	63,56	9,32	69,19	8,98	71,63	6,90
Silte (%)	11,06	30,94	9,64	17,55	12,35	25,68	8,49	49,82	9,58	26,54
Argila (%)	17,04	45,57	17,63	17,21	24,09	21,63	22,91	9,82	18,80	17,68
$D_{S_{máx}}$ (g.cm ⁻³)	1,95	1,49	1,95	2,24	1,80	5,17	1,83	2,58	1,87	2,79
w_c (g.g ⁻¹)	0,10	3,75	0,10	11,47	0,15	12,15	0,14	8,27	0,15	40,98
GC (%)	81,00	2,85	81,00	3,00	82,85	9,79	79,13	4,63	83,51	4,78
w (g.g ⁻¹)	0,07	13,76	0,07	13,76	0,07	14,29	0,12	8,50	0,09	11,13
σ_p (kPa)	47,45	38,92	47,53	8,36	48,80	57,16	52,02	19,19	40,03	37,63
IC (kPa)	0,18	17,49	0,18	14,12	0,23	15,17	0,20	14,84	0,23	43,42
ϕ (°)	41,17	9,30	41,17	17,08	39,31	10,94	43,88	12,40	41,25	14,60
CO (g.kg ⁻¹)	10,09	2,31	10,68	1,22	12,08	2,24	12,80	2,19	13,80	8,78

Enquanto a camada 0,20-0,40 m, o total representado para as variáveis canônicas (Can1 e Can2) foi de 85% da variabilidade, assim a Can1 representou 43% e a Can2 42% (Figura 1B). Resultados similares foram encontrados Khaledian et al. (2017) onde a primeira componente reteve 41% da variação total dos dados.

A $D_{S_{máx}}$ na camada de 0,00-0,20 m, (Tabela 2) das áreas T0, T1 e T2 (1,94, 1,95 e 1,93 g.cm⁻³) obtiveram valores superiores em relação às áreas com maior tempo de cultivo (T3 e T4), o inverso aconteceu com os dados da w_c . Essas diferenças ocorreram devido aos percentuais de areia serem diferentes, pois, na Figura 1A, o vetor contendo a variável areia está apontando para T4 e T3 e estão contrários a T0, T1 e T2, assim, estes últimos tratamentos tendem a ter menores valores de areia e, conseqüentemente, maiores teores de argila. Outro ponto importante é a presença de carbono orgânico que também influencia nos valores de densidade de modo que, quanto maior o teor de carbono no solo, menor será seus valores de densidade e vice-versa. Tavares et al. (2012) também afirmou que os o CO e o percentual de argila também influenciam nesta variável.

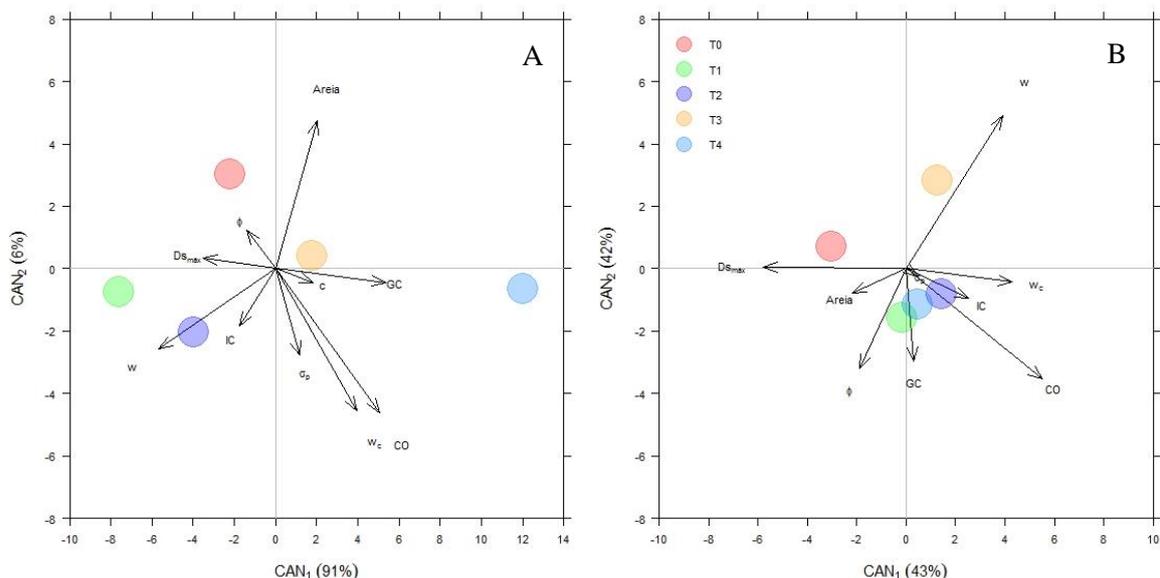


Figura 1. Dispersão dos scores das duas primeiras variáveis canônicas (Can1 e Can2) para as áreas T0 (pousio), T1 (um ano após a colheita), T2 (após duas colheitas), T3 (após três colheitas) e T4 (após quatro colheitas) para a camada 0,00-0,20 m (A) e camada 0,20-0,40 m (B), contendo as variáveis: umidade gravimétrica (w), umidade crítica (w_c), densidade seca máxima ($D_{s_{máx}}$), grau de compactação (GC), tensão de pré-consolidação (σ_p), índice de compressão (IC), ângulo de atrito (ϕ) e carbono orgânico (CO)

Na camada de 0,20-0,40 m (Tabela 3), ocorre o mesmo padrão da camada 0,00-0,20 m em relação a $D_{s_{máx}}$, ou seja, a área T0 e T1 são as que tem as maiores médias, porém nesta camada, o vetor da areia tende, para estas mesmas áreas (Figura 1B), ou seja, os teores de areia e de argila nessa camada tendem a influenciar a $D_{s_{máx}}$, resultados semelhantes foram encontrados por Braidá et al. (2006) que avaliaram um solo arenoso e um outro argiloso.

Nas camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m, a área que obteve maior valor do GC foi T4, isso pode ser explicado pelo fato de que em T4 houve um número maior de operações no solo, por ser a área com maior número de cortes (colheita) em relação as demais. Ambos valores foram próximos a 85%, e, segundo Linstrom; Voorhess (1994), valores acima de 86% são prejudiciais ao desenvolvimento e rendimento de culturas, sendo assim, o valor do GC nesta área foi muito próximo ao estabelecido como limite. Outros autores como Naderi-Boldaji; Keller (2016), afirmam que o grau de compactação pode ser usado como um índice para avaliar a qualidade física do solo, sendo de fácil obtenção em relação

aos outros atributos do solo e identificaram como estado crítico ao crescimento das plantas GC acima de 87%.

A tensão de pré-consolidação na camada de 0,00-0,20 m, teve um acréscimo nos valores de T0, T1, T2 e T3; isto ocorreu devido à quantidade das operações do solo terem aumentado ao longo das colheitas. Eventos semelhantes foram encontrados por Vischi Filho et al. (2015), onde eles trabalharam com a avaliação do sistema de manejo com três ciclos consecutivos de cultivo de cana-de-açúcar (18 anos) utilizando colheita mecanizada e constataram que a σ_p na linha de plantio foi maior na profundidade de 0,00-0,30 m, em comparação ao sistema com um ciclo de cultivo (6 anos), o que indica o efeito da compactação do solo ao longo dos ciclos.

O mesmo ocorreu na camada de 0,20-0,40 m em relação à tensão de pré-consolidação, o aumento foi gradual entre as áreas, mas os valores foram maiores em relação à camada de 0,00-0,20 m. Isso ocorreu porque, nesta camada inferior, a densidade do solo seca teve um aumento em relação a outra camada (Tabela 1) e, segundo Debiase et al. (2008), esse fator, bem como a presença de água, afetam a tensão de pré-consolidação, pois, em solos mais densos, as forças de coesão e fricção atuam de forma mais acentuada. Nesta mesma camada, é possível perceber (Figura 1B) que a tensão de pré-consolidação não teve influência na análise geral dos dados devido ao seu peso ser muito pequeno em relação as demais variáveis.

A coesão do solo na camada de 0,00-0,20 m teve seus valores muito baixos, porque o solo tem textura franco-arenosa e a variável é muito sensível ao conteúdo de água no solo, mesma observação foi encontrada por Silva; Carvalho (2007), onde trabalharam com solos de tabuleiros costeiros e avaliaram os horizontes coesos e não-coesos e concluíram que a coesão do solo aumenta com a redução do teor de água. Com relação ao ângulo de atrito, as maiores médias foram encontradas na camada 0,20-0,40 m, isso ocorre porque, na camada inferior, a densidade do solo (Tabela 1) tende a ser maior e provavelmente mais compactada, explicando assim o seu aumento nesta camada. Segundo Yanrong (2018), o ângulo de atrito diminui com o aumento da umidade e aumenta com a densidade seca.

Os valores do CO na camada 0,00-0,20 m (Figura 1A e Tabela 2) foram maiores nas áreas T3 e T4, e, nesta mesma camada, houve um crescimento gradual do CO, isso ocorreu devido ao fato de que essas áreas apresentavam maior deposição de matéria orgânica adicionada em decorrência das colheitas anteriores. Esses resultados corroboram os dados $D_{s_{m\acute{a}x}}$ serem menores nessas áreas (T3 e T4) e a w_c serem maiores, pois as

partículas de matéria orgânica tendem a absorver e armazenar maior percentual de água. Resultados semelhantes foram observados por Rossetti; Centurion (2015), onde os menores valores de $D_{s_{máx}}$ diminuíram devido a maior concentração de matéria orgânica. A presença da matéria orgânica, que é uma grandeza proporcional ao CO, melhora as condições físicas do solo, pois é o principal agente cimentante para a formação de agregados influenciando assim na retenção de água e aeração do solo (VASCONCELOS et al., 2014).

O CO na camada de 0,00-0,20 também influenciou o ângulo de atrito e a coesão, pois na área com maior teor de carbono (T4), o ângulo de atrito decresceu, enquanto que a coesão foi maior que nas demais áreas. Segundo Braida et al. (2007), o teor de matéria orgânica é associado à redução do ângulo de atrito, porque o incremento da matéria orgânica resultou em uma redução da densidade, isto significa que há uma diminuição no número de pontos de contato entre elas, dessa maneira o atrito também diminui.

Na camada de 0,20-0,40 m, também ocorreu evolução CO, porém de forma menos acentuada do que na camada de 0,00-0,20 m. Possivelmente porque, nesta camada inferior, os valores de CO tendem a serem menores do que na camada superior, pois é onde ocorre a deposição de matéria orgânica. Além disso, o revolvimento do solo só é realizado antes do preparo, impedindo a ciclagem de CO de forma mais acentuada nas camadas inferiores. Zuber et al. (2017) afirma que a escolha do preparo do solo pode ter grande influência na ciclagem do CO, pois a decomposição de resíduos e da matéria orgânica são acelerados pelo preparo de solo, além disso, em solos que são continuamente arados, a perda de carbono é de aproximadamente 51% em relação ao total segundo Lisetskii et al. (2015).

De forma geral, é possível perceber que o CO foi um dos parâmetros principais que serviram de explicação para a variação da $D_{s_{máx}}$, coesão, ângulo de atrito na camada de 0,00-0,20 e de 0,20-0,40 m, pois onde os valores de CO eram mais acentuados a $D_{s_{máx}}$ e o ângulo de atrito decresceram, enquanto a coesão aumentou. As maiores médias para w_c , GC, c e CO na camada 0,00-0,20 m foram observadas em T4, e as menores médias do silte, da argila, da w_c , do CO, da σ_p e do IC em T0. Na camada 0,20-0,40 m, as maiores médias foram observadas em T1 (areia, $D_{s_{máx}}$, σ_p) e T2 (silte, argila, w_c , IC e CO), desse modo, a área T0 apresentou os menores valores entre as áreas para o teor de argila, w, IC, CO, uma vez que, a mesma não apresentava cultivo de cana-de-açúcar, pousio.

Os coeficientes de variação (CV) da umidade (w) na camada 0,00-0,20 m indicaram baixa e média variabilidade ($CV < 60\%$) em todas as áreas, de acordo com a classificação

Warrick; Nielsen (1980), resultados semelhantes foram encontrados por Ribeiro et al. (2016). Além disso, a areia, $D_{S_{m\acute{a}x}}$, w_c e GC, apresentaram baixo CV nas áreas estudadas independentemente da camada. Resultados similares foram encontrados por Lima et al. (2015b). A σ_p e c apresentaram CV de média e alto em todos os tratamentos. De forma geral, é possível perceber, que a maioria dos dados não variaram muito entre cada área estudada, tanto para a camada superior como para inferior.

Os fatores que influenciaram na diferença entre as áreas (Figura 1A) na camada 0,00-0,20 m, foram a $D_{S_{m\acute{a}x}}$, a w , o ângulo de atrito, GC, CO e w_c , onde as três primeiras variáveis se encontram do lado esquerdo-negativo e as três últimas no lado direito-positivo. Estas colocações são possíveis pelo fato do tamanho dos vetores em relação ao centro das variáveis citadas acima serem maior. Lima et al. (2015a) afirma que o sentido dos coeficientes atribuídos a uma variável representa a importância da variabilidade desse atributo na área experimental.

Na camada 0,00-0,20 m T0, T1 e T2, ficaram opostas a T3 e T4, isso ocorreu porque nesta camada houve uma sequência lógica em relação ao tempo de cultivo, pois nas áreas onde foram realizadas mais colheitas é possível que sejam as áreas mais distintas das demais tendo como base, principal, o distanciamento de T4 em relação as demais áreas e que os fatores que interferiram nessa avaliação foram o GC, w_c , CO e areia. T0, T1 e T2, ficaram agrupadas do mesmo lado, porém não foram iguais, e as variáveis que contribuíram para este arranjo foram o $D_{S_{m\acute{a}x}}$ e w , isto ocorreu porque essas áreas são as que tiveram menores números de colheitas e T0 se distanciou das demais áreas desse grupo por ter propriedades menos expressivas do que as demais, pois estava em pousio.

Para a camada de 0,20-0,40 m (Figura 1B), é possível observar que as áreas T1, T2 e T4 foram semelhantes entre si, pois, as esferas que as representam estão sobrepostas, enquanto que, as áreas T0 e T3, foram diferentes das demais. As variáveis que influenciaram as semelhanças das áreas foram w_c , GC e CO, enquanto as variáveis que as distinguíram das demais a w e $D_{S_{m\acute{a}x}}$.

As semelhanças ocorreram na camada 0,20-0,40 m, possivelmente, devido ao fato de que a metodologia de preparo do solo não se aplica em camadas inferiores tornando a camada inferior homogênea e sem muita variação em relação aos atributos que influenciaram nos dados. Chamen et al., (2015) afirmam que as ações de subsolagem e escarificação, nem sempre são eficientes na descompactação do solo, pois normalmente

têm efeitos temporários, o que demanda repetições frequentes e custos elevados, e, além disso, estas práticas sucessivas favorecem a mineralização da matéria orgânica.

Em ambas as camadas σ_p , IC e c, não influenciaram nas semelhanças ou diferenças entre as áreas, pois os vetores destas variáveis estão bem próximos do centro, principalmente a σ_p na segunda camada, ou seja, não houve interação entre a tensão de pré-consolidação, índice de compressão e a coesão em relação aos demais atributos do solo. Resultados semelhantes foram encontrados por Fidalski et al. (2015) que avaliaram a densidade do solo, CO e tensão de pré-consolidação de um Argissolo Vermelho distrófico latossólico e concluíram que não houve interação entre esses atributos.

CONCLUSÕES

As variáveis que mudaram ao longo do tempo de cultivo foram $D_{s_{m\acute{a}x}}$, CO, w_c , GC, σ_p , sendo esta última componente a única que não interferiu nas semelhanças e diferenças entre as áreas. O acúmulo de CO na camada de 0,00-0,20 m foi gradual ao longo do tempo de cultivo avaliados e serviu de incremento para os parâmetros de $D_{s_{m\acute{a}x}}$, coesão e ângulo de atrito. As diferenças entre as áreas de estudo refletem-se na camada de 0,00-0,20 m, pois houve uma sequência em que as áreas com maior número de colheitas se mostraram próximas à compactação. Enquanto que, na camada 0,20-0,40 m, boa parte das áreas foram homogêneas identificando que o preparo do solo não foi eficiente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alarcón-Jiménez, M. F.; Camacho-Tamayo, J. H.; Bernal, J. H. Management zones based on corn yield and soil physical attributes. *Agronomia Colombiana*, v.33, p.373-382, 2015.
- An, J.; Zhang, Y.; Yu, N. Quantifying the effect of soil physical properties on the compressive characteristics of two arable soils using uniaxial compression tests. *Soil & Tillage Research*, v.145, p.216-223, 2015.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12007: Solo: ensaio de adensamento unidimensional. Rio de Janeiro, 1990. 13p.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7182: Solo: ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1986. 11p.

- ASTM - American Society for Testing and Materials. D 6528: Standard Test Method for Consolidated Undrained Direct Simple Shear Testing of Cohesive Soils. West Conshohocken, 2007. 9p.
- Bortoluzzi, E. C.; Pernes, M.; Tessier, D. Mineralogia de partículas envolvidas na formação de gradiente textural em um Argissolo subtropical. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.32, p.997-1007, 2007.
- Braida, J. A.; Reichert, J. M.; Reinert, D. J.; Soares, J. M. D. Coesão e atrito interno associados aos teores de carbono orgânico e de água de um solo franco arenoso. *Ciência Rural*, v.37, p.1646-1653, 2007.
- Braida, J. A.; Reichert, J. M.; Veiga, M.; Reinert, D. J. Resíduos vegetais na superfície e carbono orgânico do solo e suas relações com a densidade máxima obtida no ensaio de Proctor. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.30, p.605-614, 2006.
- Cândido, B. M.; Silva, M. L. N.; Curi, N.; Freitas, D. A. F.; Mincato, R. L.; Ferreira, M. M. Métodos de indexação de indicadores na avaliação da qualidade do solo em relação à erosão hídrica. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.39, p.589-597, 2015.
- Chamen, T. W. C.; 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 Research*, v.146, p.10-25, 2015.
- Cherubini, M. R.; Franco, A. L. C.; Cerria, C. E. P.; Oliveira, D. M. S.; Davies, C. A.; Cerric, C. C. Sugarcane expansion in Brazilian tropical soils-Effects of land use change on soil chemical attributes. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v.211, p.173-184, 2015.
- Cortez, J. W.; Nagahama, H. J.; Olszewski, N.; Patrocínio Filho, A. P.; Souza, E. B. Umidade e temperatura de Argissolo Amarelo em sistemas de preparo e estádios de desenvolvimento do milho. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola*, v.35, p.699-710, 2015.
- Debiasi, H.; Levien, R.; Trein, C. R.; Conte, O.; Mazurana, M. Capacidade de suporte e compressibilidade de um Argissolo, influenciadas pelo tráfego e por plantas de cobertura de inverno. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.32, p.2629-2637, 2008.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Manual de métodos de análises de solo. 2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa, 2011. 212p.

- Fidalski, J.; Cavalieri-Polizeli, K. M. V.; Tormena, C. A.; Anghinoni, G.; Auler, P. A. M. Capacidade de suporte de carga do solo em sistemas de produção de laranja conservacionista. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.39, p.880-885, 2015.
- Filoso, S.; Carmo, J. B.; Mardegan, S. F.; Lins, S. R. M.; Gomes, T. F.; Martinelli, L. A. Reassessing the environmental impacts of sugarcane ethanol production in Brazil to help meet sustainability goals. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, v.52, p.1847-1856, 2015.
- Havaee, S.; Mosaddegh, M. R. S. Ayoubi. In situ surface shear strength as affected by soil characteristics and land use in calcareous soils of central Iran. *Geoderma*, v.237-238, p.137-148, 2015.
- Khaledian, Y.; Kiani, F.; Ebrahimi, S.; Brevik, E. C.; Aitkenhead-Peterson, J. Assessment and monitoring of soil degradation during land use change using multivariate analysis. *Land Degradation & Development*, v.28, p.128-141, 2017.
- Lima, F. V.; Silvino, G. S.; Melo, R. S. S.; Lira, E. C.; Ribeiro, T. S. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo em área de encosta sob processo de degradação. *Revista Caatinga*, v.28, p.53-63, 2015b.
- Lima, R. P.; Rolim, M. M.; Oliveira, V. S.; Silva, A. R., Pedrosa, E. M.; Ferreira, R. L. C. Load-bearing capacity and its relationships with the physical and mechanical attributes of cohesive soil. *Journal of Terramechanics*, v.58, p.51-58, 2015a.
- Linstron, M.J.; Voorhees, W.B. Responses of temperate crops in North America to soil compaction. *Developments in Agricultural Engineering*, p.265-86, 1994.
- Lisetskii, F.; Stolba, V. F.; Marinina, O. Indicators of agricultural soil genesis under varying conditions of land use, Steppe Crimea. *Geoderma*, v.239-240, p.304-316, 2015.
- Naderi-Boldajia, M.; Keller, T. Degree of soil compactness is highly correlated with the soil physical quality index. *Soil & Tillage Research*, v.159, p.41-46, 2016.
- Nascimento, E. M. S.; Amorim, M. Q.; Araújo, K. L. B.; Cavalcante, T. R. B.; Chioderoli, C. A. Shear strength and preconsolidation Red Yellow Acrisol for Northeast semiarid under conventional and no-tillage management. *Revista de Ciências Agrárias*, v.60, p.322-327, 2017.
- R. Core Team R: A Language and Environment for Statistical Computing [internet] R Foundation for statistical computing, 2016.
- Reichert, J. M.; Rosa, V. T.; Vogelmann, E. S.; Rosa, D. P.; Horn, R.; Reinert, D. J.; Sattler, A.; Denardin, J. E. Conceptual framework for capacity and intensity physical

- soil properties affected by short and long-term (14 years) continuous no-tillage and controlled traffic. *Soil & Tillage Research*, v.158, p.123-136, 2016.
- Ribeiro, N. V.; Ferreira, L. G.; Ferreira, N. C. Avaliação da expansão do cultivo de cana-de-açúcar no bioma do Cerrado por meio da modelagem dinâmica da paisagem. *Revista Brasileira de Cartografia*, v.68, p.1-14, 2016.
- Rossetti, K. V.; Centurion, J. F. Ensaio de compactação em Latossolo cultivado com milho sob diferentes períodos de adoção de tipos de manejo. *Revista Brasileira de Ciência Agrária*, v.10, p.499-505, 2015.
- Silva, A. P., Ball, B. C., Tormena, C. A., Giarola, N. F., Guimarães, R. M. L. Soil structure and greenhouse gas production differences between row and interrow positions under no-tillage. *Scientia Agrícola*, v.71, p.157-162, 2014.
- Silva, A. J. N.; Carvalho, F. G. Coesão e resistência ao cisalhamento relacionadas a atributos físicos e químicos de um Latossolo amarelo de tabuleiro costeiro. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.31, p.853-862, 2007.
- Silva, A. R.; Lima, R. P. Soilphysics: Na R package to determine soil preconsolidation pressure. *Computer & Geosciences*, v.84, p.54-60, 2015.
- 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*, v.16, p.1206-1214, 2012.
- Vasconcelos, R. F. B.; Souza, E. R.; Cantalice, J. R. B.; Silva, L. S. Qualidade física de Latossolo Amarelo de tabuleiros costeiros em diferentes sistemas de manejo da cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.18, p.381-386, 2014.
- Vischi Filho, O. J.; Souza, Z. M.; Silva, R. B.; Lima, C. C.; Pereira, D. M. G.; Lima, M. E.; Sousa, A. C. M.; Souza, G. S. Capacidade de suporte de carga de Latossolo Vermelho cultivado com cana-de-açúcar e efeitos da mecanização no solo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.50, p.322-332, 2015.
- Warrick, A. W.; Nielsen, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: Hillel, D. (ed.). *Applications of soil physics*, cap.2, p.319-344, 1980.
- Yanrong, L. A review of shear and tensile strengths of the Malan Loess in China. *Engineering Geology*, v.236, p.4-10, 2018.

- Yavuzcan, H. G.; Gürhan, V. R. M. Soil strength as affected by tillage system and wheel traffic in wheat corn rotation in central Anatolia. *Journal of Terramechanics*, v.39, p.23-34, 2012.
- Yeomans, J. C.; Bremner, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, v.19, p.1467-1476, 1988.
- Zuber, S. M.; D.Behnke, G.; Nafziger, E. D.; Villamil, M. B. Multivariate assessment of soil quality indicators for crop rotation and tillage in Illinois. *Soil & Tillage Research*, v.174, p.147-155, 2017.

-CAPÍTULO III-

**Estabilidade de agregados e carbono orgânico do solo em função do tempo de cultivo
de cana-de-açúcar**

Estabilidade de agregados e carbono orgânico do solo em função do tempo no cultivo de cana-de-açúcar

RESUMO

Objetivou-se com esse trabalho avaliar a relação e evolução do carbono orgânico e estabilidade de agregados em um Argissolo Amarelo distrocoeso em cinco diferentes áreas de cultivo de cana-de-açúcar. O solo foi coletado em cinco áreas: a primeira estava em pousio; a segunda, com um ano após a colheita; a terceira, após duas colheitas; a quarta, após três colheitas; e, finalmente, a quinta, após quatro colheitas, em duas profundidades 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m. Determinou-se a textura do solo, densidade do solo (Ds), estabilidade de agregados (DMP e MF) e carbono orgânico (CO). Os dados foram submetidos à análise descritiva (médias), e análise discriminante canônica em uma abordagem multivariada. Os resultados mostraram que não houve relação entre os agregados e o carbono orgânico. Houve incremento do carbono orgânico ao longo do tempo.

Palavras-chave: densidade, textura, uso do solo

Stability of aggregates and organic carbon of soils as a function of time in the cultivation of sugarcane

ABSTRACT

The objective was to work with the relation and the evolution of the carbon and the stability of aggregates in the five areas of sugar cane cultivation. The soil was collected in five areas: the first was fallow, the second was one year after a harvest, the third after two generations, then three generations, and finally a fifth after four generations, at two depths 0,00-0,20 and 0,20-0,40 m. Soil texture, bulk density (BD), aggregate stability (MWD and FM) and organic carbon (OC) were determined. Data were analyzed by descriptive analysis and canonical descriptive analysis in a multivariate approach. The results obtained were shown between the aggregates and the organic carbon. There has been an increase in carbon over time.

Keywords: density, texture, use of the soil

INTRODUÇÃO

A crescente procura por alternativas de energia renovável vem viabilizando o crescimento do cultivo de cana-de-açúcar no Brasil, tornando-o uma das principais potências na produção de etanol, bem como, dos demais produtos resultantes da cana-de-açúcar (LOURENZANI; CALDAS, 2014). Diante disso, há necessidade cada vez maior em ampliar a área plantada, resultando em maior número de operações no solo que, por sua vez, pode ser um dos principais fatores para a ocorrência da degradação física e diminuição da disponibilidade de matéria orgânica (PUGLIESE et al., 2017).

O uso inadequado do solo com o revolvimento excessivo e uso de práticas pouco conservacionistas, podem provocar aumento da densidade do solo, mudanças na estrutura e principalmente na distribuição dos agregados, dentre outros danos (SOARES et al., 2016).

É através da distribuição e estabilidade de agregados que se obtém os indicativos da qualidade do solo, pois a estrutura é de grande importância para avaliação da qualidade de solos agrícolas, uma vez que, exerce grande influência nos ciclos de carbono e de nutrientes, na capacidade de receber, estocar e transmitir água, e na penetração das raízes (PORTUGAL et al., 2010). Diante disso, estudos apontam que a estabilidade de agregados tem forte relação com os teores das frações granulométricas, umidade, argila, porosidade e carbono orgânico, assim, os agregados podem ser tidos como bons indicadores da qualidade do solo (VICENTE et al., 2012; TAVARES et al., 2017).

A estabilidade de agregados e o diâmetro médio ponderado são dois índices de qualidade do solo, quanto maiores seus valores, melhor a qualidade do solo. O incremento do carbono orgânico do solo favorece o aumento dos índices de agregação (LOSS et al., 2015), pois os compostos orgânicos participam das ligações entre partículas individuais do solo, atuando como agente cimentante das unidades estruturais pelas diversas características de superfície (LIMA et al., 2003).

Contudo, a estabilidade de agregados e o carbono orgânico tendem a ser modificados durante longos períodos sucessivos de manejo de solo. Kunde et al. (2018) afirmam que todos os atributos físicos do solo são sensíveis ao ciclo sucessivo de cana-de-açúcar e a estabilidade de agregados tem o seu valor reduzido com o tempo e a preparação do solo e queima da palha reduzem o fornecimento de matéria orgânica fresca ao solo.

Diante do exposto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a relação e evolução do carbono orgânico e estabilidade de agregados em um Argissolo Amarelo distrocoeso em cinco diferentes áreas de cultivo de cana-de-açúcar.

MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo foi conduzido na Estação Experimental de Cana-de-açúcar do Carpina (EECAC-UFRPE), situada no município de Carpina, PE, nas coordenadas 7° 51' de Latitude e 35°14'W Longitude e 178 m de altitude. O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo "AS" tropical chuvoso com verão seco.

As análises de solo foram todas realizadas no Laboratório de Aproveitamento de Resíduos e Mecânica dos Solos – UFRPE, em um Argissolo Amarelo distrocoeso, e foram escolhidas 5 áreas diferentes: a primeira estava em pousio (T0); a segunda, com um ano após a colheita (T1); a terceira, após duas colheitas (T2); a quarta, após três colheitas (T3); e, finalmente, a quinta, após quatro colheitas (T4), cujas características granulométricas são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Caracterização física do Argissolo Amarelo distrocoeso

	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)
0,00-0,20 m			
T0	80	10	10
T1	73	12	16
T2	68	13	19
T3	75	11	14
T4	77	10	13
0,20-0,40 m			
T0	71	11	17
T1	75	10	18
T2	64	12	24
T3	69	8	23
T4	72	10	19

Os processos de preparo do solo consistiram em: análise do solo, dessecação da cana, subsolagem, correção do solo com calcário e gesso, gradagem e sulcagem.

Em cada uma das áreas definidas, foi estabelecida uma parcela com dimensões de 15,00×10,00 m, e, em cada uma das parcelas, foram escolhidos 4 pontos onde as coletas foram realizadas, sendo uma amostra na camada de 0,00-0,20 m e outra de 0,20-0,40 m, totalizando 40 amostras para cada um dos atributos do solo avaliados.

A densidade do solo foi determinada por meio de amostras indeformadas coletadas com o auxílio de anel metálico e amostrador de Uhland que foram submetidos a estufa a

105°C para a obtenção do peso seco e, assim, relacionar com o volume total do anel. A textura do solo foi determinada segundo metodologia do densímetro de Boyoucos, onde a areia foi separada por peneiramento, enquanto a argila por sedimentação a temperatura constante de 20°C e o silte por diferença. Todas essas análises seguiram a metodologia da EMBRAPA (2011).

O carbono orgânico (CO) foi obtido por titulação segundo metodologia de Yeomans; Bremner (1988).

O ensaio de estabilidade de agregados seguiu a metodologia de Kemper; Chepil (1965), onde as amostras de solo foram peneiradas e 50g do material retido no intervalo de 4 a 2 mm foi umedecida por capilaridade e depositada no conjunto de peneiras de 2, 1, 0,5, 0,250 e 0,106 mm e, logo em seguida, foram agitadas no tanque de Yoder para oscilação vertical durante 15 minutos. As frações retidas em cada peneira foram separadas em recipientes e colocadas em estufa a 105°C durante 24 horas e depois pesadas e medidos os percentuais de agregados estáveis por classe de tamanho, módulo de finura (MF) e diâmetro médio ponderado (DMP).

Os valores de DMP e MF foram determinados segundo as fórmulas a seguir:

$$DMP = \sum(cp \times p)$$

$$MF = \frac{\sum[(4,76-3,25)+(3,25-2,0)+(2,01-1,0)+(1,0-0,50)+(0,50-0,25)+(<025)]}{100}$$

Onde:

cp - é igual ao centro de cada classe de peneira

p - O peso seco da amostra (%);

Σ - Somatório da porcentagem acumulada de agregados em cada classe;

Os dados foram submetidos à análise descritiva (médias) e análise discriminante canônica (ADC). As médias das variáveis canônicas, para cada tratamento, foram comparadas por esferas de confiança a 95% de significância. Toda análise multivariada foi realizada através do pacote *candisc*, por meio do Software R (R Core Team, 2016). Os comportamentos das variáveis estudadas foram avaliados através da sua evolução ao longo do tempo e para obtenção dos modelos foi utilizada análise de regressão.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

É possível observar, Tabela 1, que a quantidade de areia é maior do que silte e argila de forma geral, mas, apesar disso, os valores de argila aumentaram com a

profundidade, o inverso ocorreu com os teores de areia, esse transporte de argila para a camada 0,20-0,40 m pode ser atribuída à translocação da argila do horizonte A para o horizonte B, influenciando, desta forma, na distribuição dos agregados, corroborando os resultados de Vicente et al. (2012) e Tavares et al. (2017).

A Ds obteve maior valor na camada 0,00-0,20 m na área T4 (Tabela 2), enquanto que, na camada 0,20-0,40 m, os maiores valores foram encontrados na área T0 e T1, mas, de forma geral, a camada inferior apresentou maiores valores de Ds, indicando que esta camada pode estar mais compacta em relação à camada 0,00-0,20 m. Resultados semelhantes foram encontrados por Rodrigues et al. (2015) e Bortolini et al. (2016).

Tabela 2. Diâmetro médio ponderado, módulo de finura, carbono orgânico e densidade do solo determinados nos sistemas de colheita em pousio (T0), com 1 ano após a colheita (T1), após 2 colheitas (T2), após 3 colheitas (T3) e, após 4 colheitas (T4), com duas profundidades.

Profundidade (m)	T0	T1	T2	T3	T4
Diâmetro médio ponderado (mm)					
0,00-0,20	1,32	1,45	1,07	1,23	1,35
0,20-0,40	1,17	1,36	0,94	1,01	1,09
Módulo de finura (mm)					
0,00-0,20	2.13	2.18	2.40	2.38	2.46
0,20-0,40	2.26	2.10	2.61	2.29	2.21
Densidade do solo (g.cm ⁻³)					
0,00-0,20	1,46	1,44	1,43	1,43	1,60
0,20-0,40	1,58	1,58	1,49	1,45	1,56
Carbono orgânico (g.kg ⁻¹)					
0,00-0,20	8,50	11,50	11,30	13,50	17,40
0,20-0,40	10,09	10,68	12,08	12,80	13,80

A maior média de CO está localizada em T4 para a camada de 0,00-0,20 m, possivelmente devido ao fato deste tratamento ter mais tempo de cultivo em relação as demais e assim a deposição das palhas durante as sucessivas colheitas devem ter acumulado no horizonte superficial. Loss et al. (2015) encontraram resultados semelhantes e justificaram que os maiores valores de carbono orgânico são encontrados em áreas onde há vegetação, pois, o aporte constante do acúmulo de resíduos vegetal, mantém o estado estável nas adições e perdas de CO.

O DMP teve maior valor em T1 nas duas camadas de acordo com as médias apresentadas na Tabela 2, indicando que neste tratamento os grãos de solo tendem a ter dimensões maiores, porém vale ressaltar que o DMP diminuiu ao longo do perfil do solo em todas as áreas devido, possivelmente ao tráfego durante as colheitas. Segundo Souza et al. (2012), o decréscimo da agregação do solo ao longo dos ciclos de cultivo e ao longo das camadas de solo podem estar relacionados ao efeito destrutivo da estrutura do solo pelas operações anuais e ao tráfego de maquinário durante a colheita.

Em relação ao MF, é possível perceber que as áreas T1 e T2 foram as que obtiveram a maior média na camada de 0,00-0,20 m, corroborando os dados do DMP, provavelmente, isto ocorreu devido ao fato desta área ser uma das mais recentes em relação as demais, pois foi realizada apenas a primeira colheita e assim o número de operações no solo foi menor quando se compara com as demais áreas, resultados semelhantes foram encontrados por Souza et al. (2012), Calonego; Rosolem (2008).

É possível perceber que não houve relação entre o DMP e o CO, pois nos tratamentos com maior quantidade de CO o DMP foram menores, contudo não só o carbono orgânico pode explicar as variações dos tamanhos dos agregados do solo, mas também o sódio, magnésio, cálcio e alumínio. Pedrotti et al. (2003) em estudo afirmaram que há correlação entre os teores de alumínio presente no solo e os agregados e que este componente também interfere na formação dos agregados do solo.

Além disso, Kunde et al. (2018) afirmam que os atributos físicos do solo são sensíveis aos ciclos sucessivos de cana-de-açúcar e a estabilidade de agregados tem o seu valor reduzido com o tempo.

Em relação a cada porcentagem dos agregados representada, Figura 1A, houve maior distribuição de agregados com diâmetro maior que 2 mm nos tratamentos T0, T1 e T4, com 32,81, 33,90 e 34,58 %. Resultados similares foram encontrados por Vasconcelos et al. (2010), onde avaliou diferentes sistemas de manejo e encontrou maior distribuição de agregados maiores. Em seguida, as frações dos agregados entre 1,00-0,50 mm apresentam valor superior em T2 e T3 com 23,85 e 26,42%, mesmo resultado é observado na classe entre 0,50-0,25 mm, onde os valores percentuais foram para os mesmos tratamentos T2 e T3 19,80 e 17,42%, as demais classes de agregados apresentaram valores inferior a 15%.

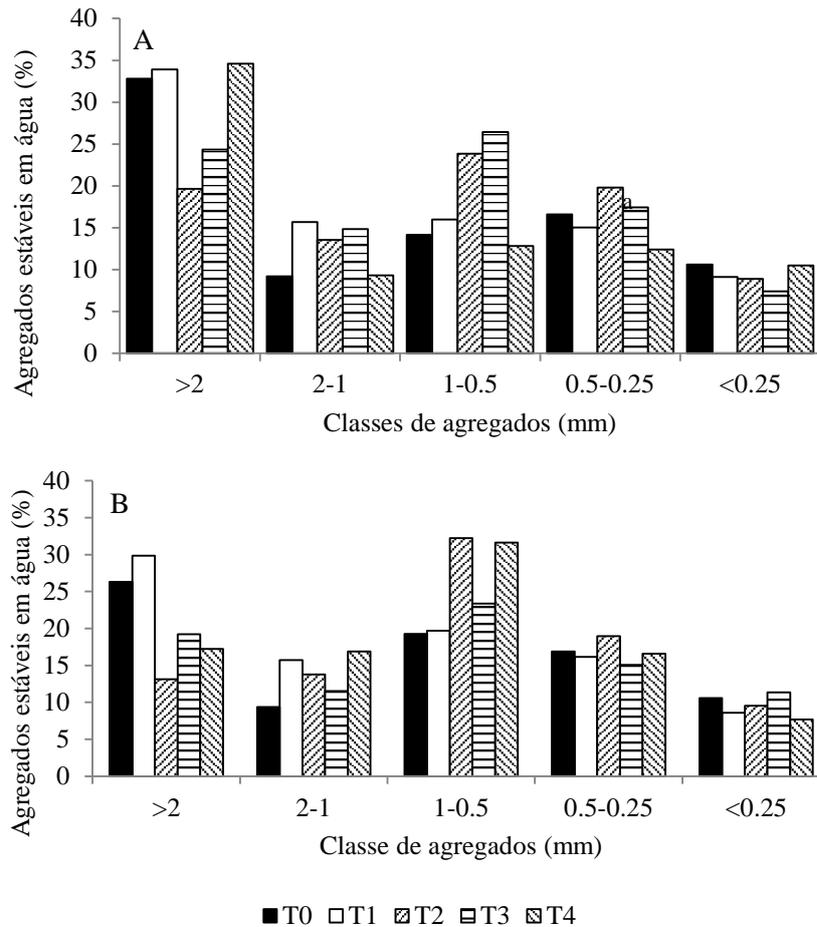


Figura 1. Distribuição dos agregados estáveis em água nas profundidades 0,00-0,20 m (A) e 0,20-0,40m (B) nas cinco áreas (T0, T1, T2, T3 e T4)

Na camada 0,20-0,40 m, houve decréscimo do percentual dos agregados contidos na classe maior que 2 mm, dessa forma, é possível considerar que a camada de 0,20-0,40 m, de todos os tratamentos, possuem agregados menores, contudo os maiores valores percentuais foram em T0 e T1 com 26,32 e 29,86%, nesta ordem. A maior concentração de agregados estáveis em água está na faixa entre 1,00-0,50 mm nesta camada, sendo T2 e T4 os tratamentos com maiores incrementos dessas frações, respectivamente, com percentuais de 32,23 e 31,63%.

Considerando que os vetores (Figura 2) estão contendo as variáveis e as esferas as áreas (T0, T1, T2, T3 e T4), é possível constatar que a primeira (Can1) e segunda (Can2) variáveis canônicas representaram 84 e 9% para a camada de 0,00-0,20 m e para a camada 0,20-0,40 m representaram 75 e 19%, respectivamente, dessa forma, é possível encontrar todas as informações sobre as variáveis citadas dentro dessas duas componentes, mas as informações mais pertinentes se encontram contidas na Can1 por conta da sua

percentagem, assim, os dados serão melhor avaliados no sentido direita-positivo e esquerda-negativo.

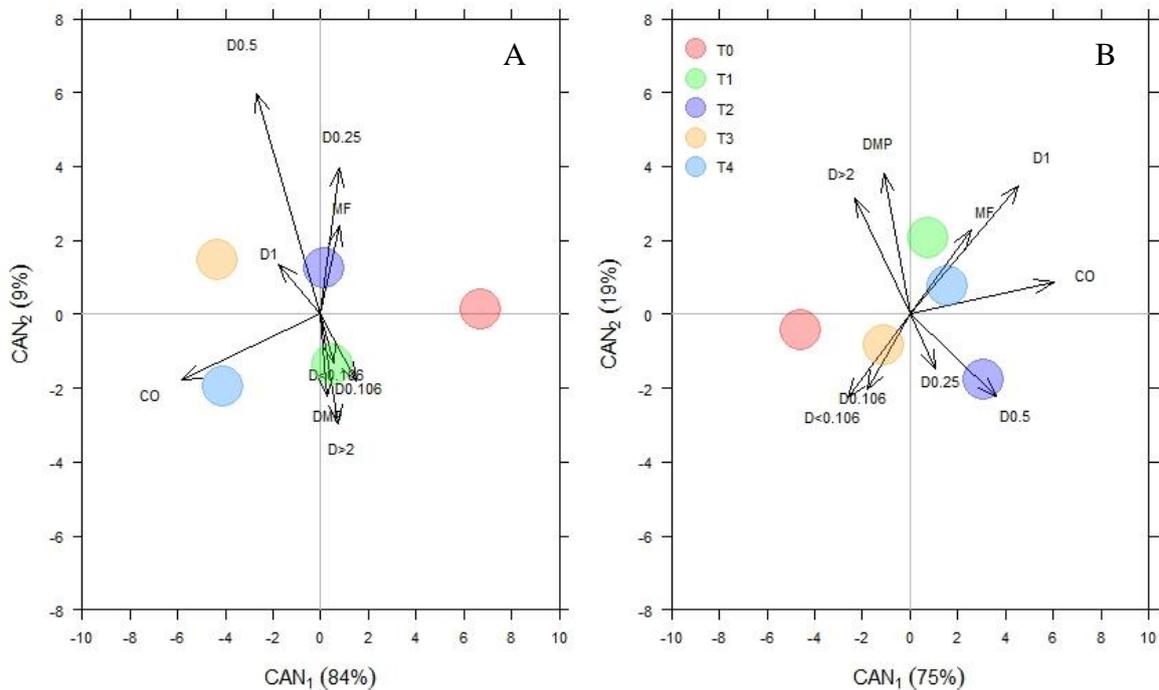


Figura 2. Dispersão dos scores das duas primeiras variáveis canônicas (Can1 e Can2) onde os tratamentos T0 (pousio), T1 (um ano após a colheita), T2 (após duas colheitas), T3 (após três colheitas) e T4 (após quatro colheitas) estão representado por esferas e as variáveis por vetores onde D>2 (agregados maiores que 2 mm), D1 (agregados com 1 mm de diâmetro), D0.5 (agregados com 0,50 mm), D0.106 (agregados com diâmetro de 0,106 mm) e D>0.106 (agregados com diâmetro menor que 106 mm) para a camada 0,00-0,20 m (A) e camada 0,20-0,40 m (B)

A estrutura dos resultados da Figura 2 é organizada de forma que o vetor mais distante do centro possui maior contribuição com a variação total do conjunto de dados. Neste caso, é possível observar na Figura 2A que o CO na área T4 interferiu de forma mais contundente na dispersão dos tratamentos, seguido da área T3, em relação as demais, ou seja, o intercepto da área T4 com o CO, claramente serviu de agente dispersante em relação as demais áreas. T3, neste caso, pode estar sendo influenciado não só por CO, como também por e D0.5, indicando a classe de agregados de 0,50 mm de diâmetro tem um aumento gradual discreto, ou seja, evolui através dos tratamentos.

Ainda na Figura 2A, a área T0 não se correlacionou positivamente com nenhuma outra área, nem variável, pois sua esfera está mais distante das demais e nenhum vetor está

próximo ou se direcionando a mesma. Contudo, a área T0 pode ser apontada como a que possui as menores taxas com CO, baseado na posição oposta que se encontra nesta Figura 2, o que é confirmado pela Tabela 2.

O CO também influenciou na dispersão das áreas na camada de 0,20-0,40 m (Figura 2B), porém esteve mais presente, no sentido positivo, nas áreas T1, T2 e T4. Somando-se a isso D1, D0.5, D0.25 e MF também se correlacionaram positivamente nas áreas T1, T2 e T4, porém essas variáveis não influenciaram nesta avaliação (Figura 2B).

A área que obteve maior correlação com a maior parte das variáveis (D0.106, D<0,106, D>2 e DMP) foi T1 para a camada 0,00-0,20 m, constatando que nessa área há relação entre os agregados mais finos e mais grossos, porém vale ressaltar que as frações dos agregados com diâmetro menores tiveram uma discreta interferência em relação à dispersão dessa área em relação as demais, pois os respectivos vetores tiveram uma distância pequena em relação ao centro, outra variável que teve pouca influência na análise foi D1 (Figura 2A). Isso significa que, possivelmente, a metodologia de preparo do solo nesta área não foi bem estabelecida de modo que os agregados de tamanhos maiores não foram fracionados.

Os agregados com diâmetro de 0,50 mm (D0.5) (Figura 2A) resultaram em um dos vetores com maior distância em relação ao centro, dessa forma, esta variável também foi importante na dispersão, em ordem de influência, das áreas T3 e T4, e assim na diferenciação entre cada área. Hongyu et al. (2016), demonstrou que a relação entre as variáveis pode ser estabelecida quando as mesmas apresentam o mesmo sentido, ou estão em oposição, não sendo necessário estarem interceptadas.

Em 0,00-0,20 m, a área T0 também se manteve distante dos vetores que representam as variáveis estudadas. Igualmente ao discutido na camada 0,00-0,20m, T0 e CO, nesta camada de 0,20-0,40 m, apresentam-se em oposição, indicando que T0 apresenta os menores valores de CO.

Os agregados na camada 0,20-0,40 m agruparam-se em pares com os diâmetros mais semelhantes entre si (Figura 2B): D<0.106 e D0.106; D0.25 e D0.5; DMP e D>2, os quais referem-se a mesma porcentagem de grão maiores de 2 mm; MF e D1. Os pares formados com os menores diâmetros não estão em oposição aos agregados de maior diâmetro, mas, sim, fizeram oposição a D0.25 e D0.5, o que sugere que não há relação entre os agregados de maiores e menores diâmetros.

O $D > 2$, o DMP, D0.106 e $D < 0.106$ ficaram em oposição a D0.25 e D0.5, indicando que seus valores podem ser inversamente proporcionais (Figura 2B), tendo a área T3 mais interferência das variáveis D0.106 e $D < 0.106$.

Na camada de 0,20-0,40 m, os agregados com diâmetros menores apresentaram maior influência em relação à camada de 0,00-0,20 m, isso foi possível constatar pelo fato dos vetores responsáveis por essas variáveis estarem mais distantes em relação ao centro, quando comparados com a camada 0,00-0,20 m, essa mesma informação corrobora com os dados contidos na Tabela 2, e Figura 1.

Diante dos resultados, Figura 2A e 2B, as áreas foram diferentes entre si, pois nenhum dos tratamentos contendo as áreas ficaram próximos na camada 0,00-0,20 m. Para a camada de 0,20-0,40 m ocorreu fato semelhante em relação à dispersão das esferas.

Com base nos resultados médios, Tabela 2, e nas relações constadas no estudo da dispersão das variáveis canônicas, é apresentado, Figura 3, a evolução da Ds, CO e agregados estáveis em água ao longo do tempo através dos gráficos de regressão. O CO foi incrementado ao longo do tempo para as duas camadas, com maior taxa de incremento e melhor R^2 para a camada 0,00-0,20 m. Provavelmente, o incremento no CO pode ser devido ao depósito de palha na superfície da área no momento da colheita, onde cada corte contribuiu com o depósito de mais palha sobre o solo, este fato se assemelha com os estudos de Signor et al. (2016). O mesmo ocorreu para a camada de 0,20-0,40 m, porém o aumento do CO não foi tão acentuado e o valor do R^2 diminuiu para 0,49 continuando com o mesmo ajuste (Tabela 3).

Após o CO, a Ds foi a variável que apresentou o melhor R^2 , sendo ele positivo ao longo do tempo na camada 0,00-0,20 m e, negativo, na camada 0,20-0,40 m. A maioria dos agregados não variou de forma relevante ao longo do tempo em ambas as camadas (Figura 3), destacando-se, na camada 0,00-0,20 m, as variáveis D1 e D0.5, que apresentaram um melhor ajuste por polinomial, em que no período T2 e T3 houve um aumento nos percentuais destes agregados, mas, ainda assim, não apresentaram um bom ajuste do R^2 (Figura 3B e Tabela 3). Houve decréscimo ao longo do tempo do diâmetro > 2 mm, D0.25 e D0.106 em ambas as camadas, mas com R^2 igual a 0, indicando que os dados não se ajustaram a nenhum dos modelos utilizado.

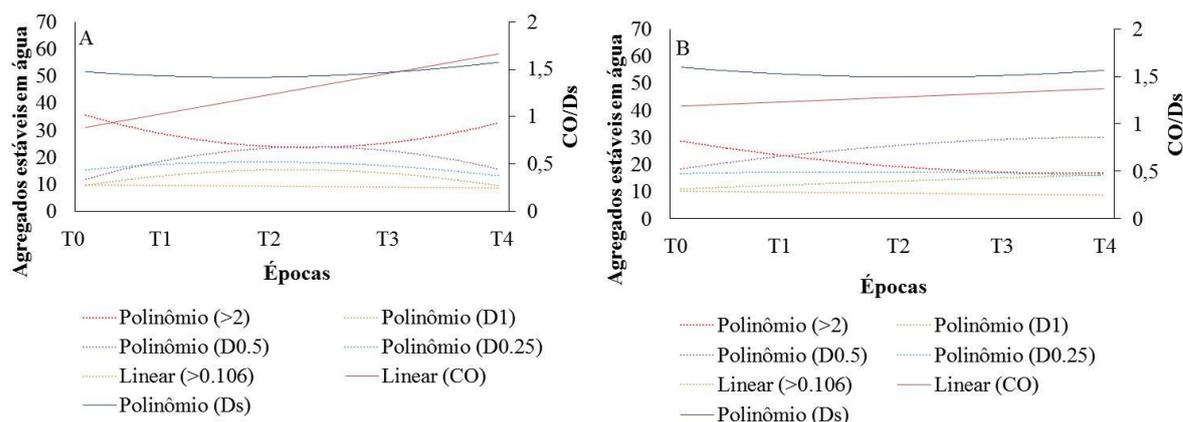


Figura 3. Evolução das variáveis ao longo do tempo para a camada de 0,00-0,20 m (A) e 0,20-0,40 m (B)

Tabela 3. Ajuste das variáveis ao longo do tempo para a camada 0,00-0,20m

0,00-0,20 m	
$Ds = 0,0256x^2 - 0,077x + 1,4728$	$R^2 = 0,29$
$CO = 0,1945x + 0,8874$	$R^2 = \mathbf{0,71}$
$>2 = 2,597x^2 - 11,082x + 35,545$	$R^2 = 0,00$
$D1 = -1,4697x^2 + 5,8301x + 9,6784$	$R^2 = 0,26$
$D0.5 = -2,4819x^2 + 10,853x + 11,969$	$R^2 = 0,41$
$D0.25 = -0,9775x^2 + 3,3494x + 15,452$	$R^2 = 0,00$
$D0.106 = -0,2882x + 9,7757$	$R^2 = 0,00$
0,20-0,40 m	
$Ds = 0,0214x^2 - 0,0939x + 1,5956$	$R^2 = 0,00$
$CO = -0,07x^2 + 0,3186x + 1,0536$	$R^2 = \mathbf{0,49}$
$>2 = 0,8348x^2 - 6,3026x + 28,632$	$R^2 = 0,00$
$D1 = 1,3046x + 11,086$	$R^2 = 0,22$
$D0.5 = 3,026x + 19,599$	$R^2 = 0,19$
$D0.25 = -0,1552x + 17,114$	$R^2 = 0,00$
$D0.106 = -0,3775x + 10,173$	$R^2 = 0,00$

A ausência de correlação entre o CO e os agregados observados na análise canônica da Figura 2, pode estar relacionada à evolução destas variáveis ao longo do tempo, em que o carbono foi significativamente incrementado e os agregados não, o que indica que o estudo em tempos maiores poderá indicar modificações nos agregados. Albuquerque et al. (2005) verificaram que a cobertura de plantas servem para incrementar a matéria orgânica no solo aumentando o teor de CO, mas não modifica a estabilidade dos agregados, e afirmam que, em períodos mais longos, as plantas de cobertura, associadas aos preparos conservacionistas, pelo aumento do CO, poderiam melhorar as características físicas do solo.

CONCLUSÕES

As áreas estudadas foram diferentes entre si, segundo a análise multivariada. Mas, para o período de tempo estudado em cada área, não se observou correlação direta entre CO e percentual de agregados maiores, apesar de que o CO teve um aumento gradual ao longo do tempo. O estudo abordando ciclos de cultivo de cana-de-açúcar maiores poderá indicar modificações nos agregados em função do CO, além disso, a avaliação de outros parâmetros, que contribuem para a formação dos agregados, também deverá ser analisada em trabalhos posteriores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albuquerque, J. A.; Argenton, J.; Bayer, C. Wildner, L. P.; Kuntze, A. G. Relação de atributos do solo com a agregação de um Latossolo Vermelho sob sistema de preparo e plantas de verão para cobertura do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.29, p.415-424, 2005.
- Bortolini, D.; Albuquerque, J. A.; Rech, C.; Mafra, Á. L.; Ribeiro Filho, H. M. N.; Pértile, P. Propriedades físicas do solo em sistema de integração lavoura-pecuária em Cambissolo Húmico. *Revista de Ciências Agroveterinárias*, v.15, p.60-67, 2016.
- Calonego, J. C.; Rosolem, C. A. Estabilidade de agregados do solo após manejo com rotação de culturas e escarificação. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.32, p.1399-1407, 2008.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Manual de métodos de análises de solo. 2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa, 2011. 212p.
- Hongyu, K.; Sandanielo, V. L. M.; Oliveira Junior, G. J. Análise de componentes principais: resumo teórico, aplicação e interpretação. *Engineering & Science*, v.1, p.83-90, 2016.
- Kemper, W. D.; Chepil, W. S. Size distribution of aggregates. In: Black, C.A.; Evans, D. D.; White, J. L.; Ensminger, L. E.; Clark, F. E. (ed.). *Methods of soil analysis: physical and mineralogical properties, including statistics of measurement and sampling*. American Society of Agronomy, p.499-510, 1965.
- Kunde, R. J.; Lima, C. L. R.; Silva, S. D. A.; Pilon, C. N. Tensile strength, friability, aggregation, and soil organic matter physical fractions of an Oxisol cultivated with sugarcane. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.53, p.487-494, 2018.

- Lima, C. R. L.; Pauletto, E. A.; Gomes, A. S.; Silva, J. B. Estabilidade de agregados de um Planossolo sob diferentes sistemas de manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.27, p.199-205, 2003.
- Loss, A.; Basso, A.; Oliveira, B. S.; Koucher, L. P.; Aliveira, R. A.; Kurtz, C.; Lovato, P. E.; Curmi, P.; Brunetto, G.; Comin, J. J. Carbono orgânico total, e agregação do solo em sistema de plantio direto agroecológico e convencional de cebola. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.39, p.1212-1224, 2015.
- Lourenzani, W. L.; Caldas, M. M. Mudanças no uso da terra decorrentes da expansão da cultura de cana-de-açúcar na região oeste de São Paulo. *Ciência Rural*, v.44, p.980-987, 2014.
- Pedrotti, A.; Ferreira, M. M.; Curi, N.; Silva, M. L. N.; Lima, J. M.; Carvalho, R. Relação entre atributos físicos, mineralogia da fração argila e formas de alumínio no solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.27, p.1-9, 2003.
- Portugal, A. F.; Juncksh, I.; Schaefer, C. E. R. G., Neves, J. C. L. Estabilidade de agregados em Argissolo sob diferentes usos comparado com mata. *Revista Ceres*, v.57, p.545-553, 2010.
- Pugliese, L.; Lourencetti, C.; Ribeiro, M. L. Impactos ambientais na produção do etanol brasileiro: do campo à indústria. *Revista Brasileira Multidisciplinar*, v.20, p.143-165, 2017.
- R. Core Team R: A Language and Environment for Statistical Computing [internet] R Foundation for statistical computing, 2016.
- Rodrigues, M. S.; Souza, C.; Lima, D. D.; Silva, S. D. P.; Alves, D. C.; Machado, N. S. Impacto do cultivo do coqueiro irrigado na qualidade física do solo na região semiárida brasileira. *Ciencia del Suelo*, v.34, p.139-144, 2016.
- Signor, D.; Czcza, R. V.; Milori, D. M. B. P.; Cunha, T. J. F.; Cerri, C. E. P. Atributos químicos e qualidade da matéria orgânica do solo em sistemas de colheita de cana-de-açúcar com e sem queima. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.51, p.1438-1448, 2016.
- Soares, M. D. R.; Campos, M. C. C.; Oliveira, I. A.; Cunha, J. M.; Santos, L. A. C.; Fonseca, J. S.; Souza, Z. M. Atributos físicos do solo em áreas sob diferentes sistemas de usos na região de Manicoré, AM. *Revista de Ciência Agrária*, v.59, 2016.
- Souza, H. A.; Marcelo, A. V.; Centurion, J. F. Carbono orgânico e agregação de um Latossolo Vermelho com colheita mecanizada de cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Ciências Agrônômicas*, v.43, p.658-663, 2012.

- Tavares, U. E.; Rolim, M. M.; Simoes Neto, D. E.; Pedrosa, E. M. R.; Magalhães, A. G.; Silva, E. F. F. Aggregate stability and penetration resistance after mobilization of a dystrocohesive Ultisol. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.21, p.752-757, 2017.
- Vasconcelos, R. F. B.; Cantalice, J. R. B.; Oliveira, V. S.; Costa, Y. D. J.; 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*, v.34, p.309-316, 2010.
- Vicente, T. F. S.; Pedrosa, E. M. R.; Rolim, M. M.; Oliveira, V. S.; Oliveira, A. K. S.; Souza, A. M. P. L. Relações de atributos do solo e estabilidade de agregados em canaviais com e sem vinhaça. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.16, p.1215-1222, 2012.
- Yeomans, J. C.; Bremner, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, v.19, p.1467-1476, 1988.